



**CONTRÔLE DE COMPACTAGE EN RÉCEPTION
DES RÉSEAUX D'ASSAINISSEMENT
FIABILITÉ DES ESSAIS AU PÉNÉTROMÈTRE DYNAMIQUE**



MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE ET DU DÉVELOPPEMENT DURABLE

DIRECTIONS RÉGIONALES
DE L'ENVIRONNEMENT

AGENCES
DE L'EAU

INSTITUT FRANÇAIS
DE L'ENVIRONNEMENT

CONSEIL SUPÉRIEUR
DE LA PÊCHE

La définition de la politique publique de l'eau nécessite une vision précise de la ressource, des préoccupations de la société et des solutions envisageables.

Les programmes d'études animés par la Direction de l'Eau contribuent à préciser cette vision.

Depuis 1977, cette direction a mené six programmes pluriannuels en concertation avec les agences de l'eau.

Le nouveau programme inter-bassins EAU 2008 associe au-delà de ces agences, les services déconcentrés du ministère, ses autres établissements publics concernés (Conseil Supérieur de la Pêche et Institut Français de l'Environnement) et sa Direction des Etudes Economiques et de l'Evaluation Environnementale (D4E).

Ce programme, financé par le Fonds National de Solidarité sur l'Eau (FNSE), accompagne les changements profonds de la politique de l'eau aux plans européen et français : application de la directive-cadre publiée le 23 octobre 2000, projet de nouvelle législation française, valorisation renforcée de l'offre publique de connaissance pour la pertinence des choix technologiques, les risques pour l'environnement, la normalisation et l'évaluation des politiques menées.

Son organisation repose sur sept groupes thématiques relatifs aux domaines suivants :

- Les eaux de surface
- Les eaux souterraines
- Les eaux territoriales et marines
- Les risques et inondations
- Les usages et pressions
- La planification et l'économie
- Les aspects juridiques et institutionnels.

Les résultats des études sont régulièrement publiés dans la collection inter-bassins dans laquelle le présent document s'inscrit.

CONTRÔLE DE COMPACTAGE EN RÉCEPTION DES RÉSEAUX D'ASSAINISSEMENT FIABILITÉ DES ESSAIS AU PÉNÉTROMÈTRE DYNAMIQUE



Document réalisé sous la direction des Agences de l'Eau
et du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (MEDD)

Directeur de la publication Pascal Berteaud

Ont participé à l'étude :

Coordinateur de l'étude René-Claude Fouilloux
AE Seine-Normandie

Réalisateurs de l'étude Daniel Poulain - CEMAGREF Bordeaux
Guillaume Dalmau - CEMAGREF Bordeaux

Groupe de travail :

Emeline Colas	AE Adour-Garonne
Martine Lami	AE Rhône-Méditerranée et Corse
Camille Dumont	AE Rhin-Meuse
Franck Cohen-Solal	AE Loire-Bretagne
Patrick Demaline	AE Artois-Picardie

Pascale Bayer Direction de l'Eau - MEDD

Patrice Mériaux	CEMAGREF Aix-en-Provence
Olivier Payraastre	CETE de l'Est
Alain Quibel	CETE CER
Roland Gourvès	LERMES CUST
Bernard Tcherniavky	SEDIDRILL SA
Frédéric Fatoux	CMR SMR

Bernard Bonnefoy	Syncra
Serge Capello	Syncra
Marielle Jansson-Charrier	Syncra
Pierre Syord	Syncra
Yann Le Rouzic	GICA

ISSN : 1161-0425

Tiré à 2000 exemplaires / Décembre 2004

Prix 26 €



S O M M A I R E

CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉS SUR LE COMPACTAGE ET SON CONTRÔLE	15
I. IMPORTANCE DU COMPACTAGE	16
II. LE COMPACTAGE	17
II.1. Définition	17
II.2. Signification mécanique du compactage	17
II.3. Le compactage en laboratoire : l'essai Proctor	17
II.4. L'action des compacteurs	18
II.4.1. Le pétrissage	18
II.4.2. Influence de la rigidité du support	19
III. MODALITÉS ET ENGIN DE COMPACTAGE	20
III.1. Les engins de compactage	20
III.2. Importance des modalités de compactage sur le chantier	20
III.2.1. Épaisseur de la couche	21
III.2.2. Nombre de passes	21
III.2.3. Vitesse de translation	21
IV. MÉTHODES DE CONTRÔLE DU NIVEAU DE COMPACTAGE D'UN REMBLAI	22
IV.1. Contrôles en cours d'exécution des travaux	22
IV.1.1. Méthode au cylindre	22
IV.1.2. Méthode de remplacement par le sable	23
IV.1.3. Densitomètre à membrane	23
IV.1.4. Les nucléodensimètres	25
IV.2. Contrôles après l'exécution des travaux, réception	27
IV.2.1. Contrôles avec forage préalable : la double sonde gamma	27
IV.2.2. Contrôles sans forage préalable	28
IV.3. Les pénétromètres dynamiques	29
IV.3.1. Définition	29
IV.3.2. Les deux grands types de pénétromètres dynamiques	29
IV.3.3. La formule de battage	30
IV.3.4. Limites et difficultés liées à l'utilisation des pénétromètres dynamiques	32



CHAPITRE 2

NORMES ET GUIDES TECHNIQUES	35
I. LES GUIDES TECHNIQUES	36
I.1. Le Guide des Terrassements Routiers.....	36
I.2. Le Guide Technique "Remblayage des tranchées et réfection des chaussées"	37
I.2.1. Objectif du document	37
I.2.2. Les objectifs de densification	37
I.2.3. Matériaux	40
I.2.4. Réfection des chaussées	41
I.2.5. Compacteurs.....	41
I.2.6. Modalités de compactage	42
I.2.7. Assurance qualité	42
I.3. Le Guide Technique d'Accréditation COFRAC "Contrôle de compactage par la méthode au pénétromètre dynamique"	43
II. LES NORMES	44
II.1. Projet de norme XP P 94-063 : Méthode au pénétromètre dynamique à énergie constante.....	44
II.1.1. Eléments techniques généraux	44
II.1.2. Les droites limite et de référence en fonction B	45
II.1.3. Exploitation des résultats - Interprétation	48
II.1.4. Analyse et commentaires du texte.....	49
II.2. Projet de norme XP P 94-105 : Méthode au pénétromètre dynamique léger à énergie variable.....	51
II.2.1. Eléments techniques généraux	51
II.2.2. Détermination des courbes limite et de référence	52
II.2.3. Analyse et commentaires du texte	54
II.3. Comparaison des deux textes normatifs	54
III. LES NORMES ÉTRANGÈRES	55
Aux États-Unis	55
Au Royaume-Uni	55
En Allemagne	55



CHAPITRE 3

LES DIFFÉRENTS PÉNÉTROMÈTRES DYNAMIQUES EMPLOYÉS EN CONTRÔLE DE COMPACTAGE	57
I. LES PÉNÉTROMÈTRES DYNAMIQUES À ÉNERGIE CONSTANTE	58
I.1. Le PDG 1000 du Centre d'Expérimentation Routière de Rouen	58
I.1.1. Coordonnées du constructeur	58
I.1.2. Description et caractéristiques du matériel	58
I.1.3. Le logiciel	58
I.2. Les pénétromètres Sedidrill	60
I.2.1. Coordonnées du constructeur	60
I.2.2. Description et caractéristiques du matériel	60
I.2.3. Le logiciel : Compactolog	61
I.3. La sonde LRS A de CMR/SMR	62
I.3.1. Coordonnées du constructeur	62
I.3.2. Description et caractéristiques du matériel	62
I.3.3. Le logiciel	63
II. LES PÉNÉTROMÈTRES DYNAMIQUES À ÉNERGIE VARIABLE	64
II.1. Le PANDA de Sol Solution	64
II.1.1. Coordonnées du constructeur	64
II.1.2. Description et caractéristiques du matériel	64
II.1.3. Le logiciel	65
III. SYNTHÈSE DES CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DES DIFFÉRENTS PÉNÉTROMÈTRES	66
IV. COMMENTAIRES CONCERNANT L'APPAREILLAGE ET SON ÉTALONNAGE	67



CHAPITRE 4

RÉSUMÉ ET ANALYSE DES DIFFÉRENTS DOCUMENTS RELATIFS AU CONTRÔLE DE COMPACTAGE À L'AIDE DE PÉNÉTROMÈTRES DYNAMIQUES	69
I. ÉTUDES SPÉCIFIQUES À UN SEUL PÉNÉTROMÈTRE DYNAMIQUE	70
I.1. Etude du CER de Rouen sur le PDG 1000	70
I.1.1. Objectif de l'étude	70
I.1.2. Principe du contrôle au pénétromètre dynamique	70
I.1.3. La précision de la mesure	72
I.1.4. Conclusions de l'étude	73
I.1.5. Commentaires	73
I.2. Etude du CER de Rouen sur l'assurance qualité et le contrôle au PDG 1000	74
I.2.1. Objectif de l'étude	74
I.2.2. Définition de la qualité du compactage	74
I.2.3. Influence de l'épaisseur des couches sur la qualité du compactage	74
I.3. Etude du LRPC de Lille sur la réponse du PDG 1000	77
I.3.1. Objectif de l'étude	77
I.3.2. Conditions expérimentales	77
I.3.3. Méthode d'analyse des résultats	78
I.3.4. Conclusions de l'étude	78
I.3.5. Commentaires	78
I.4. Thèse de Shuhua ZHOU sur le PANDA	78
I.4.1. Objectif de l'étude	78
I.4.2. Le contrôle de compactage dans l'étude	78
I.4.3. Commentaires	79
I.5. Rapport de stage de C. Coddens sur l'étalonnage du PANDA en laboratoire	80
I.5.1. Objectif de l'étude	80
I.5.2. Conditions expérimentales	80
I.5.3. Les principales constatations	80
I.5.4. L'analyse statistique	81
I.5.5. Commentaires	81



II. ÉTUDES COMPARATIVES	82
II.1. Etude comparative du CER de Rouen sur le domaine d'emploi des appareils	82
II.1.1. Objectif de l'étude	82
II.1.2. Description de l'expérimentation	82
II.1.3. Analyse des résultats	83
II.1.4. Synthèse des résultats	85
II.1.5. Conclusion	87
II.1.6. Commentaires	88
II.2. Etude comparative du LRPC de Nancy sur le calcaire de Jaumont (5/15mm)	89
II.2.1. Objectif de l'étude	89
II.2.2. Conditions expérimentales	89
II.2.3. Observations et conclusions de l'étude	90
II.2.4. Conclusion générale de l'étude	91
II.2.5. Commentaires	91
II.3. Etude comparative du LRPC de Nancy sur le calcaire de Jaumont (0/50mm)	92
II.3.1. Objectif de l'étude	92
II.3.2. Conditions expérimentales	92
II.3.3. Observations et conclusions de l'étude	93
II.3.4. Conclusion générale de l'étude	93
II.3.5. Commentaires	93
II.4. Etude du TRL, United Kingdom	94
II.4.1. Objectif de l'étude	94
II.4.2. Conditions expérimentales	94
II.4.3. Observations et conclusions de l'étude	95
II.4.4. Commentaires	95
II.5. Etude du Urban Utility Center à New York	95
II.5.1. Objectif de l'étude	95
II.5.2. Conditions expérimentales	95
II.5.3. Observations et conclusions de l'étude	96
II.5.4. Commentaires	97



CHAPITRE 5

ÉTAT DES PRATIQUES	99
I. LES ACTEURS ET LES INTÉRÊTS DU CONTRÔLE	101
II. CONSTITUTION D'UNE FICHE DE VISITE	101
II.1. Les recommandations du guide d'accréditation COFRAC	102
II.1.1. Organismes d'inspection	102
II.1.2. Procédure générale de réalisation des essais	102
II.1.3. Implantation des sondages	103
II.1.4. Profondeur des sondages	103
II.1.5. Identification des matériaux	103
II.1.6. Mise en œuvre de l'essai	103
II.1.7. Exploitation des résultats	104
II.1.8. Interprétation	104
II.1.9. Rapport de contrôle du compactage	104
II.2. La fiche de visite	104
III. LES RÉSULTATS ET OBSERVATIONS	105
III.1. Répartition géographique des visites de chantiers	105
III.2. Résultats de l'enquête	106
III.2.1. Synthèse des résultats et commentaires	106
III.2.2. Compte rendu succinct des visites	109
IV. BILAN ET SUGGESTIONS	116
IV.1. Contrôle de l'enrobage et du lit de pose	116
IV.2. Implantation des sondages	117
IV.3. Classification des matériaux	117
IV.3.1. Origine de la classification	117
IV.3.2. Les matériaux particuliers	117
IV.3.3. Etat hydrique pour les matériaux sensibles à l'eau	117
IV.3.4. Matériau du lit de pose	118
IV.4. Le frottement latéral	118
IV.5. Présence de la nappe	118
IV.6. Zone de raccord	118
IV.7. Planches d'étalonnage (fonction C)	119
IV.8. Répartition des objectifs de densification	119
IV.9. Délai de livraison des résultats du contrôle	119
IV.10. Le procès verbal	119
IV.11. L'étalonnage des pénétromètres dynamiques	120
V. CONCLUSION CONCERNANT L'ÉTAT DES PRATIQUES	121

CHAPITRE 6

PLAN EXPÉRIMENTAL ET MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE	123
I. MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE DES RÉSULTATS	124
1.1. Lissage	124
1.2. Bruit de fond	125
1.2.1. Définition du bruit de fond	125
1.2.2. Définition mathématique de l'indicateur de bruit de fond	125
1.2.3. Remarque concernant le bruit de fond	125
1.3. Etude de la dispersion	125
1.3.1. Définition de la dispersion	125
1.3.2. Définition mathématique de l'indicateur de dispersion	125
1.3.3. Analyse des valeurs des indices de dispersion	126
1.4. Etude de la position du pénétrogramme lissé par rapport aux droites limite et de référence	126
1.4.1. Définition d'un coefficient de position	126
1.4.2. Définition mathématique du coefficient de position	127
1.4.3. Hauteur de dépassement et analyse des valeurs alpha	128
1.4.4. Test de différence significative	128
1.4.5. Analyse des valeurs de alpha	129
II. APPLICATION AUX RÉSULTATS ISSUS DE L'EXPÉRIMENTATION DU CER (1999)	130
II.1. Etude du bruit de fond	130
II.1.1. Résultats	130
II.1.2. Commentaires	130
II.1.3. Conclusion	131
II.2. Etude de la dispersion	131
II.2.1. Résultats	131
II.2.2. Commentaires	132
II.2.3. Conclusion	133
II.3. Etude de la position du pénétrogramme par rapport aux droites limite et de référence	134
II.3.1. Résultats	134
II.3.2. Analyse graphique des mesures	134
II.3.3. Commentaires sur les coefficients alpha	136
II.3.4. Conclusion	138



III. LE PLAN EXPÉRIMENTAL	139
III.1. Matériels et matériaux.....	139
III.1.1. Les pénétromètres dynamiques testés.....	139
III.1.2. Les matériaux testés.....	139
III.2. Définition des planches expérimentales.....	140
III.2.1. Mise en œuvre.....	140
III.2.2. Dispositions pratiques.....	141
III.3. Résultats attendus.....	142
III.3.1. Analyse des paramètres de caractérisation du signal pour chaque appareil.....	142
III.3.2. Analyse de la pertinence des réponses en fonction de l'objectif de densification testé.....	142
III.3.3. Représentativité du catalogue des cas en fonction B pour le matériau testé.....	143
III.3.4. Frottement latéral.....	143
III.3.5. Conclusion à l'issue du plan expérimental.....	143
IV. CONCLUSION	144
CONCLUSION	145
BIBLIOGRAPHIE	148
ANNEXES	151



LISTE DES FIGURES

1. COURBES PROCTOR POUR UN SOL ET LES ÉNERGIES OPN ET OPM	18
2. EFFET DE PONT DANS UN SOL	18
3. INVERSION DU DÉVIATEUR DES CONTRAINTES SOUS L'ACTION D'UN COMPACTEUR	19
4. INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE ET DU NOMBRE DE PASSES SUR LA COMPACTITÉ	21
5. INFLUENCE DU NOMBRE DE PASSES SUR LA COMPACTITÉ	21
6. COUPE SCHÉMATIQUE D'UN DENSITOMÈTRE À MEMBRANE EN PLACE	24
7. SCHÉMA DE PRINCIPE D'UN NUCLÉODENSIMÈTRE À DIFFUSION DIRECTE	25
8. SCHÉMA DE PRINCIPE D'UN NUCLÉODENSIMÈTRE À RÉTRO DIFFUSION	26
9. RELATION ENTRE LA RÉSISTANCE À LA PÉNÉTRATION ET L'ENFONCEMENT	31
10. VARIATION DE LA MASSE VOLUMIQUE SÈCHE SUR LA HAUTEUR DE LA COUCHE COMPACTÉE	37
11. CAS TYPE I, DISTRIBUTION VERTICALE DES OBJECTIFS DE DENSIFICATION DANS LE CAS D'UNE TRANCHÉE SOUS CHAUSSÉE	38
12. CAS TYPE II, DISTRIBUTION VERTICALE DES OBJECTIFS DE DENSIFICATION DANS LE CAS D'UNE TRANCHÉE SOUS TROTTOIR	39
13. CAS TYPE III, DISTRIBUTION VERTICALE DES OBJECTIFS DE DENSIFICATION DANS LE CAS D'UNE TRANCHÉE SOUS ACCOTEMENT	39
14. DIFFÉRENTES DIFFICULTÉS DE COMPACTAGE EN FONCTION DE LA COMPOSITION DE SOLS	41
15. EXEMPLE DE PÉNÉTROGRAMME AVEC DROITES DE REFUS ET DE RÉFÉRENCE	45
16. DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE PERMETTANT D'OBTENIR LES VALEURS D'ENFONCEMENT LIMITE ET DE RÉFÉRENCE POUR CHAQUE SOUS-CLASSE D'ÉTAT DE LA CLASSIFICATION GTR POUR LES SOLS SENSIBLES À L'EAU	47
17. DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE PERMETTANT DE DÉFINIR, DANS UN MOULE, LES DROITES LIMITE ET DE RÉFÉRENCE POUR CHAQUE SOUS-CLASSE D'ÉTAT DE LA CLASSIFICATION GTR	53
18. LE PÉNÉTRODENSITOGAPHE, PDG 1000	58
19. LES PÉNÉTROMÈTRES SEDIDRILL : SUR ROUES, AVEC UNE REMORQUE OU SUR CHENILLE	60
20. LE PÉNÉTROMÈTRE LRS AUTOMATIQUE MONTÉ SUR REMORQUE	62
21. LE PANDA ET SA VALISE DE TRANSPORT	64



22. INTERPRÉTATION TYPE EN FOND DE COUCHE85

23. REPRÉSENTATION DE LA DISPERSION D'UNE POPULATION PAR RAPPORT
AU BRUIT DE FOND86

24. IMPLANTATION GÉOGRAPHIQUE DES VISITES DE CHANTIER
POUR L'ÉTAT DES PRATIQUES.105

25. REPRÉSENTATION GRAPHIQUE DE LA DÉFINITION
DES COEFFICIENTS ALPHA.127

26. REPRÉSENTATION GRAPHIQUE DES PÉNÉTROGRAMMES CUMULÉS135

27. REPRÉSENTATION GRAPHIQUE DES INTERVALLES DE CONFIANCE
DES COEFFICIENTS ALPHA137

28. DISPOSITION DES ESSAIS PÉNÉTROMÉTRIQUES LE LONG
DE LA PLANCHE EXPÉRIMENTALE.140

29. DISPOSITION DES COUCHES DANS LA TRANCHÉE141



LISTE DES TABLEAUX

1. CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DU PÉNÉTRODENSITOGAPHE, PDG 1000	59
2. CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DU PÉNÉTROMÈTRE DE CONTRÔLE DU COMPACTAGE SEDIDRILL	61
3. CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DU PÉNÉTROMÈTRE DYNAMIQUE LRS A 30 (CMR-SMR) UTILISÉ EN CONTRÔLE DU COMPACTAGE	62
4. CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DU PÉNÉTROMÈTRE DYNAMIQUE PANDA (SOL SOLUTION) UTILISÉ EN CONTRÔLE DU COMPACTAGE ..	65
5. SYNTHÈSE DES CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DES PÉNÉTROMÈTRES DYNAMIQUES GÉNÉRALEMENT UTILISÉS EN CONTRÔLE DE COMPACTAGE, EN FRANCE	66
6. EXEMPLES D'ENFONCEMENT DE LA POINTE (MM) PAR COUP, À 40 CM DE PROFONDEUR, POUR DIFFÉRENTS TYPES DE SOLS COMPACTÉS À 95% DE LA DENSITÉ À L'OPN	70
7. CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DES PÉNÉTROMÈTRES DYNAMIQUES TESTÉS AU COURS DE L'ÉTUDE	82
8. ECHELLE DU BRUIT DE FOND	84
9. VALEURS DES BRUITS DE FOND MOYENS POUR CHAQUE APPAREIL ET CHAQUE PLANCHE	130
10. VALEURS DES DISPERSIONS MOYENNES POUR CHAQUE APPAREIL ET CHAQUE PLANCHE SELON LA MÉTHODE DU CER (1999) CELLE DU CEMAGREF APPLIQUÉE À LA SEULE COUCHE 3 EN PROFONDEUR OU À L'INTÉGRALITÉ DU REMBLAI	132
11. RÉSULTATS DU TEST DE STUDENT.	137
12. CARACTÉRISTIQUES DES DIFFÉRENTS PÉNÉTROMÈTRES DYNAMIQUES ENVISAGÉS	139



Cette étude a été réalisée par l'Unité Ouvrages et Réseaux Hydrauliques du Cemagref, Groupement de Bordeaux, dans le cadre de la convention du 14 juin 2000 liant le groupement Inter-Agences de l'Eau et le Cemagref, co-financeurs de cette étude. Elle a pour objet de définir la fiabilité des essais pénétrométriques réalisés pour la vérification de l'état de compactage des matériaux de remblayage des tranchées d'assainissement.

D'un point de vue réglementaire, l'article 25 de l'arrêté Ministériel du 22 décembre 1994 impose que "les ouvrages de collecte fassent l'objet d'une procédure de réception prononcée par la commune". Aussi, "il précise qu'à cet effet, la commune confie la réalisation d'essais à un opérateur qualifié et indépendant". "Cette réception comprend notamment le contrôle [...] de la bonne exécution des fouilles et de leur remblayage".

Ces travaux de réception sont aisément compréhensibles si l'on considère les nombreuses interactions existant entre la conduite et le milieu naturel environnant. En effet, l'excavation d'une tranchée provoque la rupture d'un équilibre naturel du terrain. La principale difficulté dans la pose de canalisations consiste donc en un rétablissement de cet équilibre dès la fin des travaux. Après la pose de la canalisation, la tranchée d'assainissement est donc remblayée et le matériau utilisé est compacté de sorte à constituer des conditions stables dans le temps, notamment vis à vis du tassement. Le contrôle des conditions de mise en place du matériau (épaisseur et densité des différentes couches) est indispensable pour s'assurer que ce nouvel équilibre sera durable et permettra de garantir la pérennité de la canalisation et des structures sus-jacentes, comme par exemple, les chaussées routières.

Conformément aux termes de la convention, la présente étude comporte les 4 phases suivantes :

- * une étude bibliographique,
- * un recensement des pénétromètres dynamiques disponibles sur le marché français,
- * un état des pratiques de contrôle sur les chantiers,
- * l'établissement d'un plan expérimental accompagné d'une méthodologie d'analyse des résultats.

Les phases 1 et 2 constituent les 4 premiers chapitres qui reposent essentiellement sur une recherche bibliographique. Soulignons ici que les publications françaises sont les plus nombreuses, en effet, c'est en France que cette méthode de contrôle du compactage au pénétromètre dynamique s'est surtout développée.

Dans le premier chapitre nous aborderons les différentes méthodes permettant de vérifier le niveau de compactage d'un remblai. Parmi celles-ci nous aborderons plus en détail le principe de fonctionnement des pénétromètres dynamiques qui, avec un coût réduit et une grande souplesse d'utilisation, apparaissent aujourd'hui comme une alternative intéressante au contrôle de compactage.

Dans le chapitre 2 sont abordées les normes et les recommandations techniques françaises relatives à la vérification du compactage en remblayage de tranchées d'assainissement. Les méthodes et moyens qu'elles avancent sont exposées et commentées en détail. Par la suite, le chapitre 3 fait la description des pénétromètres dynamiques les plus employés aujourd'hui en France lors des contrôles de compactage. Le chapitre 4 recense et commente les différentes études ayant trait à l'étalonnage, à la vérification des performances et à la comparaison des résultats obtenus avec ces appareils.

Dans le chapitre 5 nous ferons un bilan de l'état des pratiques (phase 3 de la convention). Nous avons effectué les visites de 10 chantiers de contrôle ce qui permet de se rendre compte des conditions d'utilisation du pénétromètre dynamique sur le terrain. Nous en déduisons les principales contraintes rencontrées lors des essais et leur impact potentiel sur la qualité de la mesure et la pertinence des résultats obtenus.

Finalement, la dernière partie du document, le chapitre 6, est consacré à l'établissement d'un plan expérimental permettant de juger de la qualité des réponses des différents pénétromètres dynamiques. Ce plan expérimental est accompagné d'une méthodologie d'analyse des résultats testée sur un jeu de données issues d'une expérimentation menée par le CER de Rouen en 1999.





CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉS SUR LE COMPACTAGE ET SON CONTRÔLE



I. IMPORTANCE DU COMPACTAGE

Une étude, réalisée en 1985 par les Laboratoires des Ponts et Chaussées à la demande des Agences de l'Eau, a établi sur 169 cas de désordre recensés sur des canalisations d'assainissement, les principales causes suivantes :

- * Dans 40% des cas il a été constaté des tassements provenant d'une insuffisance de compactage au voisinage immédiat de la canalisation. Le compactage imparfait et inégal au moment de la pose, évolue dans le temps le long du profil d'où des tassements différentiels, des contre-pentes, puis des déviations angulaires horizontales et verticales, pouvant aboutir à la mise en butée rigide des tuyaux par coincement excessif des joints, et même cassures transversales.
 - * 25% des désordres proviennent de l'entraînement hydrodynamique des matériaux fins constituant le lit de pose ou la zone d'enrobage entourant la canalisation. Cet entraînement, le plus souvent dû au marnage de la nappe, déstabilise la canalisation par des tassements différentiels, il s'ensuit des déviations angulaires.
 - * Enfin, les 35% de cas de désordres restant découlent d'un environnement plus éloigné de la canalisation :
 - glissement de terrain,
 - effondrement au-dessus d'une cavité de dissolution,
 - compressibilité du sol entourant la tranchée,
 - cisaillement de la canalisation par transition d'un substratum dur à une zone compressible,
 - déstabilisation par remaniement des matériaux autour de la tranchée par pompage et rabattement de nappe,
- Ou
- le mauvais choix du matériau de la canalisation, en fonction de la profondeur (poussée des terres),
 - les défauts d'assemblage, joints absents ou mal placés, mauvais alignement, mauvais assemblage (ou collage) des accessoires...

Cette étude illustre et confirme l'importance du compactage sur la pérennité des canalisations, parallèlement, il est important de souligner qu'un mauvais compactage engendre également des perturbations en surface. Des couches sous-compactées provoquent des tassements se répercutant sous forme d'ornières transverses au niveau des chaussées routières.

II. LE COMPACTAGE

II.1. Définition

“Le compactage est l'ensemble des opérations mécaniques qui conduisent à accroître la densité en place d'un sol. Cette action augmente la compacité du sol, donc resserre la texture du matériau, réduit les possibilités de déformation du terrain et améliore sa capacité portante” (Costet et Sanglerat, 1981).

Il est également possible de définir le compactage comme un ensemble d'opérations permettant d'obtenir, à partir d'un matériau à l'état initial, un matériau ayant des caractéristiques appropriées aux fonctions à remplir. En effet, pour un matériau donné, l'augmentation de compacité du sol va de paire avec une augmentation de l'angle de frottement interne, de la cohésion et par conséquent de la résistance aux contraintes tangentielles, ainsi qu'avec une diminution de la compressibilité et de la perméabilité.

II.2. Signification mécanique du compactage

“Sous l'influence des charges ou surcharges roulantes qu'il subit, tout sol placé dans ou sous une chaussée a tendance à se resserrer, à se densifier, à se compacter. Il est donc préférable de le placer dans un état de densité tel que les évolutions ultérieures soient impossibles ou peu probables ou peu gênantes.” (Arquié, 1970).

Dans notre cas, la densification aura pour objectif essentiel de rendre impossible, ou très faible, le déplacement des canalisations dans la tranchée ainsi que d'éviter les tassements ultérieurs importants, surtout dans le cas de chaussées ou structures sus-jacentes.

II.3. Le compactage en laboratoire : l'essai Proctor

Les caractéristiques de compactage Proctor d'un sol sont déterminées à partir des essais dits : Essai Proctor Normal ou Essai Proctor Modifié.

Les deux essais sont identiques dans leur principe, seules diffèrent les énergies de compactage appliquées. Ces deux essais sont définis par la norme NF P 94-093.

“Le principe de ces essais consiste à humidifier un sol à plusieurs teneurs en eau et à le compacter selon un procédé et une énergie conventionnés. Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérées on détermine la masse volumique sèche du sol et on établit la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau.

D'une manière générale cette courbe, appelée courbe Proctor, présente une valeur maximale de la masse volumique du sol sec qui est obtenue pour une valeur particulière de la teneur en eau. Ce sont ces deux valeurs qui sont appelées caractéristiques de compactage Proctor Normal ou Proctor Modifié suivant [l'énergie mise en œuvre lors de] l'essai réalisé.” (NF P 94-093).

Les courbes obtenues sont de la forme :

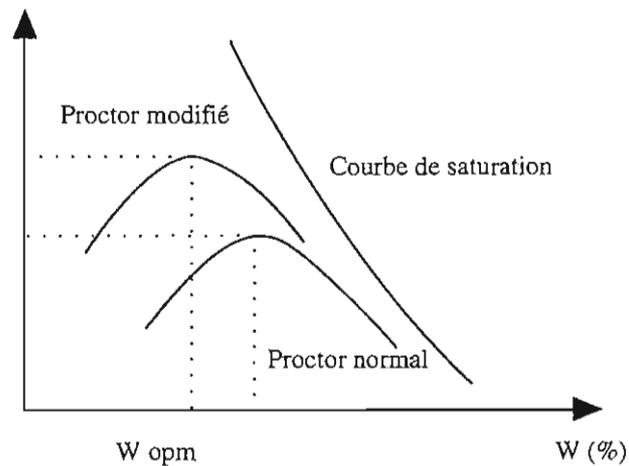


Figure 1 : Courbes Proctor pour un sol et les énergies OPN et OPM

Les densités OPN (Optimum Proctor Normal) et OPM (Optimum Proctor Modifié) sont donc des références réalisées en laboratoire pour un type de matériaux donné.

II.4. L'action des compacteurs

II.4.1. Le pétrissage

"...il y a pétrissage quand chaque partie du sol intéressé par le compactage subi plusieurs cycles de déformation (deux cycles au moins), chaque cycle comportant des déformations dans au moins deux directions différentes." (Arquié, 1970)

Il se produit au sein des matériaux à compacter des phénomènes de ponts tels qu'ils sont représentés dans la figure ci-dessous :

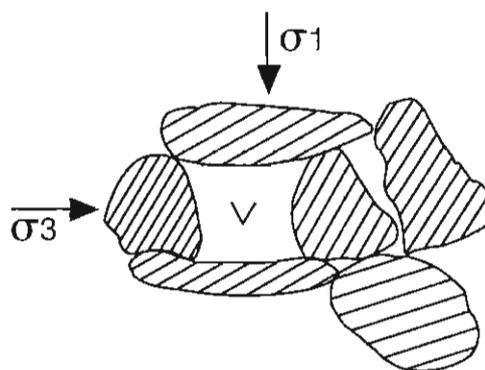


Figure 2 : Effet de pont dans un sol

Le compacteur provoque un déviateur ($\sigma_1 - \sigma_3 > 0$) lorsqu'il passe à la verticale du point M. L'effet de pont ne se brisera pas même si on augmente la valeur de ce déviateur.

Par contre, en inversant le déviateur ($\sigma_1 - \sigma_3 < 0$), cette microstructure sera rompue. Les grains de sols se mettent alors mieux en place d'où un gain de compacité.

Tout compacteur passant à la verticale d'un point M provoque la création d'un déviateur ($\sigma_1 - \sigma_3$) tel que ($\sigma_1 - \sigma_3 > 0$). Après son passage σ_3 persiste et σ_1 se réduit au poids des terres au-dessus du point M. Dans pratiquement tous les cas, la nouvelle valeur du déviateur est telle que ($\sigma_1 - \sigma_3 < 0$). Tout compacteur crée cette inversion du déviateur des contraintes, provoquant ainsi l'action de pétrissage qui améliore le compactage.

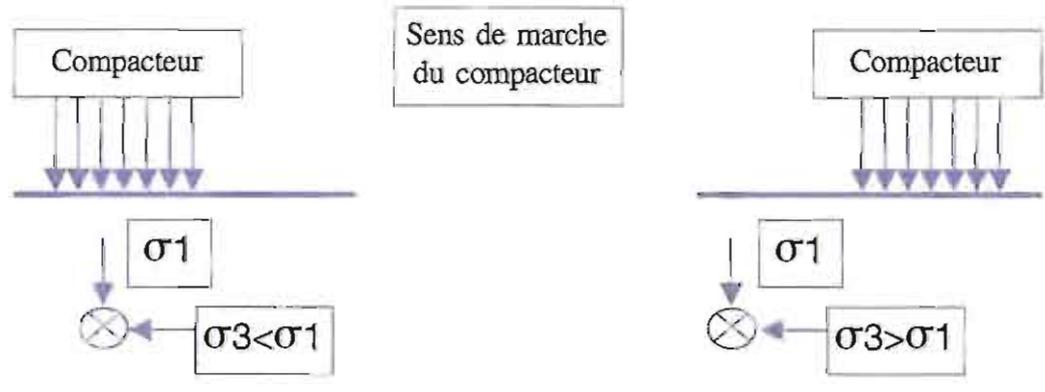


Figure 3 : Inversion du déviateur des contraintes sous l'action d'un compacteur

II.4.2. Influence de la rigidité du support

La rigidité du support de la couche à compacter influence le résultat du compactage. Il existe un effet d'enclume, c'est à dire que les résultats sont supérieurs si le support est très rigide que s'il est déformable.

III. MODALITÉS ET ENGIN DE COMPACTAGE

III.1. Les engins de compactage

Les engins de compactage ont évidemment pour objectif de provoquer artificiellement et en un temps limité, la consolidation et la densification d'un sol ou matériau.

Il existe plusieurs classes d'engins définies en fonction du procédé utilisé, de leur morphologie et leur mode d'action. La classification des différents types de compacteurs, ainsi que la terminologie et les spécifications commerciales propres à chaque type d'engins de compactage sont définies dans les normes NF P 98-736 et NF P 98-705.

La classification permet à l'entrepreneur de décider du type d'engin à utiliser et des modalités d'emploi de celui-ci en fonction des objectifs de densification à atteindre.

Dans le cas des travaux d'assainissement en tranchées, sont utilisés des engins de compactage de petites tailles. Ce sont les suivants :

- * les compacteurs, qui agissent en compression par une charge lourde roulante. Lisses ou munis de pieds dameurs, ils peuvent également être vibrants. Leur largeur n'excède pas 1,30m,
- * les plaques vibrantes, efficaces grâce à leur poids et aux vibrations qu'elles génèrent,
- * les pilonneuses vibrantes ou à percussion. Le principe de la percussion consiste à améliorer l'efficacité du compactage en augmentant la contrainte de cisaillement.

III.2. Importance des modalités de compactage sur le chantier

Afin d'atteindre les objectifs de densification désirés, deux conditions s'imposent :

- * avoir une teneur en eau ni trop forte, ni trop faible (proche de l'optimum Proctor, normal ou modifié en fonction de la densité souhaitée, à +/- 1 à 2% près),
- * mettre en œuvre des conditions de compactage efficaces.

Concernant ce second point, des tableaux de référence sont proposés dans les guides décrits au chapitre suivant ; ils définissent les modalités de mise en œuvre à respecter, à partir de la classification du matériel, de la nature du matériau et de l'objectif de densification. Ces modalités sont caractérisées par les paramètres suivants :

- * e (cm), épaisseur maximale des couches après compactage,
- * Q/L (en $m^3/h/m$), débit théorique (Q) par unité de largeur de compactage (L),
- * n , valeur du nombre de passes n à réaliser par couche,
- * V (en km/h), vitesse moyenne de l'engin.

III.2.1. Epaisseur de la couche

Il a été démontré que le degré de compactage décroît en fonction de l'augmentation de l'épaisseur quel que soit le nombre de passes. (Yoon, 1982)

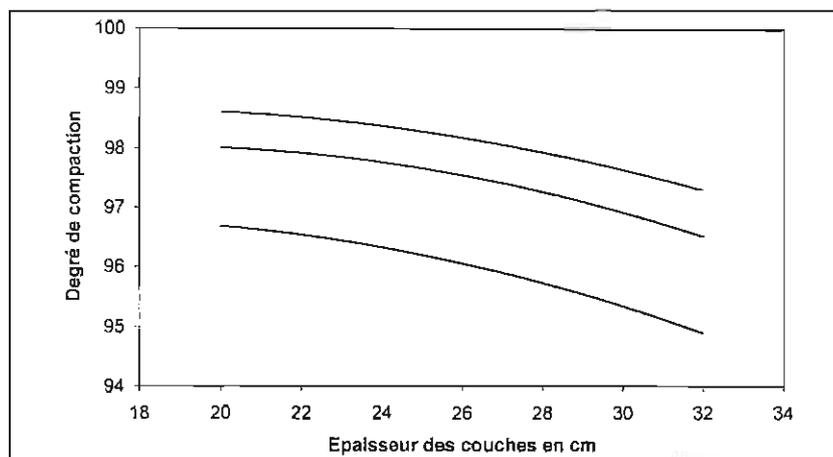


Figure 4 : Influence de l'épaisseur de la couche et du nombre de passes sur la compacité

III.2.2. Nombre de passes

C'est l'un des paramètres essentiels du mode d'emploi d'un compacteur. La densité croît avec le nombre de passes jusqu'à une certaine valeur au-delà de laquelle elle reste constante, quel que soit le nombre de passes supplémentaires (Mieusses et Puig).

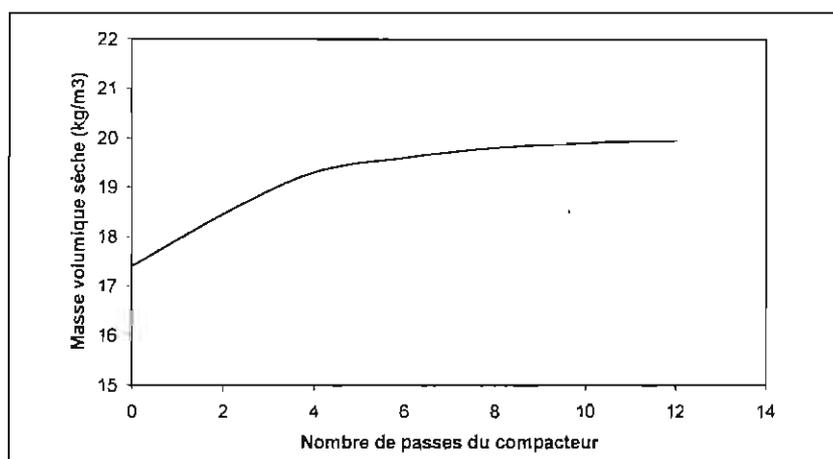


Figure 5 : Influence du nombre de passes sur la compacité

III.2.3. Vitesse de translation

Les variations usuelles de vitesse des engins correspondent à des variations de temps d'application des contraintes, donc à des variations de vitesses de compression. Une densité plus élevée dans la partie inférieure de la couche est obtenue généralement par un passage lent. Pour augmenter la densité en surface il faut rouler à la vitesse maximale en fin de compactage.

IV. MÉTHODES DE CONTRÔLE DU NIVEAU DE COMPACTAGE D'UN REMBLAI

Nous avons vu précédemment que la pérennité d'une canalisation en tranchée dépend essentiellement de l'environnement immédiat de la tranchée ainsi que de la qualité de la pose de la canalisation, et en particulier du bon compactage des matériaux de remblai.

Les exigences de qualité du compactage sont fixées par l'intermédiaire d'objectifs de densification. Il faut donc mettre en œuvre, pour le contrôle, des techniques permettant de mesurer l'état de densité du sol compacté. Les différents appareils présentés ci-après peuvent donc être employés dans cette optique, pour certains d'entre eux, ils sont aussi utilisés en reconnaissance de sol.

Nous présenterons ici les différents appareillages permettant d'accéder à la valeur de la densité du sol en place, parmi ceux-ci nous nous pencherons plus précisément sur les pénétromètres dynamiques, qui semblent représenter une alternative techniquement et économiquement intéressante pour les contrôles post-travaux.

IV.1. Contrôles en cours d'exécution des travaux

Les méthodes de mesure de la densité présentées ici, du fait d'une profondeur d'investigation limitée, ne peuvent être utilisées qu'en cours de travaux, après la mise en place de chaque couche.

IV.1.1. Méthode au cylindre

Cette méthode est définie en France par la norme NF X 31-501 (juillet 1992). Elle est également normalisée dans d'autres pays tels que la Grande-Bretagne ou les E.U.

a) Principe

Elle consiste en l'enfoncement dans le sol d'un cylindre, de paroi fine, ouvert aux deux extrémités. Le sol contenu dans le cylindre, de volume connu, est pesé avant et après dessiccation ce qui permet d'atteindre la densité sèche et la teneur en eau de la couche de matériau sondée.

b) Limites de la méthode

Cette méthode est limitée dans son utilisation aux premiers centimètres en surface correspondant à la hauteur du cylindre, ce qui oblige à ne l'utiliser que pour le suivi au cours d'un chantier. Aussi, l'enfoncement du cylindre peut être difficile voire impossible pour des matériaux trop grossiers, ceci d'autant plus que le compactage est important. La méthode n'est pas adaptée aux graves.

Par ailleurs, la mise en œuvre peut être longue et fastidieuse.

c) Précision de la méthode

La qualité de la mesure est altérée par le remaniement du sol engendré par la pénétration du cylindre qui conduit parfois à surcompacter le sol prélevé (notamment les sols fins). La valeur obtenue est souvent proche de la réalité, cependant il existe une variabilité dans la qualité de la mesure en fonction du type de sol sondé, de la teneur en eau du matériau et des conditions de réalisation.

IV.1.2. Méthode de remplacement par le sable

Comme la méthode précédente, celle-ci fait l'objet une norme française, NF P 94-061-3 (avril 1996). Elle est également normalisée par le BSI (British Standard Institution) et aux Etats-Unis.

a) Principe

Cette méthode comprend l'excavation d'un trou cylindrique avec collecte minutieuse des matériaux, dont on détermine ensuite le poids exact et la teneur en eau. Le volume du trou est obtenu à partir de la quantité de sable utilisée pour remplir complètement l'excavation. Le sable employé est uniformément gradué et de masse volumique connue avec précision.

b) Limites de la méthode

Cette méthode est préférentiellement utilisée pour des matériaux grossiers pour lesquels d'autres méthodes ne sont pas réalisables. Du fait de sa mise en œuvre, elle ne peut être utilisée que pour connaître la densité des 1 à 2 premiers décimètres de sol. Par ailleurs, il n'est pas possible de travailler sur des sols ayant peu ou pas de cohésion car les parois de l'excavation s'effondrent avant qu'il ait été possible d'effectuer la mesure. Enfin, la réalisation de l'essai est longue et donc coûteuse.

c) Précision de la méthode (Parsons, 1966)

Cette mesure est très fiable, elle fournit, selon Parsons, des résultats avec une précision de 0,7 à 2,1% en fonction de la granulométrie du sable utilisé.

Cependant, il faut signaler qu'une dérive pouvant s'élever jusqu'à 2,5% peut se produire du fait de la variation de densité induite par une modification de la teneur en eau du sable, car celui-ci a tendance à s'équilibrer avec l'humidité atmosphérique.

IV.1.3. Densitomètre à membrane

Cette méthode fait l'objet d'une norme en France (NF P 94-061-2) mais aussi dans d'autres pays comme aux E.U. et en Grande-Bretagne.

a) Principe

Le densitomètre à membrane est un appareil servant à mesurer le volume de "trous", il comprend un réservoir cylindrique rempli d'eau dont le fond est fermé par une membrane élastique. Dans le réservoir coulisse un piston étanche dont les déplacements sont proportionnels aux variations du volume extérieur de la membrane.

MÉTHODES DE CONTRÔLE DU NIVEAU DE COMPACTAGE D'UN REMBLAI

Lors de l'exécution de l'essai la surface du terrain est aplanie pour recevoir la plaque de base de l'appareil. Après une mesure du zéro, le sol à étudier est prélevé puis pesé, par la suite il sera séché de telle sorte à pouvoir calculer sa densité sèche et sa teneur en eau. L'appareil est ensuite posé sur la plaque de base et la membrane vient épouser la forme du trou réalisé. Le volume est déterminé par la différence de position de la tige entre le zéro et la mesure, position repérée grâce à une tige graduée.

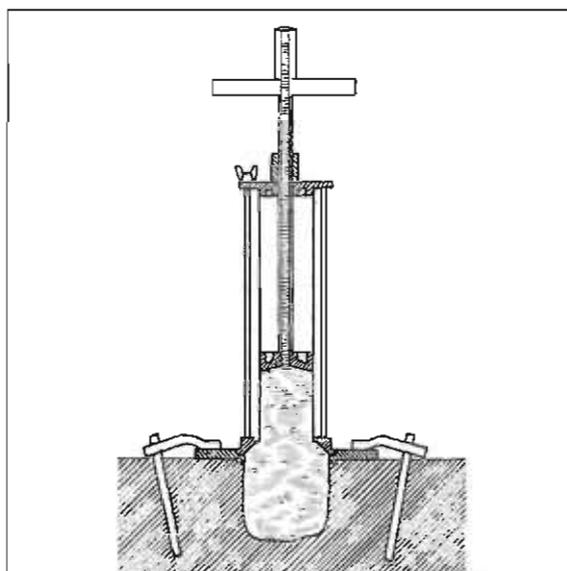


Figure 6 : Coupe schématique d'un densitomètre à membrane en place

b) Limites de la méthode

Le volume maximum de la membrane étant limité, environ 3dm³, l'utilisation du densitomètre à membrane ne peut donc se faire que pour de faibles profondeurs, généralement égales à 1,5 fois le diamètre du cylindre de l'appareil, soit 1 à 2 dm.

De même que pour les autres méthodes consistant en l'excavation d'un trou, dans le cas de matériaux ayant peu ou pas de cohésion il existe un risque d'effondrement des parois modifiant irrémédiablement la forme et donc le volume du trou.

c) Précision de la méthode

Le densitomètre à membrane fournit des résultats sous estimant de 1% le volume de l'excavation (Parsons, 1965). Ce résultat a été obtenu à partir d'une simulation d'excavation dans un moule en plastique de 100mm de diamètre et 150mm de profondeur. Par ailleurs, dans le cas de matériaux grossiers, la membrane peut ne pas adhérer parfaitement à toutes les anfractuosités des parois ce qui engendre une erreur dans la détermination du volume. Il a été mis en évidence que cette erreur peut être supérieure à 2% (Parsons, 1965).

Remarquons que cette sous estimation dans la mesure du volume, à laquelle peut s'ajouter une erreur due à l'air éventuellement piégé par la membrane au fond de l'excavation, engendre une surestimation de la valeur de la densité.

IV.1.4. Les nucléodensimètres

Ces appareils consistent en une mesure indirecte de la densité humide du sol en place. Il existe différents types de nucléodensimètres, cependant, comme leur nom l'indique, tous utilisent une source radioactive qui nécessite de multiples précautions d'emplois.

En général, ces appareils permettent également la mesure de la teneur en eau (source neutrons) ce qui permet d'accéder à la densité sèche.

a) Principe général

Le principe est basé sur le phénomène d'absorption par le sol de photons γ , d'énergie donnée, émis par une source radioactive de Cobalt (^{60}Co) ou de Césium (^{137}Cs). L'absorption des photons γ est proportionnelle à l'épaisseur du sol traversé et à sa densité. Un nombre N de photons γ émis par la source traverse le matériau sans diffusion ni absorption. Ce nombre N permet d'accéder à la densité humide du sol, avec

$$N = N_0 \cdot e^{-\mu'(\gamma x)}$$

- Où N_0 est le nombre de photons initiaux,
- μ' est le coefficient d'absorption massique, il dépend de la nature du matériau et de l'énergie des photons,
- γ est la masse volumique humide,
- x est l'épaisseur du matériau.

Ceci est le principe de base, cependant il existe deux types de nucléodensimètres :

b) Le nucléodensimètre à transmission directe

➡ *Principe*

Avec cet appareil il faut préalablement effectuer un avant-trou avec une tige et un marteau. La tige portant la source radioactive (SR) en fond extrémité est ensuite descendue dans le trou. Le détecteur (D), situé en surface, mesure le taux d'absorption des photons γ sur le trajet direct SR \rightarrow D. L'appareil donne la densité humide du sol en utilisant la formule ci-dessus. La densité sèche est accessible si la teneur en eau est mesurée.

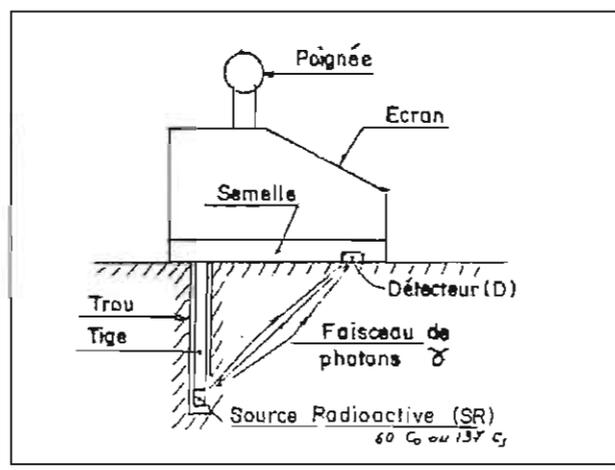


Figure 7 : Schéma de principe d'un nucléodensimètre à diffusion directe

➡ Limites de la méthode

Il existe différentes profondeurs d'investigation en fonction du modèle de nucléodensimètre utilisé, cependant, la profondeur d'investigation maximale est d'environ 50 cm (30 cm pour les modèles courants). Aussi, certains matériaux de densité trop élevée ne permettent pas la réalisation de l'avant-trou.

➡ Précision de la méthode

La précision de la méthode peut être altérée par :

- la compaction supplémentaire des matériaux autour de l'avant-trou, engendrée par l'enfoncement de la tige par battage.
- l'émission naturelle de photons γ par les éléments du sol, ce qui provoque un bruit de fond. Il faut donc apporter, dans certains cas, des corrections par rapport à la nature chimique du matériau ausculté, corrections qui sont cependant très faibles.
- les éléments grossiers qui ne permettent pas une diffusion correcte des photons gamma émis dans le sol. Dans leur cas il est recommandé d'effectuer plusieurs mesures de densités en un même point, en faisant une ou deux rotations du gamma densimètre. Cela permet d'augmenter le volume de sol mesuré par l'appareil.

De plus, les résultats obtenus avec cette méthode permettent d'obtenir la densité moyenne du matériau entre la source et la surface, et non pas la densité à une profondeur donnée. Il faut donc placer la source à la base de la dernière couche compactée.

Malgré les difficultés précitées cette méthode permet d'obtenir des résultats d'une bonne précision (au moins identique aux méthodes présentées précédemment) et avec une mise en œuvre assez rapide.

c) Le nucléodensimètre à rétro diffusion

➡ Principe

Avec cet appareil la source et le détecteur sont placés dans le même plan horizontal, le trajet des photons (n'est pas défini car plusieurs itinéraires sont possibles après réflexion des photons sur la couche périphérique des électrons entourant les atomes ("Effet Compton").

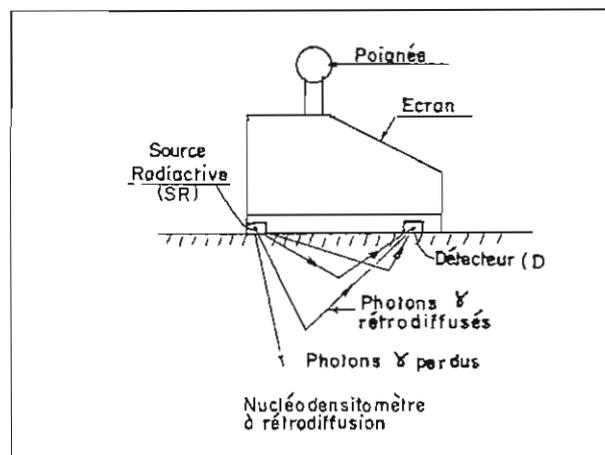


Figure 8 : Schéma de principe d'un nucléodensimètre à rétro diffusion

➔ *Limites de la méthode*

La profondeur d'investigation de cet appareil est faible, elle est limitée aux 10 à 50 premiers centimètres en surface.

➔ *Précision de la méthode*

D'emploi plus pratique que le nucléodensimètre à transmission directe, le nucléodensimètre à rétro diffusion est cependant progressivement abandonné car il est peu précis du fait de l'incertitude sur les trajectoires des photons γ .

IV.2. Contrôles après l'exécution des travaux, réception

Les méthodes d'investigation présentées dans le chapitre précédent sont limitées en profondeur et ne peuvent donc pas être utilisées en réception des travaux en fin d'exécution.

Les appareils décrits ci-dessous permettent, au contraire, de sonder en profondeur les couches compactées en les traversant. Ils sont introduits dans le sol et permettent d'effectuer des mesures de paramètres caractéristiques, à différentes profondeurs.

Il est possible de distinguer 2 types différents d'appareils de mesures :

- ceux nécessitant un forage préalable avant d'y descendre l'appareil de mesure,
- ceux ne nécessitant pas un forage préalable, la mesure est effectuée au fur et à mesure de l'enfoncement de l'appareil.

IV.2.1. Contrôles avec forage préalable : la double sonde gamma

a) *Principe*

Cet appareil est basé sur le même principe que les nucléodensimètres à transmission directe. La différence réside dans le fait que 2 forages tubés, rigoureusement parallèles, doivent être réalisés pour y descendre simultanément la source dans l'un, et le détecteur dans l'autre.

b) *Limites de la méthode*

Cette méthode conserve une précision acceptable jusqu'à 5 m de profondeur (grande précision jusqu'à 2 m), mais ne peut être utilisée au-delà. En effet, il est difficile, après 5 m, de conserver un parallélisme suffisant entre les deux forages.

Notons que la réalisation des deux forages tubés strictement parallèles nécessite une mise en œuvre minutieuse et augmente donc considérablement le temps de contrôle, ce qui en fait une méthode trop coûteuse pour la réception des travaux de compactage des chantiers.

c) *Précision de la méthode*

La précision de cette méthode est très bonne jusqu'à 2 m de profondeur (meilleure que celle du nucléodensimètre à transmission directe). De fait, elle est utilisée pour étalonner les autres appareils de mesure in situ de la densité, pour régler certains contentieux concernant les chantiers importants lorsque la précision des autres appareils de contrôle est mise en doute ou encore dans le cadre d'expertises faisant suite à des anomalies constatées.

IV.2.2. Contrôles sans forage préalable

Les appareils permettant un contrôle sans forage préalable sont les pénétromètres. Leur principe de fonctionnement consiste en l'enfoncement d'une pointe dans le sol par l'intermédiaire d'un train de tiges. La résistance du sol à cet enfoncement est enregistrée et analysée comme valeur caractéristique représentative de la densité du sol. Il existe 2 types de pénétromètres différenciés par leur mode d'enfoncement de la pointe : les pénétromètres statiques et les pénétromètres dynamiques.

a) Les pénétromètres statiques

Ils font l'objet d'une norme française (NF P 94-113, octobre 1989) dans le cadre de la reconnaissance des sols.

➔ Principe

“L'essai de pénétration statique consiste à enfoncer dans le sol, à vitesse constante, un train de tiges terminé par une pointe munie d'un cône en partie inférieure et à mesurer, de manière continue, à intervalles de profondeurs déterminés, la résistance à la pénétration de ce cône.

On peut également mesurer : l'effort total de pénétration, l'effort de frottement sur un manchon de frottement situé au-dessus du cône et la pression interstitielle développée au niveau d'un filtre de même diamètre extérieur que la partie cylindrique du cône.” (NF P 94-113, octobre 1989)

➔ Limites de la méthode

Le chargement statique nécessite l'utilisation de vérins puissants ainsi que le poids d'un camion (ou éventuellement de solides ancrages) pour rendre possible la pénétration de la pointe ; ceci peut interdire l'accès du pénétromètre statique à certains sites de sondage. La norme NF P 94-113 spécifie que “ l'essai de pénétration statique s'applique à tous les sols fins et aux sols grenus dont la dimension moyenne des éléments ne dépasse pas 20mm “, ce qui peut présenter une limite d'utilisation dans certains cas de travaux.

➔ Précision de la méthode

Cette méthode permet l'enregistrement de paramètres en continu ; il est ainsi possible d'apprécier la succession des différentes couches de terrain.

Par ailleurs, il est difficile de juger de la qualité éventuelle des résultats fournis par le pénétromètre statique concernant la vérification du niveau de compactage d'un remblai. Il n'existe que très peu de résultats relatifs à une utilisation dans le domaine du contrôle de compactage.

b) Les pénétromètres dynamiques

Les pénétromètres dynamiques font partie de cette catégorie d'appareils permettant un contrôle après exécution des travaux et sans forage préalable. Leurs caractéristiques seront développées en détail ci-dessous.

IV.3. Les pénétromètres dynamiques

Parmi les différents appareils de contrôle du compactage il semble que seuls les pénétromètres dynamiques soient en mesure de proposer un contrôle rapide et efficace pour la totalité de l'épaisseur des remblais. C'est pourquoi ils nous intéressent particulièrement et font l'objet de la présente étude.

IV.3.1. Définition

L'essai de pénétration dynamique est un essai géotechnique qui teste le terrain en place et fournit, en tant que tel, une caractéristique du sol dénommée résistance dynamique de pointe. Il consiste à mesurer, selon la procédure propre à chaque type de pénétromètre dynamique, l'enfoncement d'une pointe soumise, par l'intermédiaire d'un train de tige, à une énergie de battage.

Remarque : La résistance dynamique de pointe ne doit pas être confondue avec la résistance à la pénétration mesurée à l'aide d'un pénétromètre statique.

IV.3.2. Les deux grands types de pénétromètres dynamiques

On distingue deux grandes catégories de pénétromètres dynamiques, différenciés par le mode d'application de l'énergie au train de tige : ce sont les pénétromètres dynamiques à énergie constante et les pénétromètres dynamiques à énergie variable.

➔ Les pénétromètres dynamiques à énergie constante

Ce sont les plus courants à l'heure actuelle. L'énergie est fournie au train de tige à l'aide d'un mouton tombant d'une hauteur déterminée et donc avec une énergie constante.

L'énergie E , transmise au train de tige est donc :

$$E = M.g.H$$

où **E** est l'énergie fournie au train de tige en Joule (= N.m),
M est la masse du mouton, exprimée en Kg,
g est l'accélération de la pesanteur, considérée comme constante et égale à $9,81 \text{ m.s}^{-2}$,
H est la hauteur de chute du mouton, en mètre.

➔ Les pénétromètres dynamiques à énergie variable

Dans le cas de ces appareils l'énergie est fournie au train de tige par l'intermédiaire d'un marteau de masse connue. La vitesse de celui-ci au moment de l'impact est connue grâce à un capteur. L'énergie est donc :

$$E = \frac{1}{2}.M.V^2$$

où **E** est l'énergie transmise au train de tige, exprimée en Joules,
M est la masse du marteau, en Kg,
V est la vitesse d'impact du marteau, en mètres par seconde.

IV.3.3. La formule de battage

Une formule de battage permet de calculer la résistance dynamique que le terrain oppose à l'enfoncement de la pointe. De nombreuses formules de battage ont été établies, soit sur des bases théoriques soit à partir de données purement expérimentales. Les résultats qu'elles fournissent peuvent être assez divergents. En fait, les formules de battage tentent de se rapprocher des valeurs mesurées au pénétromètre statique, leur but est de déterminer la force équivalente statique qui conduirait à la même valeur d'enfoncement.

Les formules aux bases théoriques expriment une équivalence entre le travail du mouton et le travail des forces résistantes du sol qui s'opposent à l'enfoncement du pieu. La formule des Hollandais, généralement utilisée, entre dans ce cas de figure. Elle s'appuie sur la théorie de la percussion pour laquelle le travail total du mouton, diminué du travail perdu pendant le choc (par déformations élastiques essentiellement), est égal au produit de la résistance opposée au mouvement par la valeur de l'enfoncement sous l'effet du coup de mouton.

a) Définition

La valeur de la résistance dynamique de pointe, q_d , est donnée conventionnellement par la formule de battage des Hollandais :

$$q_d = \frac{E}{S \cdot e} \cdot \frac{m}{m + m'}$$

- où
- q_d** est la résistance dynamique unitaire de pointe, exprimée en Pascal,
 - E** est l'énergie de battage transmise au train de tige, elle est obtenue différemment selon que l'appareil est à énergie constante ou variable,
 - S** est l'aire de la section droite de la pointe, exprimée en mètres carrés,
 - e** est l'enfoncement par coup en mètres,
 - m** est la masse du mouton en kilogrammes, ou masse battante,
 - m'** est la masse cumulée dite aussi masse battue, exprimée en kilogrammes, elle correspond à la somme des masses de l'enclume, du train de tige et de la pointe.

Remarque : L'unité de référence est, à l'heure actuelle, le Pascal. Les valeurs de résistance de pointe peuvent être exprimées en Méga Pascal (MPa = 10⁶Pa). Cependant, le bar (1bar = 10⁵Pa) reste encore très utilisé. Ainsi pour obtenir le résultat directement dans cette unité on introduit dans la formule de battage la hauteur de chute du mouton en cm, l'enfoncement par coup en mm et l'aire de la section transversale de la pointe en cm².

b) Les imprécisions de la formule de battage "des Hollandais"

Comme cela a été précisé précédemment il est difficile de traduire, à travers une formule de battage, tous les phénomènes se produisant lors d'un essai de pénétration dynamique. La formule des Hollandais présente donc quelques imprécisions.

- * La perte d'énergie survenant le long de l'appareil - aux jonctions entre les tiges, à la liaison entre la pointe et les tiges pour les pointes perdues, par vibration ou flambement du train au moment du choc - est retranscrite dans la formule des Hollandais grâce au terme $(m/m+m')$. Bien sûr ce terme est inférieur à 1 et diminue au fur et à mesure où des éléments sont ajoutés.

La perte d'énergie due au choc répond à des phénomènes complexes, ce terme simplifié de la formule ne représente certainement pas la réalité mais il a été jugé satisfaisant.

- * L'enfoncement de la pointe correspondant à un coup de mouton est en fait sous-estimé. En effet, en considérant que la pointe du pénétromètre est soumise à une force statique croissante jusqu'au poinçonnement et déchargée ensuite, la courbe effort-déformation suivante est obtenue :

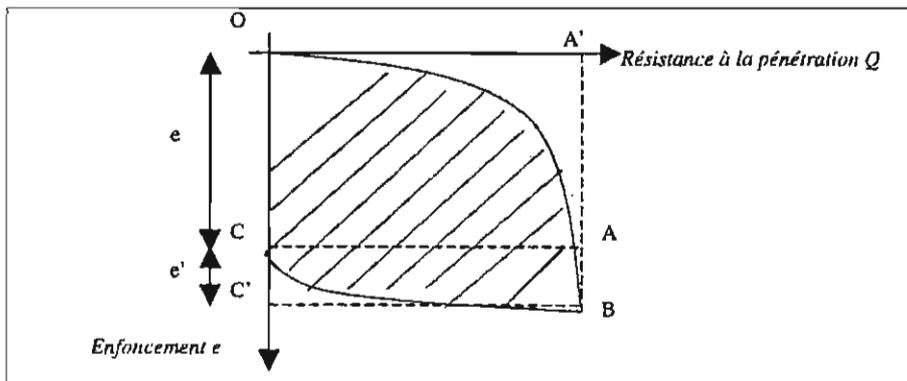


Figure 9 : Relation entre la résistance à la pénétration et l'enfoncement

A chaque coup de mouton, l'énergie transmise est égale à l'aire (OABC). Pour simplifier, cette aire est assimilée à celle de (OA'AC) plus celle du triangle ABC.

Cette énergie vaut donc :

$$E = qd \cdot \left(e + \frac{e'}{2} \right)$$

et est égale à l'énergie fournie par le mouton diminuée de la perte d'énergie due au choc ΔE .

Si l'on considère e' , qui caractérise le refus élastique du sol, la formule de battage s'écrit alors :

$$qd = \frac{E}{s \cdot \left(e + \frac{e'}{2} \right)} \cdot \frac{m}{m + m'}$$

En pratique il apparaît peu évident, voire impossible, de mesurer efficacement cette valeur. Avec la formule des Hollandais, où e' est tout simplement négligé, le terme de pointe est donc surestimé.

- * La forme de la pointe joue un rôle important sur la façon dont le sol sera sollicité lors de la pénétration. Pour pénétrer dans le sol, la pointe doit vaincre une résistance verticale et latérale (dépendant des caractéristiques intrinsèques C et φ du sol) dont la répartition dépend de la forme de la pointe, en particulier de l'angle au sommet du cône (α). Il existe différents angles de cône, les plus courants sont de 30° , 60° et 90° . Avec un cône très pointu ($\alpha=30^\circ$) la pénétration est facilitée mais le frottement latéral est plus important. C'est le contraire si $\alpha=90^\circ$.

L'importance de l'angle de pointe sur la valeur de la résistance de pointe est conséquente, il est donc regrettable que ce paramètre ne soit pas pris en considération dans la formule de battage des Hollandais qui est celle couramment utilisée. Au moins, il serait souhaitable que la valeur de l'angle soit constant pour tous les appareils. C'est le cas pour les pénétromètres normalisés utilisés en contrôle de compactage.

Remarque : Il existe d'autres formules de battage que celle des Hollandais, cependant "selon Caquot, c'est celle qui s'écarte le moins de la réalité, pourvu que l'on tienne compte du raccourcissement élastique du pieu ou du pénétromètre au cours du battage" (Sanglérat, 1965).

IV.3.4. Limites et difficultés liées à l'utilisation des pénétromètres dynamiques

a) Le frottement latéral

Afin de neutraliser le frottement latéral qui se développe le long du train de tige, les pénétromètres sont équipés de pointes débordantes, c'est-à-dire de diamètre supérieur à celui des tiges. Cependant, ces pointes débordantes présentent deux inconvénients :

- * un frottement parasite peut subsister dans le cas d'éboulement (sol pulvérulent ou peu cohérent) ou de resserrement du trou (sol cohérent),
- * la difficulté d'extraire le train de tiges si le terrain s'est éboulé, la solution consiste alors en l'utilisation de "pointes perdues" c'est-à-dire non solidaires du train de tiges et que l'on laisse au fond du trou à la fin du sondage.

Il est possible de diminuer de façon très importante ce frottement latéral parasite grâce à l'emploi de boue bentonitique injectée dans le forage et qui joue un rôle de lubrifiant entre le train de tige et les parois du forage.

Cependant, il est important de préciser que ce frottement parasite ne survient qu'au-delà d'une certaine profondeur, variable en fonction du matériau. Ainsi, dans le cas du contrôle de compactage en tranchée, du fait de profondeurs de sondage très faibles (3-4 m maximum), le frottement latéral peut être supposé inexistant, dans la plupart des cas, par la simple utilisation d'une pointe débordante.

b) La taille des éléments du matériau sondé

Les erreurs sur la résistance de pointe sont les plus grandes dans le cas de matériaux très fins où le frottement latéral est prédominant et où les écarts entre densité et portance (indice CBR) sont les plus importants.

Aussi, les pénétrogrammes deviennent aléatoires dans le cas de matériaux de remblayage contenant de gros éléments ($D > 100$ mm), faussant les résultats et même pouvant rendre impossible l'enfoncement si la pointe vient buter sur un bloc rocheux.

c) La teneur en eau des sols

Les sols peuvent voir la valeur de leurs caractéristiques intrinsèques évoluer en fonction de la teneur en eau. Ainsi, pour un même état de densité la réponse fournie par un pénétromètre dynamique sera variable en fonction de la teneur en eau. Dans quelle mesure la résistance de pointe est-elle influencée par la teneur en eau ? Cela reste à déterminer, on peut cependant supposer que cette influence est plus importante dans le cas de sols cohérents, matériaux peu utilisés dans le cas de tranchées d'assainissement. La nature et la teneur en eau du matériau jouent donc un rôle loin d'être négligeable sur la valeur de la résistance de pointe.

d) Cas des sols immergés

Dans le cas de sols immergés, et essentiellement ceux qui sont peu perméables, l'énergie de battage peut se transmettre à l'eau interstitielle, augmentant ainsi instantanément la résistance au cisaillement.

e) *Fréquence du battage*

Lors de l'essai il est important de prendre en considération la fréquence du battage. En effet, il est conseillé de garder une fréquence à peu près constante. Aussi, faut-il rester en deçà de 50 coups par minutes, au-delà débute le domaine de la vibropercussion où les formules adoptées ici ne sont plus applicables.

f) *Le reflux du sol sous la pointe*

Il est possible que le sol reflue autour de la pointe débordante et se détende au-dessus de celle-ci. Bien sûr, ce phénomène altère la qualité de la mesure. En effet, la présence du vide au-dessus de la pointe débordante offre au sol une "issue de secours", ce qui modifie la valeur de la résistance de pointe. Ceci pourrait bien sûr être évité en utilisant une pointe non débordante, cependant cela engendrerait une erreur bien plus grande du fait du frottement latéral. Une solution consisterait en l'utilisation, au-dessus de la pointe, d'un manchon indépendant de la pointe qui empêcherait ce mouvement. Malgré tout, ce phénomène influe peu sur le résultat final et reste rare dans le cas de matériaux généralement utilisés en remblayage de tranchées.

g) *La capacité de pénétration de l'appareil*

La capacité de pénétration d'un pénétromètre destiné à vérifier le degré de compactage varie en fonction des caractéristiques techniques de l'appareil. En effet, si l'efficacité est trop forte, il pénétrera trop rapidement dans le sol et le contrôle manquera de précision. Si l'efficacité est trop faible, le contrôle sera lent, voire impossible si les sols sont trop compacts.

Notons que l'efficacité de l'appareil dépend de l'énergie de battage mise en œuvre, de la surface spécifique de la pointe et de l'angle du cône. Ces paramètres doivent donc être judicieusement choisis en fonction du contexte de mise en œuvre.

h) *Difficultés liées à la présence de la canalisation pour le contrôle de compactage en tranchées*

Soulignons ici que l'utilisation d'un pénétromètre dynamique pour vérifier l'état de compactage en tranchées peut représenter un risque pour la canalisation. En effet, si la position du sondage par rapport à la canalisation est mal établie, le sondage peut détériorer voire percer la canalisation. Soulignons également que le pénétromètre dynamique, comme toutes les méthodes de sondage à posteriori ne permettent pas le contrôle du compactage sous la canalisation. Le suivi du chantier reste donc important pour compléter l'expertise.





CHAPITRE II

NORMES ET GUIDES TECHNIQUES

I. LES GUIDES TECHNIQUES

“La normalisation a pour but de fournir des documents de référence [les normes] comportant des solutions à des problèmes techniques et commerciaux concernant les produits, biens et services, qui se posent de façon répétée dans des relations entre partenaires économiques, scientifiques, techniques et sociaux” (Décret 84-74).

Une norme se présente la plupart du temps comme une évidence technique et scientifique mais il serait faux de la considérer ainsi. En effet, toute norme est le fruit complexe d'un consensus entre les différents acteurs du marché.

Dans le secteur de la géotechnique, la rédaction de normes est relativement récente et date des années 1980. L'avancée des travaux y est très variable suivant qu'il s'agit de la normalisation française, européenne ou internationale.

En France le contrôle de compactage fait l'objet ou s'appuie sur quelques documents de références exposés brièvement ci-dessous.

I. LES GUIDES TECHNIQUES

Les guides techniques sont établis par des spécialistes qui se basent, pour la rédaction de ces documents, autant sur leurs connaissances scientifiques que sur leur expérience du milieu. Les guides techniques constituent le plus souvent un support de travail pour les maîtres d'ouvrages, les maîtres d'œuvre et les entrepreneurs lors de la réalisation de travaux ou pour la définition du cahier des charges.

Dans le cas des travaux de remblayage en tranchées deux documents sont souvent utilisés, le guide technique “Remblayage des tranchées et réfection des chaussées” et le guide technique “Réalisation des remblais et des couches de forme” (aussi appelé Guide des Terrassements Routiers ou GTR) utilisé notamment pour la classification des sols. Parallèlement à ces deux guides définissant les modalités pratiques de compactage, il convient de citer le guide technique d'accréditation COFRAC dédié au contrôle de ce compactage. Ces 3 documents sont présentés ci-après.

I.1. Le Guide des Terrassements Routiers

Le GTR constitue le principal outil méthodologique permettant de traiter de manière rationnelle les aspects techniques essentiels liés à l'étude des projets, la rédaction des marchés et la conduite des travaux de construction des remblais et des couches de forme.

L'introduction du document précise qu'il comprend 4 volets essentiels :

- * l'établissement d'une classification spécifique des sols, définissant différentes classes, dont chacune rassemble des sols présentant un comportement suffisamment similaire pour qu'il soit justifié de leur appliquer les mêmes modalités de mise en œuvre, en remblai d'une part ou en couche de forme d'autre part. Cette classification fait l'objet d'une norme à part entière, la NF P 11-300.
- * l'énoncé des modalités de mise en œuvre propres à chaque classe de matériau, suivant l'utilisation concernée : remblai ou couche de forme,
- * la traduction en termes quantitatifs, directement utilisables en tant que spécification, des modalités pratiques d'exécution du compactage applicable aux remblais et aux couches de forme,
- * les procédures et les techniques de contrôle propres à la réalisation des remblais et des couches de forme.

La partie qui nous intéresse particulièrement ici est celle qui décrit les méthodes de classification des sols en fonction de leur nature et de leur teneur en eau. Cette classification est la base de l'interprétation des pénétrogrammes utilisés en contrôle de compactage.

I.2. Le Guide Technique "Remblayage des tranchées et réfection des chaussées"

I.2.1. Objectif du document

L'objectif de ce document est de répondre aux cas de compactage non répertoriés dans les documents habituels de terrassement, en particulier les travaux réalisés avec des petits matériels de compactage, et d'inciter dans la mesure du possible à réutiliser les matériaux extraits.

Le guide technique sur le remblayage des tranchées intègre donc :

- le GTR, qui répertorie de façon plus précise les différentes classes de matériaux,
- une définition rigoureuse du compactage, qui prend en compte la densité moyenne et en fond de couche,
- les techniques de réfection de chaussée,
- le classement du parc des matériels de compactage,
- l'évolution des techniques de contrôle, en particulier les contrôles pénétrométriques,
- les matériels et les techniques de compactage des tranchées étroites.

Aussi, l'objectif du document est de donner des solutions techniques :

- sur le choix des objectifs de densification en fonction des cas types,
- sur le compactage en fonction des objectifs de densification, des matériaux et du matériel,
- sur le choix des réfections de chaussées en fonction de la structure existante,
- sur la mise en place de l'assurance qualité.

I.2.2. Les objectifs de densification

Les objectifs de densification sont fixés en fonction de l'implantation de la tranchée, du rôle des différentes couches et de la qualité des matériaux considérés pour chacune de ces couches. Les objectifs q_1 et q_2 sont définis dans la norme NF P 98-115, et les objectifs q_3 et q_4 sont définis dans la norme NF P 98-331.

Pour une couche donnée, il convient de respecter deux critères, une valeur minimale de masse volumique moyenne (ρ_{dm}), et une valeur de masse volumique en fond de couche (ρ_{dfc}). La masse volumique en fond de couche est par définition celle existant à 4cm au-dessus de l'interface avec la couche sous-jacente.

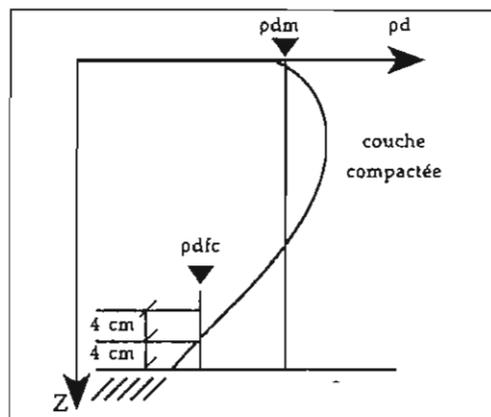


Figure 10 : Variation de la masse volumique sèche sur la hauteur de la couche compactée

On distingue, par ordre d'exigence croissante, les objectifs de densification ci-après, qui ont servi à l'élaboration des tableaux de compactage. Ces objectifs sont définis en fonction de ρ_{dOPN} (densité sèche à l'Optimum Proctor Normal) ou ρ_{dOPM} (densité sèche à l'Optimum Proctor Modifié).

Objectif de densification q4 : Il s'applique aux parties inférieures de remblai et aux parties supérieures de remblai non sollicitées par des charges lourdes, ainsi qu'à la zone d'enrobage (sauf stipulations particulières).

$$\rho_{dm} = 95\% \rho_{dOPN}$$

$$\rho_{dfc} = 92\% \rho_{dOPN}$$

Objectif de densification q3 : Il s'applique aux parties supérieures de remblai subissant des sollicitations dues à l'action du trafic et à la couche sous la surface dans les cas sans charges lourdes.

$$\rho_{dm} = 98,5\% \rho_{dOPN}$$

$$\rho_{dfc} = 96\% \rho_{dOPN}$$

Objectif de densification q2 : Il s'applique aux couches d'assises de chaussées.

$$\rho_{dm} = 97\% \rho_{dOPM}$$

$$\rho_{dfc} = 95\% \rho_{dOPM}$$

Objectif de densification q1 : Le niveau de densification q1 n'est pas réalisable avec les petits matériels de compactage utilisés dans les travaux de remblayage des tranchées d'assainissement.

Remarque : Des réflexions sont actuellement menées pour définir un objectif de densification q5.

Le remblai ne nécessite pas le même objectif de compactage sur toute sa hauteur, ni du reste les mêmes précautions de mise en œuvre.

En effet, le fond de la tranchée est compacté avec deux passes de compacteur approprié et l'enrobage de la canalisation est réalisé avec des matériaux non susceptibles d'être entraînés hydrauliquement. Le lit de pose et la zone d'enrobage doivent atteindre l'objectif de densification q4 sauf spécifications particulières. Aussi, il existe des distances minimums entre le compacteur et la canalisation, définies en fonction de l'efficacité du compacteur. L'épaisseur de la première couche doit donc être adaptée en fonction de cette distance minimum.

Un certain nombre de cas types sont décrits en fonction de la sollicitation du remblai en surface (surtout dépendante du trafic routier).

Cas type I : relatif aux tranchées sous chaussées essentiellement.

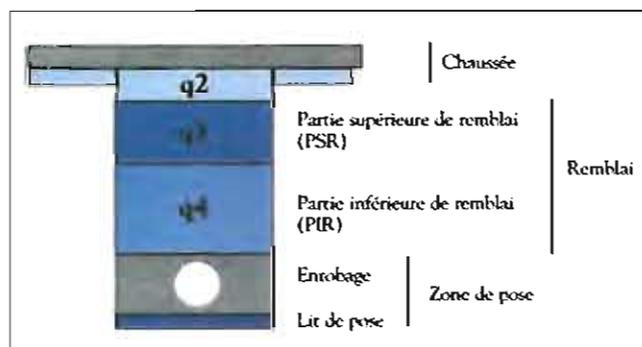


Figure 11 : Cas type I, distribution verticale des objectifs de densification dans le cas d'une tranchée sous chaussées

L'épaisseur de la structure de chaussée, dans l'hypothèse où elle est refaite à l'identique, est majorée de 10% du fait de l'impossibilité d'atteindre q_1 avec les petits matériels de compactage.

Cas type II : relatif aux tranchées sous trottoir.

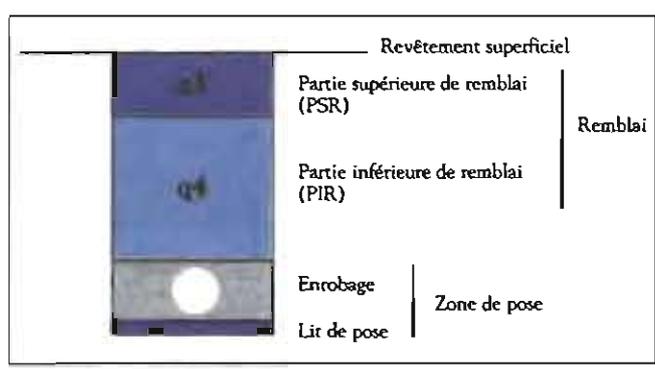


Figure 12 : Cas type II, distribution verticale des objectifs de densification dans le cas d'une tranchée sous trottoir

La structure du trottoir comporte :

- dans le cas de trottoir non revêtu, au minimum 0,15m de grave bien graduée de bonne portance compactée en qualité q3,
- dans le cas de trottoir revêtu, une reconstruction identique à l'existant.

Cas type III : relatif aux tranchées sous accotement.

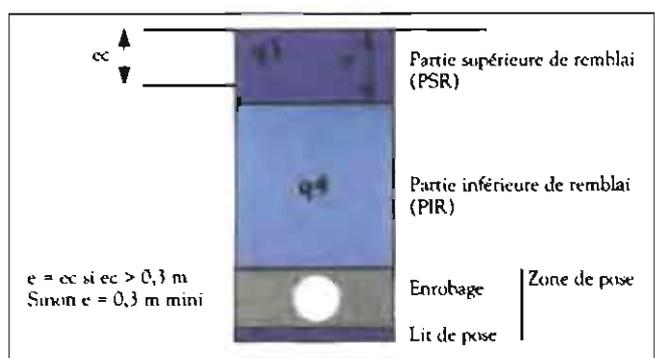


Figure 13 : Cas type III, distribution verticale des objectifs de densification dans le cas d'une tranchée sous accotement

La partie supérieure de remblai est réalisée avec un objectif de densification q_3 sur une épaisseur (e) équivalente à celle de la chaussée (e_c) mais toujours avec un minimum de 0,3m. Les conditions relatives à l'enrobage et à la partie inférieure de remblai (q_4) sont applicables.

Remarque : Les endroits autres que les chaussées, pour lesquels il semble logique de prendre en compte l'influence de charges lourdes (trottoir au droit de sorties de cour, bande d'arrêt d'urgence ou parfois accotements) sont à rattachés au cas type I.

1.2.3. Matériaux

La réutilisation des sols extraits nécessite :

- ✦ que le matériau extrait soit identifié, si possible avant le lancement du chantier, et dans tous les cas avant le réemploi,
- ✦ qu'il soit utilisable pour l'objectif de densification retenu (nature, état),
- ✦ que le matériau présente une certaine homogénéité, aussi bien dans le sens vertical que dans le sens horizontal afin de prescrire des conditions de compactage réalistes.

Les matériaux sont désignés conformément à l'appellation de la classification (norme NF P 11-300) et du GTR. Ils doivent par ailleurs satisfaire certaines conditions :

- ✦ les matériaux dont le D_{max} (dimension des plus gros éléments) est supérieur au tiers de la largeur de la tranchée ne seront pas utilisables ;
- ✦ les matériaux dont le D_{max} est supérieur aux deux tiers de l'épaisseur de la couche élémentaire autorisée pour le cas de compactage ne seront pas utilisables ;
- ✦ les matériaux gelés sont à exclure ;
- ✦ les matériaux gélifs, lors de travaux sous chaussées, trottoirs, ou accotements, sont à exclure lorsque la protection au gel apportée par les matériaux de chaussées n'est pas suffisante ;
- ✦ les sous-produits industriels ne seront utilisés qu'après une étude particulière ayant démontré leur non-nocivité vis à vis de l'environnement.

En conséquence de ces recommandations, les matériaux rocheux sont rarement utilisables tels quels en tranchée, du fait du critère D_{max} , ces matériaux nécessitent souvent une élaboration (concassage, écrêtage, criblage...). Il est courant d'avoir recours à des matériaux élaborés provenant de carrières (0/40 ; 0/80 ; ...) pour lesquels la classification de la NF P 11-300 apparaît peu adaptée.

Dans ce cas les matériaux sont classés en fonction de leur difficulté de compactage qui sont mentionnées par les termes DC_1 , DC_2 , DC_3 ; cela correspond à des niveaux de difficulté croissants mentionnés D_1 , D_2 , D_3 par la norme NF P 98-231.2 et dans la liste d'aptitude des matériels de compactage. Cette modification de terminologie permet de ne pas confondre avec les sols D_1 , D_2 , D_3 de la norme NF P 11-300.

La difficulté de compactage est liée aux caractéristiques d'un matériau, en particulier son indice de concassage, et génère des conditions de compactage différentes.

Les matériaux présentant une grande facilité de compactage sont composés de grains arrondis avec une granulométrie étendue. Les sols types correspondant à cette description sont des graves, elles sont fréquentes sous forme d'alluvions mixtes naturelles dans le lit majeur des rivières, c'est ce que l'on appelle le "tout-venant". Ce type de sol, facilement compactable, présente une difficulté de compactage notée DC_1 . D'autres sols contiennent des éléments de granulométrie comparable avec quelques grains anguleux qui se mettent difficilement en place. Ils ont un indice de concassage plus élevés que précédemment et présentent une difficulté de compactage de type DC_2 . Enfin, des sols sont constitués en grande majorité de grains anguleux peu mobiles sous l'action d'une pression extérieure. Leur difficulté de compactage est classée en DC_3 . Pour un même niveau d'énergie la mise en place des grains devient encore plus difficile.

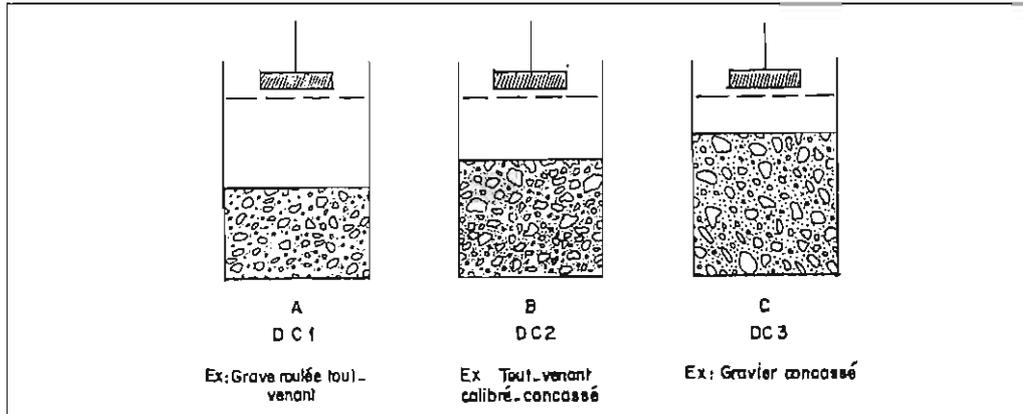


Figure 14 : Différentes difficultés de compactage en fonction de la composition de sols

Il faut différencier les notions de difficulté de compactage et les notions de stabilité ou de résistance mécanique pour un matériau donné. En effet, un matériau entièrement concassé sera plus difficile à compacter mais permettra d'obtenir de meilleures résistances mécaniques.

Par ailleurs, le guide technique précise également quels sont les compacteurs utilisables pour atteindre tel ou tel objectif de densification.

1.2.4. Réfection des chaussées

Le guide technique "Remblayage des tranchées et réfection des chaussées" indique les conditions de réfection des chaussées en fonction des conditions de trafic. Nous n'aborderons pas cet aspect dans le cadre de la présente étude.

1.2.5. Compacteurs

La classification des différents types de compacteurs, ainsi que la terminologie et les spécifications commerciales propres à chaque type d'engins, sont définies dans les normes NF P 98-736 et NF P 98-705. Le classement réalisé n'est représentatif que du seul critère d'efficacité du compactage et ne prend pas en considération la "traficabilité" des engins, la sécurité, la "manoeuvrabilité" ou la fiabilité mécanique des matériels.

Les matériels utilisés pour effectuer le compactage en tranchée sont limités par leur taille du fait de l'espace de travail restreint. Par voie de conséquence, ils ont également des efficacités de compactage limitées. Cependant, du fait de la présence de la canalisation il n'est pas possible d'employer des compacteurs trop "lourds" car les risques d'endommager la canalisation seraient alors importants.

Pour les travaux en tranchée on distingue donc :

- * les compacteurs vibrants de largeur de compactage inférieure à 1,30m (PVi) (rouleaux lisses ou à pieds dameurs),
- * les plaques vibrantes (PQi),
- * les pilonneuses vibrantes et à percussion (PNi et PPi),
- * les matériels spécifiques : plaques vibrantes pour tranchées étroites (largeur inférieure à 0,30m) et les plaques vibrantes et marteaux hydrauliques montés sur porteur (pelles, etc...). Ces derniers font l'objet d'une fiche technique individuelle.

L'indice i est utilisé pour différencier les matériels en fonction de leur efficacité, elle-même définie à partir des caractéristiques techniques de l'appareil :

- pour les compacteurs vibrants, le rapport largeur/masse linéique,
- pour les plaques vibrantes, la pression statique sous la semelle,
- pour différencier les pilonneuses vibrantes ou à percussion, la fréquence et la largeur de la semelle :
 - pour les pilonneuses vibrantes : semelle inf. à 10cm et fréquence sup. à 10Hz,
 - pour les pilonneuses à percussion, semelle sup. à 10cm et fréquence inf. à 10Hz.

1.2.6. Modalités de compactage

Ce guide technique présente des tableaux de compactage qui traitent de l'ensemble des cas définis par :

- la classe du matériau à compacter (nature et état),
- la classe du matériel de compactage retenu,
- l'objectif de densification.

Ils fournissent notamment les modalités pratiques de réalisation du compactage, au moyen de 4 paramètres :

- l'épaisseur maximale des couches après compactage (e),
- le débit théorique par unité de largeur de compactage (Q/L),
- le nombre de passes (n) à réaliser par couche,
- le tout à une vitesse moyenne donnée (V) du compacteur.

Le débit théorique sert de façon pratique à l'entrepreneur pour gérer la vitesse d'avancement des travaux.

Il convient de noter que, dans l'hypothèse de la réutilisation d'un matériau extrait de la tranchée, il est nécessaire que celui-ci présente une bonne homogénéité. Dans le cas de matériau d'apport, la détermination et le contrôle des caractéristiques de ce dernier sont également indispensables.

1.2.7. Assurance qualité

Une partie de ce chapitre est consacrée aux méthodes de contrôle après les travaux. Ainsi, une présentation du PDG 1000 et de son principe d'utilisation sont spécifiés, de même pour le gamma densimètre (limité aux premiers décimètres), la double sonde gamma, (lourde d'utilisation) et le contrôle à la dynaplaque, qui ne permet de vérifier que la portance de la partie supérieure et non le bon compactage du remblai. Cet essai est utile pour le trafic mais pas pour la stabilité de la canalisation.

1.3. Le Guide Technique d'Accréditation COFRAC "Contrôle de compactage par la méthode au pénétrromètre dynamique"

"Ce document concerne l'ensemble des organismes accrédités en contrôle de compactage pour la réception des réseaux d'assainissement neufs, ou candidats à une accréditation pour ce domaine, les experts techniques, les membres du comité d'inspection et toute personne intéressée par l'objet de ce document."

"Il consiste en un guide technique des pratiques applicables dans le domaine des contrôles de compactage des remblais en tranchée par la méthode au pénétromètre dynamique.

Ce guide technique est utilisé en complément des autres documents d'accréditation pour la réception des travaux d'assainissement."

La rédaction de ce document a été largement inspirée d'un projet de norme (groupe de travail animé par M. Bigot au LRPC Est Parisien) qui n'a pas vu le jour mais dont le principe était de synthétiser la totalité des documents ayant trait au contrôle de compactage en tranchées. Il définit les termes employés, spécifie les caractéristiques de l'appareillage nécessaire à la vérification, indique les opérations à effectuer et précise les résultats à présenter dans le procès verbal.

L'organisme de contrôle doit être impartial, indépendant et intègre. Il doit également posséder en son sein les compétences techniques nécessaires tant au niveau de la gestion et de l'organisation des contrôles qu'au niveau du personnel.

En cas de non-conformité des résultats et après traitement des insuffisances signalées, il doit être procédé à un nouveau contrôle sur la ou les zones incriminées.

Bon nombre de recommandations sont mentionnées dans ce document, notamment :

- choix de l'appareillage : pénétromètre à énergie constante ou variable, l'organisme de contrôle soumet au maître d'œuvre le type de matériel,
- implantation des sondages : l'implantation et le nombre de points de contrôle sont définis par le maître d'œuvre et en présence d'un responsable de l'entreprise.
- nombre de sondages : variable en fonction du type de réseau (canalisation ou câble).
- profondeur des sondages : dans le cas d'une canalisation l'essai doit être effectué jusqu'au niveau inférieur du lit de pose ou de la substitution éventuelle.

l'identification des matériaux : elle peut soit s'effectuer lors des travaux par l'organisme de contrôle, soit être fournie à l'organisme de contrôle par le donneur d'ordre, soit être effectuée lors du contrôle lui-même.

le contrôle est conditionné par les capacités d'accessibilité du pénétromètre dynamique, par la granulométrie du matériau, la profondeur d'action commence à 10-20 cm de la surface et peut aller jusqu'à 5 m.

le contrôle est valide si le sondage est vertical et si le frottement latéral est acceptable.

II. LES NORMES

A l'heure actuelle, la normalisation française ne comporte pas de texte homologué concernant les essais de contrôle de la qualité du compactage à l'aide d'un pénétromètre dynamique.

Cependant, nous disposons de deux normes expérimentales qui sont actuellement à l'état de projet. Elles sont référencées sous les numéros XP P 94-063 pour la méthode au pénétromètre dynamique à énergie constante et XP P 94-105 pour la méthode au pénétromètre dynamique à énergie variable.

Ces deux documents constituent les références de base sur lesquelles s'appuie la présente étude, elles sont donc assez largement développées et commentées ci-après.

II.1. Projet de norme XP P 94-063 : Méthode au pénétromètre dynamique à énergie constante

II.1.1. Eléments techniques généraux

a) Cadre de l'utilisation

Cette norme concerne les pénétromètres dynamiques fonctionnant à énergie constante pendant l'exécution du sondage, et équipés d'un dispositif de mesure permettant la représentation de l'enfoncement (en mm) par choc élémentaire, en fonction de la profondeur (en m).

Elle s'applique au contrôle du compactage de remblais courants et à celui des remblais de fouilles et de tranchées. La méthode permet d'utiliser les pénétromètres dynamiques dans l'une ou plusieurs des configurations suivantes :

- Fonction A : évaluer les épaisseurs des couches. Les contrastes de la variation de l'enfoncement par coup à la transition d'une couche à l'autre sont utilisés pour apprécier les épaisseurs de chacune des couches compactées.
- Fonction B : vérifier que l'objectif de densification est atteint. Le principe consiste en la comparaison du pénétrogramme avec une droite limite en dessous de laquelle le sol est considéré comme sous-compacté. Pour aider à l'interprétation, une droite de référence est également tracée, c'est le tracé théorique que devrait avoir le pénétrogramme. Pour obtenir ces droites il est nécessaire de classer les matériaux selon la norme NF P 11-300, de connaître les objectifs de densification et que les références correspondantes (droites limites et de référence) figurent au "catalogue" de l'appareil utilisé.
- Fonction C : les pénétrogrammes de la partie contrôlée sont comparés à la population des pénétrogrammes obtenue avec le même appareil sur une planche de référence. Les conditions de matériaux et de prescriptions de compactage de cette référence doivent être identiques à celles préconisées pour la partie contrôlée.

b) Spécifications techniques

La norme permet notamment de décrire les caractéristiques techniques, géométriques et d'utilisation des pénétromètres.

Ces caractéristiques et conditions d'utilisation sont, en particulier, les suivantes :

- l'énergie de battage doit être comprise entre 10 et 30 J/cm²,
- la cadence de battage doit être comprise entre 15 et 40 coups par min,
- la pointe est conique et l'angle est fixé à 90° (45° par rapport à l'axe de la tige),
- la pointe peut être fixe uniquement dans le cas de sondages à faible profondeur (inf. à 1,00 m),
- le frottement latéral doit être mesuré à l'aide d'une clé dynamométrique. Il existe des limites de tolérance au-delà de laquelle l'essai est considéré comme non valide car trop influencé par le frottement latéral.

II.1.2. Les droites limite et de référence en fonction B

a) Définition

La position du pénétrogramme de contrôle par rapport aux droites de refus et de référence permet de juger de la qualité du compactage. La droite de référence est la droite théorique aux environs de laquelle doit se trouver le pénétrogramme, et la droite de refus (ou limite) est celle au-delà de laquelle on peut considérer, avec peu de chance de conclure à tort, que le matériau est sous-compacté.

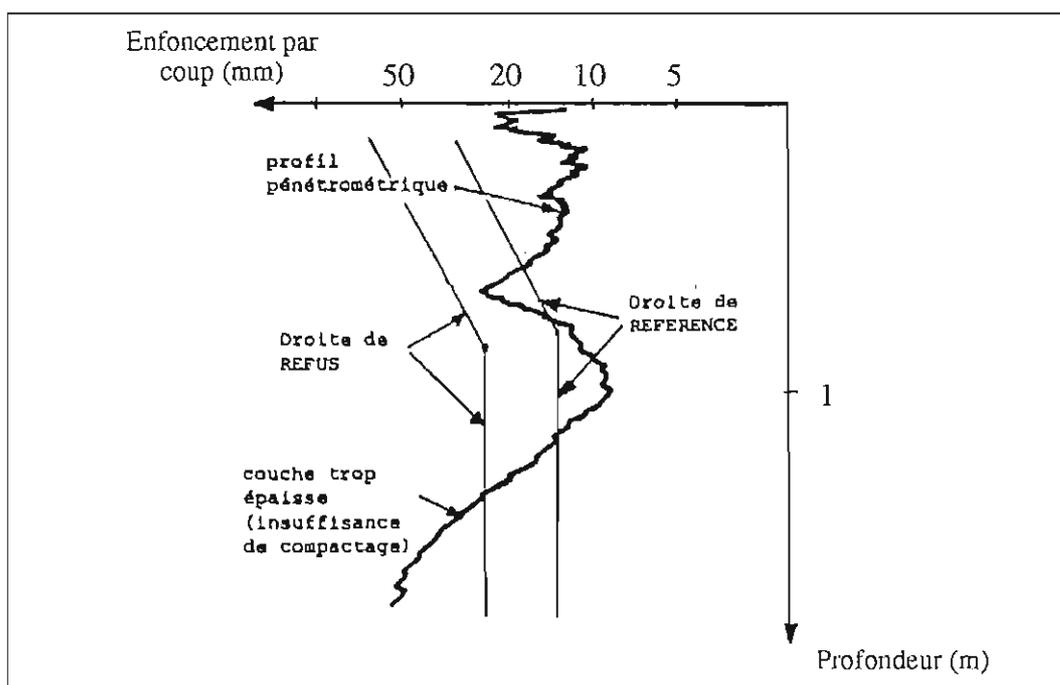


Figure 15 : Exemple de pénétrogramme avec droites de refus et de référence

Les droites limite et de référence sont établies de telle sorte à constituer un catalogue de cas qui vise à rassembler :

- des cas types représentatifs d'un matériau moyen de la classe et de la sous-classe d'état considérée,
- des cas types pour des matériaux marginaux.

Il est précisé dans la norme qu'«un catalogue de cas doit être considéré comme associé à un appareil de caractéristiques données».

Les valeurs d'enfoncement par coup qui servent de référence sont établies à l'aide de planches d'étalonnage ou par des procédures de recherche expérimentale mettant en œuvre différentes méthodes de mesure de la masse volumique moyenne et en fond de couche.

b) Détermination des droites limite et de référence

«La détermination des valeurs limites est faite par référence à la densification réellement obtenue lorsque sont appliquées les conditions de compactage requises pour l'obtention des objectifs q_2 , q_3 ou q_4 .»

En outre, les planches d'étalonnage sont réalisées avec une couche sous-compactée (épaisseur deux fois plus importante et deux fois moins de passage du compacteur).

► Cas d'un sol insensible à l'eau

Le mode opératoire dans le cas d'un sol insensible à l'eau comprend la mise en place de trois couches minimum dont une largement sous-compactée. Les dimensions minimales utiles d'une planche d'étalonnage sont définies comme étant :

- en remblai : une longueur de 25 m et une largeur de compactage. Avec obligation de border chaque coté d'une largeur de compactage sans mesure ;
- en tranchée : une ou plusieurs largeurs de compactage sans recouvrement, et une longueur minimum de 6 m pour 5 points, et 12 m pour 10 points.

Le catalogue des cas est établi pour le matériau dans un état proche de la teneur en eau de l'optimum Proctor normal pour q3 et q4, et modifié pour q2.

Le matériau est identifié selon les critères de la NF P 11-300, la teneur en eau est mesurée pour chaque couche de la planche d'étalonnage.

Chaque point doit s'éloigner du bord de la tranchée d'au moins 5 fois (objectif q4) ou 8 fois (objectif q3) le diamètre de la pointe (d), et 5 fois (objectif q4) ou 8 fois (objectif q3) la valeur D du matériau (D étant la plus grande dimension des éléments de remblai).

L'espacement en plan entre deux essais est d'au moins 1m.

Le nombre minimal d'essais sur planche d'étalonnage est de 5 si D est inférieur ou égal à d, et de 10 lorsque D est supérieur à d.

Pour tracer les droites de référence il faut représenter tous les pénétrogrammes sur un même graphe.

La droite limite est celle qui enveloppe les enfoncements maximaux par coup en fond de couche (hormis la couche sous-compactée), ceci pour la partie supérieure et la partie profonde. En partie supérieure, la droite limite est définie par les valeurs d'enfoncement correspondant à 0,20m et 0,60m. En partie profonde, la droite est verticale et une seule valeur suffit.

La droite de référence est tracée, quelle que soit la profondeur, parallèlement à la droite limite et comme étant la moyenne des valeurs d'enfoncement.

La position de la droite de référence est considérée comme définitive, par contre, la position de la droite limite n'est validée que si :

- la valeur de l'enfoncement limite vaut au moins 1,6 fois l'enfoncement de référence. Dans le cas contraire, on remplace la valeur expérimentale de l'enfoncement limite par 1,6 fois l'enfoncement de référence,
- tous les pénétrogrammes de la zone mal compactée dépassent la droite limite déterminée comme ci-dessus (figure 15).

La position des droites limites et de référence seront affectées au matériau considéré comme marginal tant qu'il n'y aura pas trois matériaux différents de la même classe à être testés. A partir de trois matériaux, les positions des droites pourront être affectées définitivement à la classe de matériau de la façon suivante :

- la valeur de l'enfoncement de référence de la classe est obtenue en faisant la moyenne des valeurs d'enfoncement de référence individuelles des matériaux,
- la valeur de l'enfoncement limite de la classe est obtenue en faisant la moyenne des valeurs d'enfoncement limite individuelles des matériaux. Si la valeur obtenue est plus petite que 1,6 fois la valeur de référence de la classe, elle est portée à cette dernière valeur.

→ Cas d'un sol sensible à l'eau

Le mode opératoire, dans le cas d'un sol sensible à l'eau, comprend également une identification et une classification de la nature du sol selon la NF P 11-300. Pour être considéré comme représentatif le matériau doit être "centré" dans la classe.

La détermination des valeurs d'enfoncement limite et de référence pour un sol sensible à l'eau doit suivre les différentes étapes schématisées sur la figure 16 sur laquelle les notations e_R et e_L représentent respectivement les enfoncements limite et de référence.

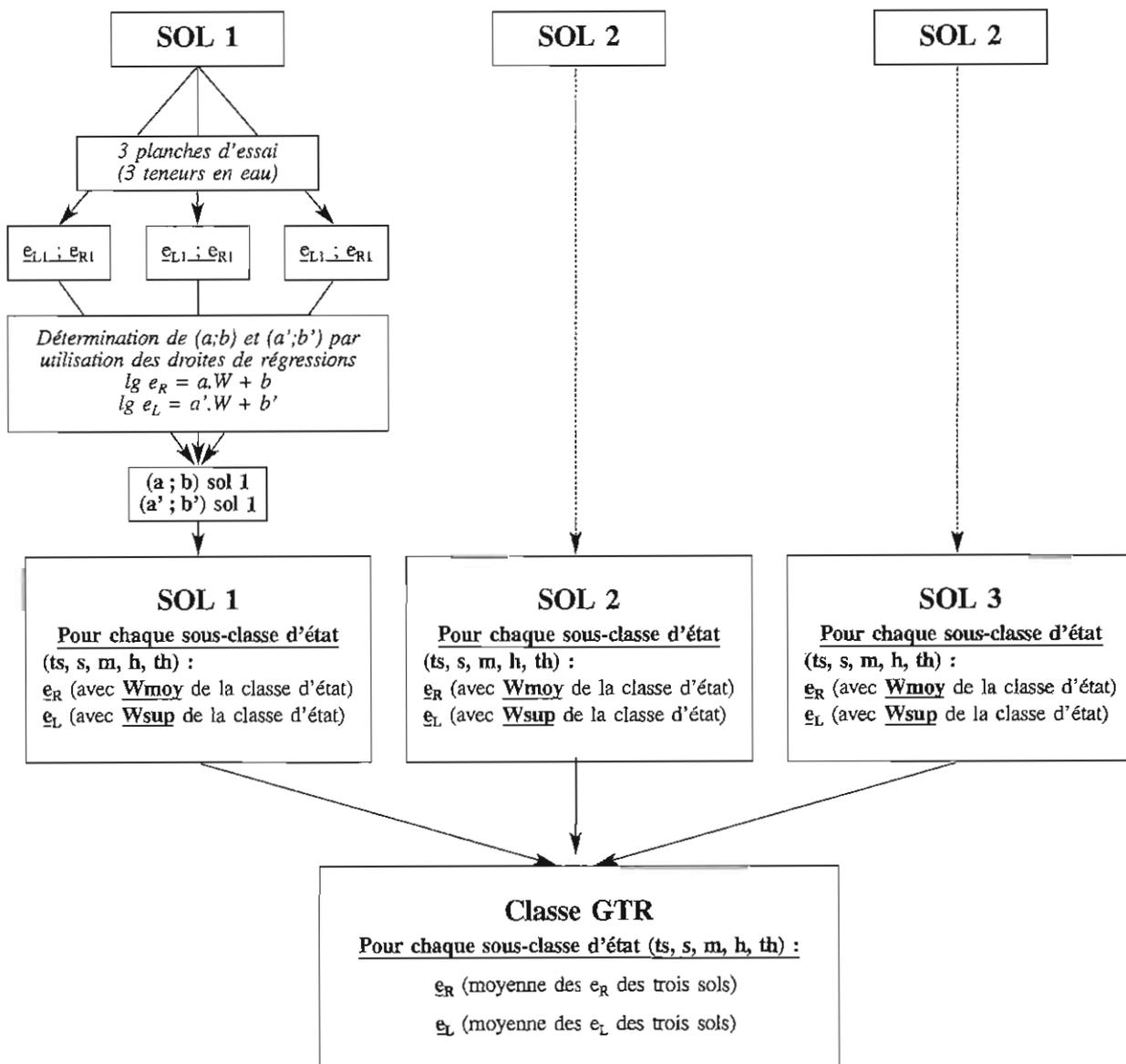


Figure 16 : Démarche expérimentale permettant d'obtenir les valeurs d'enfoncement limite et de référence pour chaque sous-classe d'état de la classification GTR pour les sols sensibles à l'eau.

Finalement, la valeur de l'enfoncement limite est validée si elle est :

- supérieure ou égale à 1,6 fois l'enfoncement de référence dans le cas des sous-classes m, s, ts,
- supérieure ou égale à 1,4 fois l'enfoncement de référence dans le cas de la sous-classe h,
- supérieure ou égale à 1,3 fois l'enfoncement de référence dans le cas de la sous-classe th.

Si ce n'est pas le cas, la valeur de l'enfoncement limite est portée à 1,6, 1,4 ou 1,3 fois l'enfoncement de référence en fonction de la sous-classe considérée.

De même que pour les sols insensibles à l'eau, il ne sera possible d'affecter les valeurs caractéristiques à la sous-classe que s'il y a au moins trois matériaux différents de la même classe à être testés. Les valeurs affectées à chaque sous-classe correspondent à la moyenne des résultats obtenus avec les différents matériaux.

II.1.3. Exploitation des résultats - Interprétation

a) En fonction A

Elle consiste à déterminer les valeurs d'épaisseur réelles des couches (lorsqu'elles sont perceptibles) pour les comparer aux valeurs prescrites, et à établir la fréquence des couches non conformes dans l'ensemble de l'ouvrage contrôlé.

Une épaisseur est déterminée à partir des intercouches. Elles sont localisées à partir du contraste des enfoncements par coup de part et d'autre de celle-ci.

L'interprétation d'une intercouche se fait sur un pénétrogramme lissé (manuellement ou automatiquement). Deux points caractéristiques sont localisés e_1 et e_2 : e_1 est l'enfoncement maximal par coup relevé en bas de couche et e_2 est l'enfoncement maximal par coup relevé en haut de couche sous-jacente. Leur rapport permet de juger du fondement de l'existence d'une intercouche.

b) En fonction B

La fonction B n'est utilisable que si :

- la classification selon la norme NF P 11-300 ou en DC1, DC2, DC3 est réalisée. L'état hydrique, pour les sols ayant une sous-classe d'état (teneur en eau), au moment du contrôle doit être connu. Pour les matériaux marginaux, la conformité par rapport au cas de chantier type qui servira de référence doit être prouvée par une reconnaissance,
- les valeurs d'enfoncement caractéristiques existent pour le cas type,
- le frottement parasite le long du train de tiges est inférieur à la valeur imposée.

Pour l'interprétation le pénétrogramme est comparé à la position des droites caractéristiques. Quatre types d'anomalies, de gravités différentes, sont définis en fonction des positions relatives du pénétrogramme par rapport aux droites caractéristiques.

Le cas d'anomalie n°1, le moins grave, correspond à une surépaisseur des couches sans dépassement de la droite limite. Le cas d'anomalie n°2 correspond à un faible dépassement de la droite limite sur une hauteur peu conséquente. Le cas d'anomalie n°3 est défini comme un dépassement important et sur une hauteur de remblai conséquente. Enfin le dernier cas d'anomalie correspond à un dépassement important sur plus de 50% de la hauteur du remblai testé.

c) En fonction C

Cette fonction n'est utilisée qu'en l'absence de courbes de référence pour le matériau utilisé. Elle suppose donc la réalisation d'une planche de référence représentative.

II.1.4. Analyse et commentaires du texte

L'analyse de la norme XP P 94-063 concernant les pénétrodensitographes nous conduit à formuler quelques observations concernant notamment le mode opératoire de l'étalonnage ainsi que l'interprétation des résultats.

a) Modalité de détermination des masses volumiques sur les planches d'étalonnage

Pour déterminer les catalogues de cas en fonction B (droites limites et de référence pour un sol et un pénétromètre donné), ou pour les planches de référence en fonction C, la norme permet deux modalités de détermination des masses volumiques sur les planches d'étalonnage :

- par la mesure directe de la masse volumique moyenne et en fond de couche,
- "par référence à la densification réellement obtenue lorsque sont appliquées les conditions de compactage requises pour l'obtention des objectifs q_2 , q_3 ou q_4 ".

Si l'étalonnage est effectué en utilisant la première solution, c'est à dire des techniques de mesure de la masse volumique, la densité réelle du matériau est effectivement mesurée et il n'existe pas de dérive possible. Par contre, si l'on considère comme effective la densité normalement obtenue avec les moyens de compactage mis en œuvre, il n'y a plus ici, pour le compactage, que des conditions de moyens et non de résultats. De fait, il existe une dérive possible entre la densité réellement obtenue et celle attendue.

b) Teneur en eau des sols considérés comme insensibles à l'eau

Pour les sols insensibles à l'eau il est précisé que le catalogue des cas doit être établi pour une teneur en eau proche de l'optimum Proctor.

Quelle est la signification réelle de ce "proche" ? En effet, une teneur en eau trop éloignée de l'optimum Proctor, même dans le cas de sols insensibles à l'eau, peut modifier la qualité du compactage final. Par conséquent, la densité considérée pour l'établissement du catalogue des cas s'en trouverait erronée. Reste à savoir dans quelle limite.

c) Nature de matériau centré ou marginal

La norme distingue les matériaux "centrés" dans une classe de ceux "non centrés" ou "marginaux". Pour définir les droites de références d'une classe donnée le matériau doit être centré dans cette classe. Ceci nous conduit à formuler les deux observations suivantes :

- la limite entre "centré" ou "marginal" n'est pas définie et reste donc subjective, d'où une part d'imprécision,
- pour les matériaux marginaux, la conformité par rapport au cas de chantier type doit être prouvée par une reconnaissance complémentaire et une identification précise du matériau.

d) Contraintes de mise en œuvre de la fonction C

La fonction C présente l'avantage d'être utilisable dans tous les cas, en particulier si le catalogue de cas (fonction B) ne contient pas le matériau du chantier contrôlé, ou bien ne traduit pas le caractère marginal du matériau. Cependant, la mise en œuvre est lourde et la fonction C ne peut donc être utilisée que dans le cas de travaux de grande envergure.

Cette méthode apparaît donc comme étant la plus sûre, cependant il faut rester prudent car, pour certains matériaux, une faible variation de la teneur en eau peut modifier le comportement de pénétration de la pointe. Ainsi, les valeurs de résistance obtenues sur planche de référence ne sont applicables que si tous les paramètres sont strictement identiques lors du contrôle du remblai.

e) Détermination d'une intercouche

La détermination d'une intercouche selon la norme est réalisée en considérant le rapport des valeurs des enfoncements par coup en bas et en haut de couche sous-jacente (e_1/e_2).

La détermination de e_2 (enfoncement maximal par coup relevé en haut de la couche sous-jacente) est parfois difficile et peut donc être trop subjective, même après lissage de la courbe. Par contre la valeur de e_1 est plus facilement déterminée.

Notons par ailleurs que, pour un même écart entre e_1 et e_2 , le critère d'acceptation e_1/e_2 sera plus facilement validé pour de faibles valeurs d'enfoncement.

f) Non-utilisation de la droite de référence lors de l'interprétation

Pour la détermination des anomalies il n'est fait référence qu'à l'épaisseur de couche et à la valeur limite. Les valeurs moyennes du pénétrogramme ne sont pas comparées à la droite de référence. Ainsi, peut-on dire que l'objectif de compactage est atteint si le critère d'enfoncement limite est respecté mais que la moyenne des enfoncements est très inférieure aux valeurs moyennes de référence (e_R).

g) Valeur d'enfoncement par coup

La norme ne précise pas de valeur d'enfoncement moyen par coup. Il serait pourtant intéressant que soit indiqué ce genre de paramètre afin d'éviter des enfoncements par coup trop importants et ainsi diminuer la précision de la mesure. Dans ce sens pourrait-on imaginer un appareil de hauteur de chute réglable afin d'adapter l'énergie mise en jeu à la résistance attendue ?

h) Granulométrie des sols à tester

La norme ne précise pas la taille maximale des matériaux à tester en fonction des caractéristiques géométriques de l'appareil, notamment la section de la pointe et l'énergie mise en œuvre.

i) Difficulté d'établissement du catalogue des cas pour les sols sensibles à l'eau

L'établissement des valeurs de référence pour une classe de sol nécessite la réalisation de 9 planches d'étalonnage (3 sols et pour chacun 3 teneurs en eau). Par ailleurs, les critères de variabilité de teneur en eau exigés ($\pm 1\%$ autour de la valeur moyenne) sont difficilement satisfaits pour un sol naturel. Dans ces conditions l'obtention des valeurs de référence paraît complexe.

j) Lissage des pénétrogrammes

Aucune méthode de lissage n'est précisée dans la norme. Cela peut-il influencer l'interprétation des résultats ? (dépassement de la droite limite et détermination des intercouches). Par ailleurs, le lissage atténue le bruit de fond ce qui peut constituer une perte d'information.

II.2. Projet de norme XP P 94-105 : Méthode au pénétromètre dynamique léger à énergie variable

II.2.1. Eléments techniques généraux

a) Cadre de l'utilisation

Cette norme traite des sondages au pénétromètre dynamique appliqués au contrôle de la qualité du compactage de matériaux non traités. Elle concerne les pénétromètres à énergie variable équipés d'un dispositif de mesure permettant le calcul de la résistance à la pénétration dynamique en fonction de la profondeur.

Contrairement à la norme XP P 94-063, où les résultats sont exprimés en valeur d'enfoncement par coup, dans celle-ci les résultats sont des valeurs de résistance de pointe (ceci du fait de la variabilité de l'énergie).

Elle s'applique au contrôle du compactage de remblais courants et à celui des remblais de fouilles et de tranchées. La méthode permet d'utiliser les pénétromètres dynamiques dans l'une ou plusieurs des configurations suivantes :

- Fonction A : évaluer les épaisseurs des couches. Les contrastes de la variation de la résistance de pointe à la transition d'une couche à l'autre sont utilisés pour apprécier les épaisseurs compactées.
- Fonction B : vérifier que l'objectif de densification est atteint. Avec cette méthode l'identification des matériaux effectivement mis en œuvre (selon NF P 11-300) est nécessaire ainsi que la connaissance de leur état hydrique au moment de l'essai. Le principe consiste en la comparaison du pénétrogramme avec une droite limite en dessous de laquelle le sol est considéré comme sous-compacté. Pour aider à l'interprétation, une droite de référence correspondant à la valeur moyenne "cible" de la résistance de pointe est également tracée.

Ces droites sont obtenues à partir :

- soit du catalogue de cas types, si on utilise la méthode d'étalonnage par établissement des droites limite et de référence,
- soit du catalogue des relations $\gamma_d = f^{-1}(qd)$, si on utilise la méthode de calibrage par approche semi-probabiliste.
- Fonction C : les pénétrogrammes de la partie contrôlée sont comparés à la population des pénétrogrammes obtenue avec le même appareil sur une planche de référence. Les conditions de matériaux et de compactage doivent être identiques à celles préconisées pour la partie contrôlée.

La résistance à la pénétration dynamique est la valeur obtenue, à chaque coup de la masse frappante, en fonction de l'enfoncement de la pointe et de l'énergie fournie en tête de tige (calculée à partir de la mesure de la vitesse de frappe), par application de la formule de battage dite des Hollandais.

b) Spécifications techniques

La norme permet notamment de décrire les caractéristiques techniques, géométriques et d'utilisation des pénétromètres.

Ces caractéristiques et conditions d'utilisation sont, en particulier, les suivantes :

- l'énergie de battage doit être modulée de façon à ce que l'enfoncement par coup soit compris entre 0,1 et 2 cm,
- la pointe est conique et l'angle est fixé à 90° (45° par rapport à l'axe de la tige),
- la pointe peut être fixe uniquement dans le cas de sondages à faible profondeur (inf. à 1,00 m),

- le frottement latéral doit être mesuré à l'aide d'une clé dynamométrique. Il existe des limites de tolérance au-delà de laquelle l'essai est considéré comme non valide car trop influencé par le frottement latéral.

Par ailleurs, en annexe, il est précisé que "la profondeur d'investigation peut aller jusqu'à 4-5 m en terrain moyennement compact" et que "le domaine d'utilisation couvre les sols fins et moyens jusqu'à un diamètre maximal de 50-80 mm (faux refus sur caillou isolé)".

c) Calibrage préalable de l'appareil pour une utilisation en fonction B

Le calibrage de l'appareil peut être réalisé :

- soit au laboratoire, méthode recommandée dans la norme car elle met à profit les petites dimensions de l'appareil ; elle permet d'accéder aux résistances dynamiques de pointe limite et de référence, ainsi qu'aux valeurs de résistance semi-probabilistes.
- soit sur planches d'essai (ou d'étalonnage), qui permettent d'accéder uniquement aux résistances dynamiques de pointe limite et de référence.

Les droites limite et de référence sont établies de telle sorte à constituer un catalogue de cas qui vise à rassembler :

- des cas types représentatifs d'un matériau moyen de la classe et de la sous-classe d'état considérée,
- des cas types pour des matériaux marginaux.

Il est précisé dans la norme qu'"un catalogue de cas doit être considéré comme associé à un appareil de caractéristiques données".

Dans le cas de l'utilisation de planches d'essai les valeurs de résistance de pointe qui servent de référence sont établies à l'aide de planches d'étalonnage, ou par des procédures de recherche expérimentale mettant en œuvre différentes méthodes de mesure de la masse volumique moyenne et en fond de couche.

II.2.2. Détermination des courbes limite et de référence

La détermination des valeurs limites est faite par référence à la densification réellement obtenue lorsque sont appliquées les conditions de compactage requises pour l'obtention des objectifs q_2 , q_3 ou q_4 .

La procédure, pour l'utilisation de planches d'essai, est strictement identique pour les deux types de pénétromètres, la description faite précédemment dans le paragraphe concernant le pénétromètre dynamique à énergie constante est donc valable ici.

Par contre, l'étalonnage en laboratoire est spécifique au pénétromètre à énergie variable. Il permet d'obtenir les droites de référence et limite, ou les relations $\gamma_d = f^{-1}(q_d)$.

Dans un moule de grande dimension (cylindre de 35 cm de diamètre et 70 cm de haut minimum), assimilé à un milieu semi-infini, sont préparées 5 séries d'essais pour 5 énergies de compactage différentes et pour différents teneurs en eau. Les énergies de compactage sont étalées de telle sorte à obtenir des conditions de mise en œuvre du pénétromètre correspondant aux différents objectifs de densification et dans une gamme entre 80 et 110 % de l'optimum Proctor normal. Les teneurs en eau doivent appartenir aux sous-classes d'état de la norme NF P 11-300.

Le principe de la méthode du compactage dans le moule est proche de celui de l'essai Proctor. Le but est d'aboutir à une homogénéité de densité dans le moule.

Pour chaque modalité de compactage (sol donné – énergie de compactage – état hydrique), trois essais pénétrométriques sont menés, disposés sur les sommets d'un triangle. Ils ne sont pris en compte que si tous les trois donnent la même indication (à 10% près).

Chaque droites limite ou de référence peut être définie par trois valeurs : qd_0 (intersection entre la partie oblique de la droite et l'axe des abscisses), qd_1 (intersection de la partie verticale de la droite avec l'axe des abscisses) et Z_c (profondeur à laquelle ces deux droites s'intersectent).

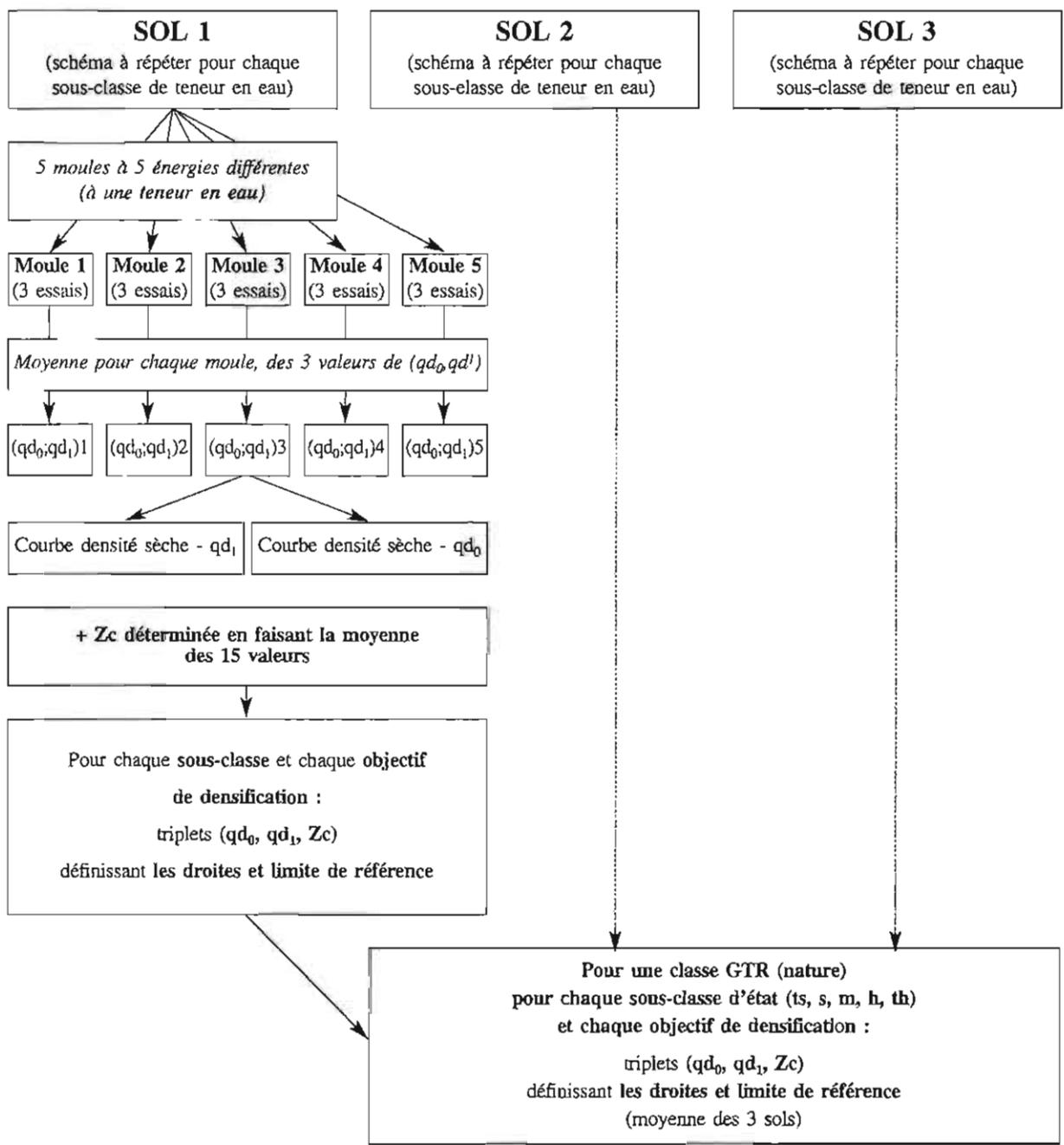


Figure 17 : Démarche expérimentale permettant de définir, dans un moule, les droites limite et de référence pour chaque sous-classe d'état de la classification GTR.

Remarque : La courbe limite est déterminée comme correspondant à la valeur qd_1/k , avec k valant respectivement 1,3 - 1,4 - 1,6 pour les sous-classes th - h - m, s, ts (ce qui correspond à environ 98% $\gamma_{d\text{ réf}}$, c'est-à-dire le poids volumique sec de référence moins 2%).

II.2.3. Analyse et commentaires du texte

Quelques observations peuvent être formulées à propos de ce texte normatif NF P 94-105. Celles faites ci-dessous sont spécifiques à ce texte et viennent en complément de celles déjà effectuées pour l'analyse de la norme NF P 94-063 dont la plupart restent valables dans le cas du pénétromètre dynamique à énergie variable.

Toutefois, il existe quelques différences entre les deux textes, par exemple, la norme XP P 94-105 impose une fourchette pour les valeurs d'enfoncement par coup.

a) Méthodes d'obtention des courbes de référence

La norme permet de réaliser l'étalonnage de pénétromètres soit par des essais sur planche d'étalonnage soit par des essais dans des moules de grandes dimensions. Y a-t-il eu une comparaison des résultats obtenus par les deux méthodes sur un même sol ?

b) Utilisation du moule de grandes dimensions pour l'étalonnage

Les essais dans un moule de grande dimension (35 cm de diamètre) ne sont-ils pas influencés par les parois de celui-ci ? Cette influence est sûrement dépendante de la section de la pointe, de la taille des éléments ainsi que de la nature et de l'état de ceux-ci. Il n'existe aucune recommandation à ce sujet. Par ailleurs, est-il possible de déterminer la profondeur critique (Z_c généralement de l'ordre de 50 cm) à partir d'essais dans un moule de 70 cm de profondeur ?

Par contre, cette méthode permet de connaître avec précision la densité réelle du matériau, on échappe ainsi aux travers de la méthode d'essai à la planche d'étalonnage. Sont alors accessibles les courbes de référence et limite pour n'importe quelle valeur de densité comprise entre 80 et 110 % de l'optimum Proctor. Il est donc possible de mettre en œuvre l'énergie de compactage correspondant à la densité attendue et de vérifier la valeur véritable de cette densité.

II.3. Comparaison des deux textes normatifs

Les deux normes ont la même structure, elles définissent un même objectif et une même méthodologie. La principale différence réside simplement dans le fait qu'elles sont adaptées à des appareils de modes différents de transfert d'énergie au train de tige (constante ou variable).

Aussi, les résultats sont exprimés, dans le cas du pénétromètre à énergie constante, en enfoncement par coup (les autres paramètres restent constants). Par contre, dans le cas d'un pénétromètre à énergie variable, il est indispensable de calculer la résistance de pointe qui permet de tenir compte de la variation de l'énergie de battage.

Par ailleurs, la norme XP P 94-105 offre la possibilité d'un étalonnage en laboratoire dans un moule.

Il est à noter que chaque pénétromètre à énergie constante (et donc pour une énergie unitaire de pointe unique) nécessite un étalonnage spécifique. Par contre un pénétromètre à énergie variable permet un seul étalonnage pour une gamme d'énergie unitaire de pointe. La seule limite dans l'énergie mise en œuvre lors du battage est constituée par une fourchette de valeur d'enfoncement par coup.

Par ailleurs, il existe une différence, entre les deux normes, au niveau des dimensions des planches de référence (fonction C). La longueur de la tranchée doit être de 25m minimum dans le cas des pénétromètres dynamiques à énergie constante, et de 15m dans le cas de pénétromètres dynamiques à énergie variable.

Par contre, le protocole expérimental et les dimensions des tranchées sont strictement identiques en ce qui concerne l'étalonnage en fonction B. Dans la norme XP P 94-105, il est fait un renvoi direct vers la norme XP 94 063.

III. LES NORMES ÉTRANGÈRES

A notre connaissance il n'existe pas de normes étrangères concernant spécifiquement le contrôle de compactage par des pénétromètres dynamiques.

Aux Etats-Unis

Aux Etats-Unis seul le gamma densitomètre est normalisé pour la mesure in situ de la densité. Cette norme est référencée sous le numéro " ASTM D 3017-88/2922-21 ".

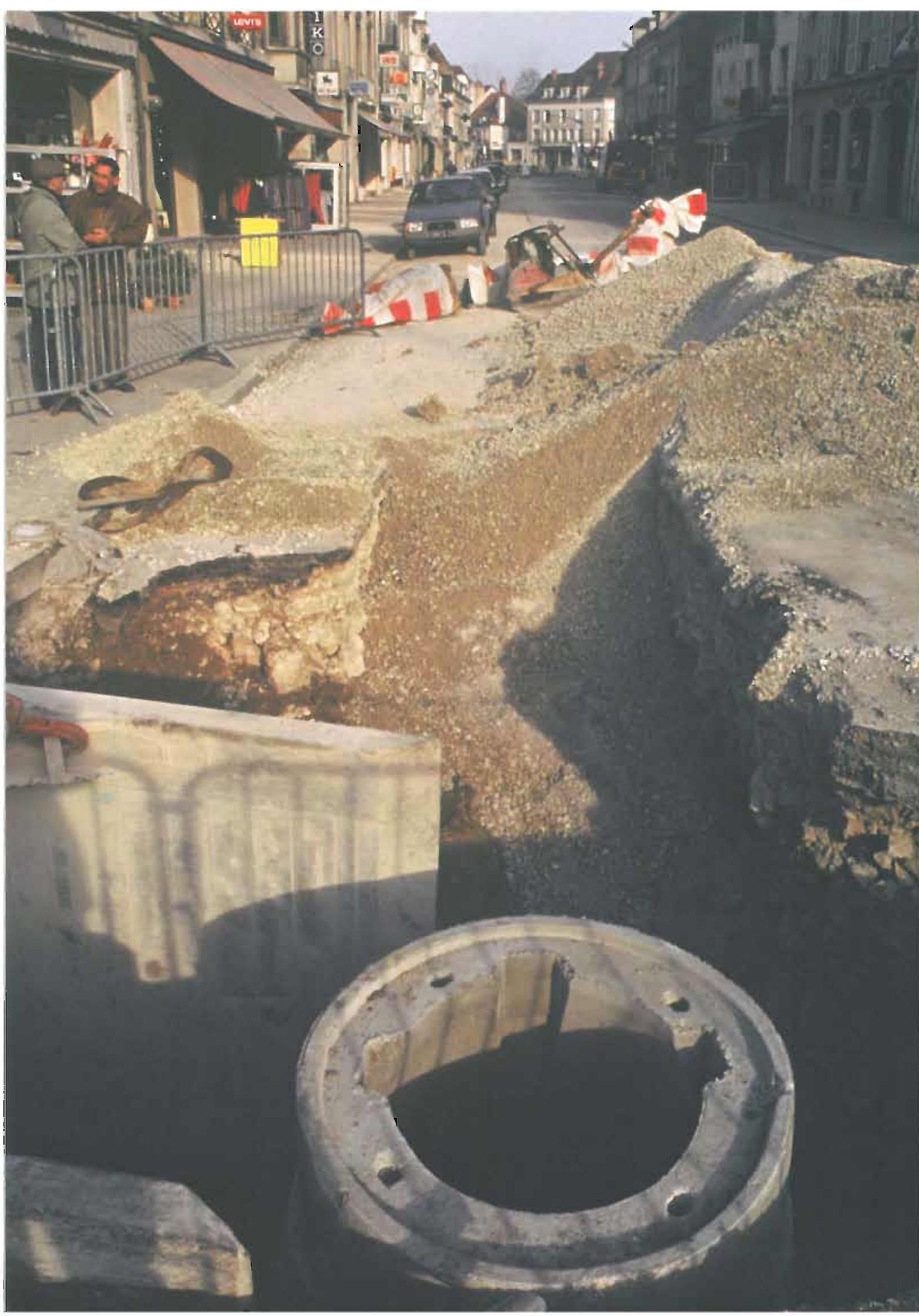
Au Royaume-Uni

En Grande-Bretagne les normes sont diffusées par la British Standard Institution.

Pour le contrôle de la densité des sols en place il existe une norme : "Soils for civil engineering purposes. Part 9 : In Situ tests. British Standard BS1377 : part 9. London, British Institution, 1990." Elle utilise le gamma densimètre à transmission directe.

En Allemagne

Il existe une norme DIN définissant les méthodes de compactage dans laquelle le pénétromètre n'est évoqué que de manière succincte en remplacement du gammadensimètre. Il n'y a pas d'indication particulière sur les conditions d'utilisation.



1.2. Les pénétromètres Sedidrill

1.2.1. Coordonnées du constructeur

Sedidrill S.A.

Z.I. la Tuilerie

78200 MANTES LA VILLE

Tél. : 01 30 92 36 06 - Fax : 01 30 92 59 63

1.2.2. Description et caractéristiques du matériel

Le pénétromètre dynamique à énergie constante de Sedidrill, utilisable en contrôle de compactage, est proposé en trois versions qui présentent toutes les mêmes caractéristiques techniques en ce qui concerne les accessoires de sondage (masse du mouton, des tiges, taille de la pointe, etc.). Par contre le mode de locomotion et de mise en station sont différents de l'une à l'autre.

- * **Version CR-T 75** : Cet appareil est monté sur une remorque routière de 350 Kg d'une largeur de 1500mm. Il est particulièrement destiné aux essais de type routier.
- * **Version LM-H 75** : Cet appareil, monté sur deux pneumatiques, est à déplacement manuel. Le moteur et la pompe hydraulique sont installés séparément de la partie de sondage/battage sur un skid portable. Ce qui facilite les déplacements.
- * **Version R 790** : Cet appareil, monté sur un moteur chenillé d'une largeur de 900mm, permet de réaliser des essais dans des sites difficiles d'accès.



Figure 19 : Les pénétromètres Sedidrill : sur roues, avec une remorque ou sur chenille.

Ces pénétromètres dynamiques sont équipés d'une cadence de frappe automatique non modulable, leur fonctionnement est entièrement hydraulique. Il utilise un groupe hydraulique entraîné par un moteur à essence. Ils disposent également de dispositifs de stabilisation adaptés à leur configuration et d'un niveau à bulle.

Sur le chantier, l'opérateur dispose d'un boîtier électronique qu'il connecte au pénétromètre. Pour chaque essai, ce boîtier stocke les données pénétrométriques transmises par un capteur unique, installé à demeure sur le pénétromètre. Ce capteur est un codeur optique permettant l'acquisition des données. Il communique au boîtier les informations suivantes : enfoncement par coup et indication à l'opérateur d'un changement de tige.

Caractéristiques du matériel de contrôle :

Hauteur de chute :	75 cm
Masse du marteau :	36 Kg
Energie unitaire de pointe :	10 J/cm ²
Masse morte battue :	23 Kg + 4 Kg/tige (1 m)
Cadence de frappe :	30 cp/min (recommandée) Elle est fonction du régime moteur
Diamètre de la pointe :	45 mm (perdue ou fixe) (16 cm ²)
Diamètre des tiges :	40 mm
Profondeur d'action :	Jusqu'à 5 m
Taille maximum des éléments du sol :	100/150 mm

Tableau 1 : Caractéristiques techniques du pénétrodensitographe, PDG 1000

Remarque : Le PDG 1000 permet également, dans le domaine de la reconnaissance des sols, de pratiquer les essais normalisés de pénétromètres dynamiques de type A ou B (NF P 94-114 et NF P 94-115). Dans ces configurations d'utilisation la masse du mouton est augmentée jusqu'à 63,5Kg ou plus.

1.1.3. Le logiciel

Il comporte en mémoire les positions des droites seuils pour chaque classe et sous-classe de sol, ou difficultés de compactage (DC1, DC2, DC3). De ce fait, le processus est le suivant :

Avant le battage en place, on entre au clavier.

- * la désignation du point de mesure (n°, localisation, date, ...)
- * les caractéristiques successives, par tranches, des matériaux traversés (nature et état) et des qualités exigées (q_2 , q_3 ou q_4). On suppose ici que le chantier ait été suivi, ou que des sondages avec prélèvement de matériaux aient été réalisés au préalable pour classement. En l'absence d'informations suffisantes, les informations recueillies sur le chantier peuvent être enregistrées sans les valeurs concernant les sols et objectifs de compactage.
- * la profondeur d'arrêt automatique du battage.

Après la saisie des données l'imprimante trace les axes de coordonnées du graphique puis place les droites de refus et éventuellement de référence si les caractéristiques du sol ont été entrées. Par la suite, une fois le battage débuté, le profil pénétrométrique est tracé en temps réel au fur et à mesure de l'enfoncement.



CHAPITRE III

LES DIFFÉRENTS PÉNÉTROMÈTRES DYNAMIQUES EMPLOYÉS EN CONTRÔLE DE COMPACTAGE

A l'heure actuelle plusieurs modèles de pénétromètres dynamiques sont utilisés en contrôle de compactage des tranchées d'assainissement. Nous avons recensé quatre principaux appareils utilisés en France et satisfaisant aux normes précitées. Les principales caractéristiques techniques de ces pénétromètres sont données ci-après, sur la base des informations fournies par les constructeurs.

I. LES PÉNÉTROMÈTRES DYNAMIQUE À ÉNERGIE CONSTANTE

I.1. Le PDG 1000 du Centre d'Expérimentation Routière de Rouen

I.1.1. Coordonnées du constructeur

Centre d'Etude et de Construction de Prototypes

Chemin de la Poudrière

76120 LE GRAND QUEVILLY

Tél. : 01 35 68 81 98 - Fax : 01 35 68 81 44

I.1.2. Description et caractéristiques du matériel

Le PDG 1000 est un pénétromètre dynamique à énergie constante monté sur remorque et équipé de deux capteurs servant à l'instrumentation, d'un système acquisition et d'un traitement informatisé.

L'enfoncement est mesuré par un capteur, constitué d'un potentiomètre 10 tours qui donne la position de l'enclume par rapport au mât. Un pressostat donne le nombre de coup durant les phases de battage.

Pour une mise en station aisée et rapide, les manœuvres de calage de la machine et de mise en battage sont hydrauliques avec commandes électriques. L'horizontalité est effectuée en s'aidant d'un niveau à bulle.

Le module d'acquisition intégré à l'appareil affiche en temps réel les paramètres de l'investigation. Un module de traitement déporté, équipé d'un micro-ordinateur PC portable couleur et d'une imprimante feuille à feuille A4, permet d'éditer sur le lieu du contrôle les procès verbaux d'essais.

En complément le matériel peut être équipé d'un dispositif de mise en œuvre d'un perforateur pour réaliser un avant-trou dans une couche de surface traitée (revêtement de chaussée) avant de procéder à la diagraphie de contrôle.



Figure 18 :
Le pénétrodensitographe,
PDG 1000

Avant le battage en place, on entre au clavier du boîtier d'acquisition :

- * la désignation du point de mesure (n°, localisation, date, ...)
- * la masse de battage,
- * la hauteur de chute,
- * la profondeur de l'avant-trou si nécessaire,
- * le nombre de coups sans enfoncement qui provoquera l'arrêt du battage,
- * la profondeur d'arrêt automatique du battage.

Caractéristiques du matériel de contrôle :

Hauteur de chute :	75 cm
Masse du marteau :	64 Kg
Energie unitaire de pointe :	23,5 J/cm ²
Masse morte battue :	14 Kg + 6 Kg/tige (1 m)
Cadence de frappe :	10 à 35 cp/min
Diamètre de la pointe :	50,5 mm (perdue ou fixe) (20 cm ²)
Diamètre des tiges :	32 mm
Profondeur d'action :	Non spécifiée
Taille maximum des éléments du sol :	Non spécifiée

Tableau 2 : Caractéristiques techniques du pénétromètre de contrôle du compactage Sédidrill

Remarque : Ces pénétromètres Sédidrill permettent également, dans le domaine de la reconnaissance des sols, de pratiquer les essais normalisés de pénétromètres dynamiques de type B (NF P 94-115).

1.2.3. Le logiciel : Compactolog

Il comporte en mémoire les positions des droites seuils pour chaque classe et sous-classe de sol, ou difficultés de compactage.

Après l'essai les valeurs d'enfoncement sont transférées depuis le système d'acquisition où elles étaient mémorisées vers un ordinateur équipé du logiciel Compactolog. Les données peuvent donc être traitées grâce au logiciel qui permet de placer les droites de refus et de référence, choisies parmi une série de droites limites et de référence. Aussi, le logiciel peut être alimenté avec de nouvelles courbes d'étalonnage afin de compléter la bibliothèque disponible.

Il permet également d'éditer le profil avec la position et la nature de la canalisation sur le procès verbal.

I.3. La sonde LRS A de CMR/SMR

I.3.1. Coordonnées du constructeur

CMR SMR

15, rue des Frères Lumière - B.P.24 Eckbolsheim

67 038 STRASBOURG Cedex

Tél. : 03.88.10.26.66

Fax : 03.88.10.26.76

I.3.2. Description et caractéristiques du matériel

Le LRS A est un pénétromètre dynamique adapté au contrôle de compactage. Il est le résultat d'une évolution et d'une automatisation du pénétromètre dynamique léger Lindenmeyer.



Figure 20 : Le pénétromètre LRS Automatique monté sur remorque.

Caractéristiques du matériel de contrôle :

Hauteur de chute :	50 cm
Masse du marteau :	30 Kg
Energie unitaire de pointe :	14,7 J/cm ²
Masse morte battue :	20 KG + 2,90 Kg/tige (1 m)
Cadence de frappe :	15 à 30 cp/min
Diamètre de la pointe :	36 mm (perdue ou fixe) (10 cm ²)
Diamètre des tiges :	22 mm
Profondeur d'action :	Non spécifiée
Taille maximum des éléments du sol :	Non spécifiée

Tableau 3 : Caractéristiques techniques du pénétromètre dynamique LRS A 30 (CMR-SMR) utilisé en contrôle du compactage

1.3.3. Le logiciel

Le pilotage du pénétromètre se fait à partir d'un micro-ordinateur PC sur lequel est installé un logiciel spécifique. C'est l'ordinateur qui, connecté au pénétromètre, permet la commande de celui-ci. Appareil et ordinateur sont connectés par un câble, ou éventuellement par liaison radio.

Le logiciel s'articule autour d'un écran de contrôle unique où toutes les fonctions nécessaires à son utilisation sont présentes. Tous les renseignements utiles peuvent être saisis avant le lancement de l'essai. Après l'essai et son enregistrement le fichier est accessible afin d'être complété ou modifier au retour du chantier. Ce logiciel permet entre autre de positionner les droites limite et de référence correspondant au matériau testé et à l'objectif de densification visé.

L'impression permet d'éditer le procès verbal de l'essai avec tous les renseignements utiles.

II. LES PÉNÉTROMÈTRES DYNAMIQUES À ÉNERGIE VARIABLE

Le principe du pénétromètre dynamique à énergie variable est relativement récent, un seul appareil de ce type a connu un développement important en France.

II.1. Le PANDA de Sol Solution

II.1.1. Coordonnées du constructeur

Sol Solution

12, rue des Pâles - 63 540 ROMAGNAT

Tél. : 04.73.28.84.40

Fax : 04.73.28.84.49

II.1.2. Description et caractéristiques du matériel

Le PANDA est un pénétromètre dynamique à énergie variable, très léger (20Kg) et donc transportable dans une valise. Son automatisation et son faible poids permettent une utilisation par un seul opérateur.

L'essai consiste à enfoncer un train de tige dans le sol par battage manuel à l'aide d'un marteau normalisé. Pour chaque coup donné, des capteurs mesurent la vitesse du marteau au moment de l'impact, ce qui lui permet de déterminer l'énergie fournie au reste du dispositif ; d'autres capteurs mesurent dans le même temps la valeur de l'enfoncement de la pointe. Le boîtier calculateur reçoit les informations, calcule instantanément la résistance de pointe q_d (en utilisant la formule des hollandais) et mémorise pour chaque coup de marteau, le couple profondeur-résistance correspondant. Par la suite les données sont transmises à un micro-ordinateur compatible PC, puis traitées à l'aide du logiciel PANDA.

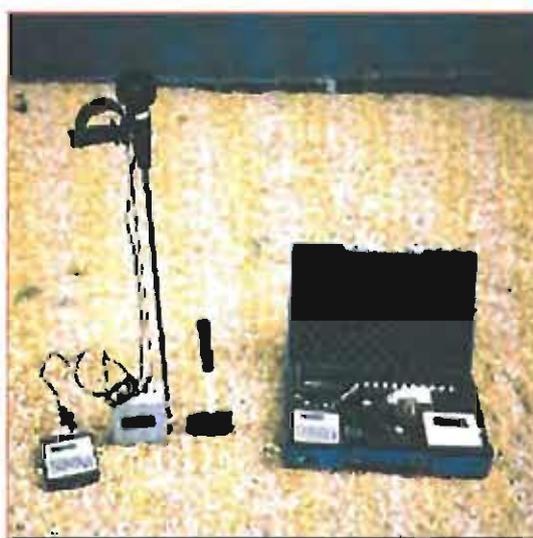


Figure 21 : Le PANDA et sa valise de transport

Caractéristiques du matériel de contrôle :

Hauteur de chute :	Non constante
Masse du marteau :	2 Kg
Energie unitaire de pointe :	Variable
Masse morte battue :	Kg + Kg/tige (0,5 m)
Cadence de frappe :	Non constante mais conseillée à 30 cp/mn
Diamètre de la pointe :	16 mm (2 cm ³)
Diamètre des tiges :	14 mm
Profondeur d'action :	Jusqu'à 6 m
Taille maximum des éléments du sol :	31,5 mm

Tableau 4 : Caractéristiques techniques du pénétromètre dynamique PANDA (Sol Solution) utilisé en contrôle du compactage

Remarque : Le PANDA permet de pratiquer également des essais dans le domaine de la reconnaissance des sols ou l'étude des strates neigeuses.

II.1.3. Le logiciel

Le traitement des données se fait sur micro-ordinateur PC. Les données sont transmises depuis le boîtier calculateur de l'appareil vers le micro-ordinateur et sont ensuite traitées à l'aide du logiciel PANDA.

Après avoir entré les caractéristiques de la tranchée (classification des matériaux et qualités de compactage en fonction de la profondeur), le logiciel positionne des droites de référence et de refus. Le transfert des mesures sur PC permet de visualiser le pénétrogramme sur l'écran et de positionner le signal obtenu avec le PANDA par rapport aux droites limites et de référence. L'édition sur imprimante sous forme de tableaux ou pénétrogrammes est également possible.

Cette édition papier permet de dresser un procès verbal du sondage avec :

- ★ la désignation du point de mesure (n°, localisation, date, ...),
- ★ les caractéristiques successives par tranches des matériaux traversés et des qualités exigées (q₂, q₃ ou q₄). On suppose ici que le chantier ait été suivi, ou que des sondages avec prélèvement de matériaux aient été réalisés au préalable pour la classification.

L'interprétation permet de détecter les cas présentant des anomalies.

III. SYNTHÈSE DES CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DES DIFFÉRENTS PÉNÉTROMÈTRES

Pénétromètres	PDG 1000	Sédidrill	LRS A 30	PANDA
Hauteur de chute :	75 cm	75 cm	50 cm	Non constante
Masse du marteau :	36 Kg	64 Kg	30 Kg	2 Kg
Energie unitaire de pointe :	10 J/cm ²	23,5 J/cm ²	14,7 J/cm ²	Variable
Masse morte battue (longueur d'une tige) :	23 Kg + 4 Kg/tige (1 m)	14 Kg + 6 Kg/tige (1 m)	20 Kg + 2,90 Kg/tige (1 m)	?Kg + ? Kg/tige (0,5 m)
Cadence de frappe :	30 cp/min (conseillée)	Variable 10 à 35 cp/min	Variable 15 à 30 cp/min	Variable conseillée à 30 cp/min
Diamètre de la pointe :	45 mm (perdue ou fixe)	50,5 mm (perdue ou fixe)	36 mm (perdue ou fixe)	16 mm
Section de la pointe :	16 cm ²	20 cm ²	10 cm ²	2 cm ²
Diamètre des tiges :	40 mm	32 mm	22 mm	14 mm

Tableau 5 : Synthèse des caractéristiques techniques des pénétromètres dynamiques généralement utilisés en contrôle de compactage, en France

Remarque : Les pénétromètres dynamiques, en fonction de la granulométrie du matériau, de la section de la pointe, de la section des tiges et de l'énergie mise en jeu, peuvent voir leur précision diminuer. Ainsi, le PDG 1000 a une utilisation devant se limiter préférentiellement aux matériaux de 100/150 mm, de même, le Panda à ceux de 31,5 mm. Aussi, l'augmentation de profondeur augmente les risques de perturbation de la mesure, par frottement latéral par exemple, surtout si les éléments ont une taille importante. Il sera donc préférable de limiter l'utilisation des pénétromètres en contrôle de compactage à environ 5m de profondeur, dans un cas moyen.

D'après M. Gourvès, il est possible de considérer une taille maximum des éléments du sol correspondant à 3 voire 4 fois le diamètre de la pointe.

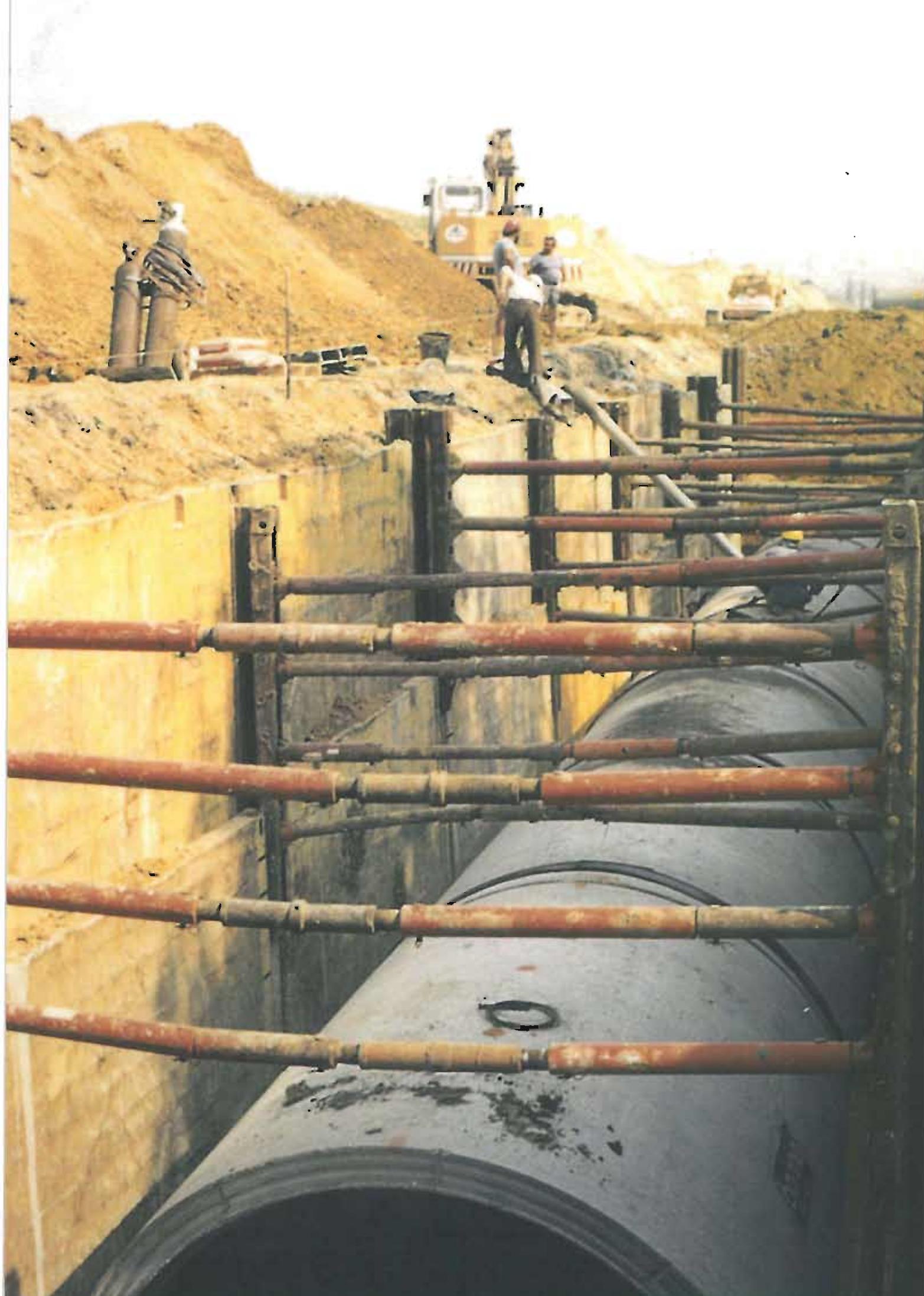
IV. COMMENTAIRES CONCERNANT L'APPAREILLAGE ET SON ÉTALONNAGE

Chaque pénétromètre dynamique décrit ci-dessus est un appareil conçu ou adapté pour une utilisation en contrôle de compactage. De ce fait, ces pénétromètres dynamiques respectent les recommandations des textes normatifs : XP P 94-063 ou XP P 94-115, en fonction du mode de transmission de l'énergie au train de tige.

En conséquence, ils ont des dimensions relativement similaires, ceci surtout du fait de la fourchette d'énergie indiquée dans la norme XP P 94-063. Ils peuvent cependant se différencier par la qualité "mécanique" (mode de déplacement, résistance, robustesse...) et surtout par leur système d'acquisition, c'est-à-dire la fiabilité et la précision des capteurs installés sur l'appareil, la convivialité et la fonctionnalité des systèmes de commandes, et également par les possibilités offertes pour l'édition d'un procès verbal à la fois clair et détaillé.

On remarque que, d'une manière générale, les logiciels associés à ces appareils permettent d'adapter le procès verbal de l'essai. En effet, si les données de l'essai ne peuvent être modifiées, le catalogue des courbes de référence propose une multitude de possibilités parmi lesquelles on peut faire le choix d'une courbe moins "exigeante", dans le cas où la classe du matériau de remblai n'aurait pas été définie précisément. Soulignons également que ce catalogue de cas peut être complété avec de nouvelles courbes de référence et limite saisies à la guise du contrôleur pour compléter son catalogue avec un matériau "marginal".

Par ailleurs, il est à signaler que les conditions expérimentales d'étalonnage des appareils et de détermination des droites (qualité des matériaux testés, nombre de matériaux testés dans une classe, méthode à la planche ou au moule, éventuels dysfonctionnements lors de l'expérimentation...) restent relativement inconnues pour le contrôleur faisant acquisition de l'appareil.





CHAPITRE IV

RÉSUMÉ ET ANALYSE DES DIFFÉRENTS DOCUMENTS RELATIFS AU CONTRÔLE DE COMPACTAGE À L'AIDE DE PÉNÉTROMÈTRES DYNAMIQUES

De nombreux scientifiques se sont penchés sur le contrôle de compactage des remblais à l'aide de pénétromètres dynamiques, notamment du fait de leur utilisation rapide et simple. Les travaux de recherche dans ce domaine ont fait l'objet de comptes-rendus et de documents scientifiques et techniques. Nos recherches nous ont permis de rassembler de nombreux ouvrages, dont la plupart sont d'origine française. Ceci peut s'expliquer par l'avance notable, en France, des recherches dans ce domaine. Dans ce qui suit seront distinguées, les études spécifiques à un seul appareil et les études comparatives entre plusieurs méthodes de contrôle.

I. ETUDES SPECIFIQUES A UN SEUL PENETROMETRE DYNAMIQUE

I.1. Etude du CER de Rouen sur le PDG 1000

Cette étude intitulée " Contrôle du compactage des remblais au moyen du pénétrodensitographe LPC, le PDG 1000 " a été réalisée par le Centre d'Expérimentation Routière (CER) de Rouen, en avril 1989, par M. A.Quibel.

I.1.1. Objectif de l'étude

Cette étude a pour objectif de présenter le pénétromètre dynamique du LPC dans sa version destinée au contrôle de compactage, version nommée pénétrodensitographe. Ce document justifie les premiers choix concernant le mode d'utilisation de l'appareil en contrôle de compactage. Au-delà de l'étude de la réponse du pénétrodensitographe, les premières pages présentent les éléments de base du contrôle de compactage à l'aide d'un pénétromètre dynamique et particulièrement ceux à énergie constante.

I.1.2. Principe du contrôle au pénétromètre dynamique

a) Les paramètres influents

L'enfoncement de la pointe dans le sol est dépendant :

Du matériel :

- * de la masse tombante,
- * de la hauteur de chute,
- * de la section de la pointe et de sa forme,

Du sol :

- * sa nature du sol,
- * son état d'humidité,
- * son taux de compactage.

Le paramètre "degré de compactage" du sol ne peut donc être contrôlé que si l'influence de la nature et de l'état d'humidité du sol sont contrôlés. En effet, les valeurs d'enfoncement sont fortement dépendantes de ces paramètres, comme le montre le tableau suivant :

	Limon peu plastique	Sable peu argileux	Grave argileuse	Argile à silice
Wopn-2	9,4	15,9	6,3	4,6
Wopn+2	23,5	31,5	21,8	15,6

Tableau 6 : Exemples d'enfoncement de la pointe (mm) par coup, à 40cm de profondeur, pour différents types de sols compactés à 95% de la densité à l'OPN

Pour prendre en considération la nature et l'état des sols on utilise la classification décrite par la norme NF P 11-300. Des tests d'enfoncement doivent être réalisés pour chaque catégorie de la classification sans pour autant que les résultats obtenus soient caractéristiques de tous les sols de cette catégorie. C'est notamment le cas pour les matériaux élaborés qui font l'objet d'une classification particulière liée à leur difficulté de compactage.

Pour atteindre l'objectif de densification escompté il faut suivre des consignes de compactage qui stipulent l'épaisseur des couches à mettre en œuvre et le nombre de passes en fonction du compacteur utilisé. De ce fait, il est choisi, pour augmenter au

maximum la discrimination verticale de l'appareil, une méthode de mesure en enfoncement par coup. Cet enfoncement par coup ne sera pas traduit en résistance de pointe afin que le paramètre reste neutre et ainsi d'éviter l'amalgame entre portance et compactage qui s'expriment dans la même unité (ces deux paramètres sont liés par des lois complexes et mal connues dans lesquelles le degré de saturation et la nature argileuse de la fraction fine ont une importance primordiale).

Ainsi, la formule des Hollandais ne sera pas utilisée ici et, de ce fait, il n'existera pas dans les résultats, une prise en compte de la pondération devant être introduite par l'augmentation de la masse battue. Ceci, ajouté au risque de déviation des tiges et donc au risque de frottement latéral, limite l'utilisation du PDG 1000 aux 5 premiers mètres à partir de la surface.

Remarque : Cette étude est antérieure à la norme XP P 94-063. Depuis, la correction due à la variation de la masse battue est appliquée.

b) Choix des caractéristiques techniques de l'appareil

Les paramètres du PDG 1000 ont été déterminés afin de pouvoir tester une gamme de densité courante (surtout q_4 et q_3 , pour q_2 il faut rester prudent lors de l'interprétation) et des matériaux de 0/100mm (voir 150mm occasionnellement). Pour répondre à ces attentes il a été choisi :

- une masse tombante de 36,5 Kg,
- une hauteur de chute de 75 cm,
- un diamètre de pointe de 45 mm (15,9 cm²).

Ce qui conduit à une énergie unitaire de pointe d'environ 10J/cm² avec une seule tige allonge.

c) Droites de refus et de référence

Pour une classe de nature et une sous-classe d'état (pour les sols sensibles à l'eau) et pour une qualité de compactage donnée, les valeurs seuils consistent en une droite de refus qui peut être accompagnée d'une droite de référence. Le taux de compactage qui sert à déterminer la droite de refus est celui obtenu expérimentalement en bas de couche lorsqu'on applique correctement les conditions de compactage énoncées dans la Note Technique "Tranchées" (note précédant le guide actuel "Remblayage des tranchées et réfection des chaussées" datant de mai 1994).

Dans le cas des sols sensibles à l'eau, pour ne pas être pénalisantes à tort les droites seuils ont été déterminées, pour une sous-classe d'état, avec des sols ayant une teneur en eau située au niveau de la borne haute de la sous-classe d'état concernée.

Ces droites de refus et de référence se composent d'une droite oblique en partie supérieure et une droite verticale en profondeur (à partir d'environ 50 cm à 1 m selon le matériau testé).

d) L'interprétation des résultats

La position du profil pénétrométrique par rapport à la droite de refus permet de juger de la qualité du compactage obtenu. Cependant, il faut reconnaître qu'une classe de nature et une sous-classe d'état représentent, en fait, un domaine dans lequel subsiste une certaine variabilité des sols et donc pour lesquels le même résultat en densité peut conduire à des profils légèrement décalés. Il en a été tenu compte dans l'établissement des valeurs seuil ; la droite de refus est située de telle manière que, si le profil pénétrométrique franchit la droite de refus, il subsiste une probabilité très faible de conclure à tort que la qualité de compactage est insuffisante.

1.1.3. La précision de la mesure

a) Reproductibilité de la mesure

La reproductibilité des mesures a été testée sur un massif multicouche homogène avec une population de 6 points espacés d'un mètre minimum. Le matériau testé est une grave sableuse sous-compactée par rapport à l'objectif q_4 (nombre insuffisant de passes). La dispersion observée au niveau de ces essais correspondrait à +/- 0,05% en enfoncement par coup, soit +/- 2,5% en taux de compactage, ce qui est compatible avec l'ordre de grandeur des dispersions observées en place pour ce type de sol.

Parmi les 4 couches du massif testé (toutes sous-compactées), les trois plus profondes sont jugées insatisfaisantes par la totalité des essais ; la couche supérieure est, par contre, jugée satisfaisante par seulement 3 des 6 essais.

b) Sensibilité aux variations de densité

L'expression qui relie l'enfoncement par coup (e) au taux de compactage (T) d'un sol sensible à l'eau s'écrit : $\text{Log } e = m.W + a.z + b.T + c$. Dans cette relation, z est la profondeur, W la teneur en eau, et, m , a , b et c sont les coefficients de la régression. Le coefficient b , variable suivant les natures de sols, vaut en moyenne -0,04 ce qui permet de dire que pour une insuffisance de 5% la valeur de l'enfoncement est multipliée par 1,6.

c) Fluctuations à l'intérieur d'une classe ou d'une sous-classe

Il a été possible d'estimer que, dans une même sous-classe d'état, pour une variation de teneur en eau de 1%, la valeur d'enfoncement est multipliée par 1,25 (25% d'augmentation). Ce facteur a été pris en compte au moment de la détermination des positions des droites seuils, établies relativement à la borne haute des teneurs en eau afin d'éviter de refuser à tort des sols humides mais correctement compactés. La contrepartie de cette précaution est d'augmenter la marge de tolérance pour un sol proche de la borne basse des teneurs en eau.

Cette marge a donc une valeur maximum si le sol possède une teneur en eau correspondant au bas de la sous-classe d'état. La différence de teneur en eau entre le haut et le bas de la fourchette est de 2% ce qui correspond donc à une variation d'enfoncement de $(1,25)^2$, c'est à dire environ 1,6 pour le rapport des enfoncements. Or, nous avons vu qu'à une variation d'enfoncement de 1,6 correspond une variation du taux de compactage de 5%, soit autant qu'entre la droite limite et la droite de référence. Ces éléments confirment la difficulté de contrôle et d'interprétation des résultats obtenus sur des sols sensibles à l'eau, d'autant plus que la teneur en eau des sols naturels présente généralement une certaine variabilité.

Par contre, aucune recherche n'a été menée en ce qui concerne l'influence de la variabilité de nature d'un sol à l'intérieur d'une même classe. Une telle recherche implique de considérer le fait que les sols d'une même classe, soumis aux mêmes conditions de compactage n'aboutissent pas au même taux de compactage. Cependant, en faisant l'hypothèse que la compactabilité et la pénétrabilité évoluent dans le même sens, s'il existe une différence de taux de compactage après action des compacteurs, cette différence diminuera avec le test de pénétration. En effet, le sol le plus compactable est aussi le plus pénétrable.

d) Evaluation de la précision de la mesure

Dans le cas de sols dont la taille maximum n'est pas élevée (faible proportion d'éléments supérieurs à 20 mm) le PDG 1000 est capable de détecter un manque de densité d'environ 6%.

Dans le cas de sols où la correction du Proctor peut être jugée limite (refus à 20 mm compris entre 20 et 35%), le PDG 1000 a une marge de détection de 6 à 8%.

Enfin, dans le cas de sols ayant des tailles maximums situées entre 50 et 100, voire 150mm, les contrôles de densité sont délicats à interpréter. Malgré tout les insuffisances sévères ne peuvent porter à confusion.

1.1.4. Conclusions de l'étude

Hormis un rappel des principaux résultats et observations cités ci-dessus la conclusion de l'étude souligne que le classement GTR des sols auscultés est indispensable à une bonne interprétation des mesures. S'il n'est pas fait, des prélèvements de sols doivent être effectués à proximité des endroits contrôlés (tarière, carottier...). De ce fait, il y aurait une nécessité d'adjoindre au PDG 1000 un dispositif de prélèvement mécanique des matériaux sur la hauteur d'investigation.

Par ailleurs le PDG 1000 ne peut avoir la prétention de détecter de faibles insuffisances de compactage. (inférieures à 4% dans le meilleur des cas).

Le nombre d'expérimentations en hall d'essai étant obligatoirement limité, il est souhaitable que l'appareil soit soumis à une période probatoire de 2-3 ans pendant laquelle les retours d'expérience pourront permettre de savoir si le PDG 1000 est adapté à ce type de travaux de contrôle.

1.1.5. Commentaires

Dans cette étude il est indiqué qu'une utilisation directe de l'enfoncement par coup, sans correction de la masse battue due à l'ajout de tiges, est possible du fait des faibles profondeurs de sondages (inférieures à 5m). Cependant, la norme XP P 94-063 indique que les valeurs d'enfoncement par coup doivent être corrigées en fonction de l'ajout de tiges, la correction s'effectue de la même façon que dans la formule des Hollandais.

Les résultats obtenus sur la sensibilité de la mesure aux variations de la densité permettent d'expliquer le choix du facteur 1,6 retenu dans les normes XP P 94-063 (transposé ensuite à la norme XP P 94-105) pour la validation de la valeur de la droite de référence. Elle correspond donc, dans le cas d'un sol moyen, à une insuffisance de compactage de 5%.

Il serait intéressant de savoir si la "période probatoire" du PDG 1000 a permis d'obtenir des renseignements sur l'utilisation pratique et sur la qualité de la réponse de l'appareil. Les organismes de contrôle n'étant "généralement" pas en mesure de connaître l'identification exacte (nature et état) des matériaux, le retour d'expérience ne risque-t-il pas d'être assez pauvre ?

L'utilisation d'une masse tombante deux fois plus importante, conduisant à la version PDG 2000, engendrerait des enfoncements par coup beaucoup plus importants, atteignant jusqu'à 100mm sur des sols humides. Cette configuration de l'appareil permettrait de diminuer le temps de battage, et serait plus adaptée pour contrôler l'objectif de densification q_2 . Cependant, ces avantages ne suffisent pas pour modifier régulièrement la configuration de l'appareil (installation de la masse de 63,5 Kg).

I.2. Etude du CER de Rouen sur l'assurance qualité et le contrôle au PDG 1000

Cette étude intitulée "Assurance qualité de la mise en œuvre des matériaux de remblais - Contrôle extérieur de compactage, utilisation du pénétrodensitographe LPC" a été réalisée par le Centre d'Expérimentations Routières (CER) de Rouen, en 1993, par MM. G. Morel et A. Quibel.

I.2.1. Objectif de l'étude

Cette étude présente à la fois les facteurs d'influence de la qualité d'un bon compactage et les conditions d'utilisation du pénétrodensitographe LPC en tant que méthode de contrôle de compactage a posteriori. L'attention est particulièrement portée sur la détermination des épaisseurs des couches.

I.2.2. Définition de la qualité du compactage

Afin d'obtenir la qualité de compactage requise, des tableaux ont été établis. Ils donnent pour les divers cas de sols (nature et état) les conditions d'emploi de la plupart des matériels de compactage. Il est possible, après classification du sol selon la NF P 11-300 et du matériel selon la norme NF P 98-736, de certifier que la qualité de compactage est suffisante si trois conditions sont réunies :

- * l'épaisseur des couches compactées est inférieure ou égale à e_{max} ,
- * le rapport du volume de sol compacté à la surface balayée par le compacteur est inférieur ou égale à celui fourni dans les tables,
- * la répartition de l'énergie de compactage est homogène.

Afin d'effectuer un contrôle a posteriori, il est donc possible de déterminer une valeur minimale pour la masse volumique en fond de couche et une masse volumique moyenne à partir d'une planche de compactage effectuée en appliquant strictement le protocole résultant de la lecture des tableaux de compactage. Les valeurs déterminées peuvent ainsi être considérées comme des exigences performanciennes. Il est à noter que la qualité requise est essentiellement définie par des exigences de moyens et non par la densité effectivement obtenue qui est celle prise en compte dans la définition des niveaux de compactage q_2 , q_3 et q_4 .

Plusieurs scénarios ont été testés pour établir les tassements nécessaires pour atteindre un état d'équilibre durable. La principale conclusion est que le respect des épaisseurs des couches mises en œuvre est le facteur primordial pour l'obtention de la qualité de compactage attendue.

I.2.3. Influence de l'épaisseur des couches sur la qualité du compactage

a) L'épaisseur des couches

Il est important de contrôler l'épaisseur des couches, en effet, l'efficacité des compacteurs décroît en fonction de la profondeur. Les insuffisances en taux de compactage en bas de couche varient entre 4 et 9% lorsque l'épaisseur est doublée. Les insuffisances sont plus marquées pour les matériaux plus difficiles à compacter ou qui ont subi un traitement à la chaux.

Une surépaisseur conduit, en fonction des sollicitations en surface, à un tassement des couches pouvant engendrer des désordres en surface ou au niveau de la canalisation. Aussi, une sous-compaction engendre une augmentation excessive de la porosité en fond de couche pouvant aller jusqu'à l'effondrement des caractéristiques mécaniques par imbibition.

Or, il se trouve que les surépaisseurs ne sont pas rares dans le cas de chantiers réels.

b) Utilisation du PDG 1000 pour évaluer l'épaisseur des couches

Pour la détermination des intercouches deux points sont à prendre en considération : la sensibilité de l'information "enfoncement par coup" par rapport au taux de compactage et l'importance du contraste de densité entre le bas de la couche supérieure et le haut de la couche inférieure.

A partir de planches d'essai les informations suivantes ont été rassemblées :

- le rapport e_{c1}/e_{c2} (enfoncement par coup en bas de couche / enfoncement par coup en haut de couche sous-jacente), information utilisée pour déceler l'intercouche sur le pénétrogramme,
- la surépaisseur $((e_{réelle} - e_{qi})/e_{qi})$ (q_i = niveau de densification visé),
- l'écart de taux de compactage en bas de couche : $T_{min} - T_{ic}(q_i)$,
- le contraste de taux de compactage : $\Delta T = T_{max} - T_{min}$,
- un indice de décelabilité de l'intercouche (I_d) : déterminé par un utilisateur exercé à l'utilisation du PDG 1000.
- l'écart entre la profondeur réelle de l'intercouche et celle à laquelle elle est décelée sur le pénétrogramme.

Il est intéressant de souligner que le contraste sera d'autant plus marqué que les épaisseurs des couches seront importantes, en effet, les bas de couches seront largement sous-compactés.

L'interprétation des essais réalisés a permis de tirer les enseignements suivants :

- pour certains sols C ou des sols humides la détection des intercouches est difficile pour de faibles surépaisseurs ;
- des surépaisseurs entre 20 et 50 % (faible échantillon) semblent aisément décelables, à l'exception toujours de sols humides, et dont l'insuffisance de compactage en bas de couche reste limitée ($\leq 3\%$) ;
- les surépaisseurs de plus de 50 % de l'épaisseur correcte sont très facilement décelables, voire bien ou assez bien décelables pour les sols grossiers et humides (ex : C1h où le contraste des enfoncements par coup par rapport au bruit de fond du pénétrogramme, dû aux blocs, est moins marqué).

Sur le pénétrogramme la position réelle de l'intercouche se trouve en moyenne située à la profondeur où les enfoncements par coup amorcent leur décroissance, augmentée de 5cm.

Les causes d'éventuelles difficultés de détermination de l'épaisseur sont :

- des couches d'épaisseur plus faible que l'épaisseur prescrite. Ces conditions de compactage se rencontrent lorsque l'atelier de compactage est hétérogène (par exemple avec des compacteurs de classe élevée utilisés en alternance avec de petits matériels). La dispersion des mesures et le faible contraste de masse volumique entre le haut et le bas de couche peuvent conduire à des erreurs d'interprétation. L'augmentation du nombre de points de mesure doit contribuer à lever les incertitudes, mais il convient d'examiner également les disques de contrôle des compacteurs.
- des sols compactés à l'état humide (ou matériau très facile à compacter). Ce cas de sol conduit normalement à un faible gradient de masse volumique et à une faible variation de la masse volumique en fond de couche lorsque l'épaisseur varie autour de l'épaisseur prescrite. La conséquence sur la qualité d'une faible variation d'épaisseur est donc peu importante.

- un compactage en couche mince au moyen d'un compacteur à pied.
- dans le cas de roches évolutives, l'évolution peut conduire à un affaiblissement des caractéristiques mécaniques plus marquées en haut de couche, il en découle que les variations d'enfoncement par coup en fonction de la profondeur sont nettement plus faibles que celles relatives à la masse volumique. Comme ces sols sont également souvent hétérogènes (vis à vis du pénétromètre) à cause de la présence de gros éléments indurés, il faut s'attendre à des difficultés d'interprétation lorsque l'épaisseur est relativement faible et proche de celle prévue.
- pour les sols grossiers C1, C2, D3 la rencontre d'un gros bloc par la pointe apporte une réponse du pénétromètre qui n'est plus reliée à la masse volumique du remblai. L'augmentation de points de mesure peut permettre de palier ce problème.

Les opérations élémentaires successives qui aident au dépouillement d'un pénétrogramme, sont ainsi définies :

- l'élimination des points aberrants, il s'agit de pics pouvant être engendrés par les opérations d'ajout de tiges-allonges.
- le lissage du pénétrogramme permet de gommer ce qu'on appelle le "bruit de fond", il est d'autant plus marqué que les matériaux sont grenus. Le lissage facilite la mise en évidence des couches.
- la détection des intercouches est plus ou moins simple en fonction de la netteté du contraste. Cette netteté dépend de plusieurs facteurs :
 - la différence de densité à la transition est plus marquée s'il y a une surépaisseur des couches,
 - la nature du matériau : les matériaux charpentés ont un pouvoir bloquant qui peut atténuer les contrastes de densité à la pénétration,
 - l'état hydrique : les matériaux humides à très humides ont généralement un gradient de densité faible. Les intercouches peuvent ne pas être décelables,
 - au niveau du matériel de compactage, un compacteur à bandage lisse conduit à un contraste de densité plus franc qu'un compacteur à pieds dameurs si les empreintes sont profondes. Aussi, certains ateliers ne font pas appel au même type de compacteur sur toute la hauteur du remblai.
- la validation des intercouches repérées, il s'agit du degré de probabilité que le contraste repéré traduit bien une intercouche. Quelques éléments de repères :
 - la probabilité que l'intercouche existe est bonne lorsque le rapport e_{c1}/e_{c2} est supérieur à 1,5 pour un faible bruit de fond (c'est-à-dire dans une fourchette de +/-10% par rapport à la moyenne d'enfoncement en un point donné) ou supérieur à 1,8 pour un bruit de fond élevé (c'est-à-dire dans une fourchette de +/-50%).
 - il est possible de s'aider des pénétrogrammes voisins (similitude),
 - la position de la droite de refus si celle-ci peut être jointe.
- la détermination des épaisseurs de couche se fait par différence entre deux intercouches validées. On ne retient que les épaisseurs de couches supérieures à l'épaisseur prescrite. Notons que le besoin de connaître la position exacte des intercouches n'est pas nécessaire puisque le calcul des épaisseurs se fait par différence.

L'interprétation finale au plan des épaisseurs est réalisée en terme de défaut en fonction de son amplitude (écart par rapport à la prescription de e_{max}) et/ou en fonction de la fréquence avec laquelle il est présent.

I.3. Etude du LRPC de Lille sur la réponse du PDG 1000

Cette étude intitulée *“Utilisation du pénétromètre dynamique pour le contrôle de compacité du remblayage des tranchées d’assainissement avec les matériaux régionaux les plus courants”* a été réalisée par le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Lille en novembre 1993, à la demande et grâce au financement de l’Agence de L’Eau Artois-Picardie.

I.3.1. Objectif de l’étude

L’objectif de cette étude est d’apprécier la validité du PDG 1000 lors d’une utilisation en contrôle de compactage des remblais de tranchées, notamment ceux liés aux travaux d’assainissement mettant en œuvre des matériaux de remblai locaux.

La finalité de l’étude peut donc se résumer comme suit :

- * constater la réponse du PDG 1000 sur des sols naturels régionaux normalement compactés,
- * vérifier la pertinence des apparentements usuellement pratiqués entre les sous-produits industriels et les granulats naturels.

I.3.2. Conditions expérimentales

a) Le plan expérimental

L’expérimentation a consisté en l’analyse des pénétrogrammes issus du PDG 1000 et réalisés sur des chantiers réels dans la région, avec des matériaux locaux. La démarche expérimentale se divisait en 5 phases :

- Phase 1 : Identification géotechnique du matériau utilisé pour le remblayage.
- Phase 2 : Application sur site des modalités de compactage du guide technique “Compactage des remblais de tranchées”, avec vérification au gammadensimètre des densités réelles et augmentation du compactage en cas de déficit de densité par rapport à l’objectif souhaité.
- Phase 3 : Continuation du remblayage par couches selon les modalités de compactage arrêtées en phase 2.
- Phase 4 : Intervention du PDG 1000 dès achèvement du remblayage.
- Phase 5 : Comparaison du pénétrogramme avec les droites de refus et de référence du matériau pris comme référence (Nature et Etat), puis validation ou non de l’assimilation s’il en existe une.

Toutes ces étapes, prévues théoriquement dans le plan expérimental, n’ont été que peu souvent effectivement réalisées dans leur totalité.

b) Matériaux testés

Ils sont de nature et d’état variables et bien sûr dépendants du choix de l’entrepreneur pour les 12 chantiers pris en compte :

- A1 : Scories de Centrale thermique,
- B1 : Sable à lapin, scories de centrale thermique,
- B3 : Cendres de foyer, 2 sables de schistes noirs,
- D1 : 5 sables de dunes.

1.3.3. Méthode d'analyse des résultats

L'analyse des résultats consiste en l'étude des pénétrogrammes et de leur position par rapport aux droites de référence. Les données au gammadensimètre fournissent des indications quant à la densité réelle des couches.

1.3.4. Conclusions de l'étude

Les zones de matériaux sous-compactés, mises en évidence par le gammadensimètre, ont été repérées par le PDG 1000.

L'appareillement entre matériaux naturels et sous-produits industriels, pour l'interprétation au PDG 1000, est correct. Le PDG 1000 repère efficacement les zones sous-compactées quel que soit le matériau.

Le compactage suivant les critères proposés par le guide technique pour le "Compactage des remblais de tranchées" conduit aux densités attendues.

1.3.5. Commentaires

L'entreprise d'une expérimentation sur chantiers réels est intéressante mais reste risquée dans le sens où il est difficile de maîtriser tous les paramètres. En effet, et ce point est souligné dans le document, bon nombre de données ne sont pas fournies aux expérimentateurs ce qui peut conduire à des difficultés dans l'interprétation des résultats.

1.4. Thèse de Shuhua ZHOU sur le PANDA

Cette thèse intitulée "*Caractérisation des sols de surface à l'aide du pénétromètre dynamique léger à énergie variable type "Panda"*" a été réalisée par Shuhua ZHOU au CUST - Université Blaise Pascal à Clermont-Ferrand - à la demande et grâce au financement de la Société Sol Solution. Cette thèse a été présentée en décembre 1997.

1.4.1. Objectif de l'étude

Cette thèse a pour objectif d'évaluer la qualité de la réponse du PANDA dans plusieurs configurations d'utilisation en reconnaissance des sols. Une partie est notamment consacrée à l'étude de la relation entre résistance de pointe et densité sèche, et à l'établissement d'une base de données sous forme de courbes de référence.

1.4.2. Le contrôle de compactage dans l'étude

Dans cette thèse il est décrit le contexte général et les principes de contrôle du compactage en France. Aussi, sont présentées les principales étapes de la démarche expérimentale servant à l'établissement dans un moule des droites de référence et de refus pour le PANDA.

La démarche expérimentale présente différentes étapes, décrites succinctement dans le document, à savoir :

- * classification du matériau
- * choix du moule : 16cm de diamètre et 32cm de hauteur pour les sols fins (taille inférieure à 5mm), ou 37,5cm et 80cm de hauteur pour les sols de taille supérieure.
- * mise en place du matériau avec différentes énergies de compactage afin d'obtenir des résultats pénétrométriques pour des masses volumiques comprises entre 80 et 110% de l'Optimum Proctor Normal.

- * pesée du moule puis essai au PANDA,
- * traitement des données. C'est à dire établissement de courbes avec la résistance de pointe en abscisse et la densité sèche en ordonnée.
- * validation des courbes en vérifiant que les pénétrogrammes obtenus dans un même moule sont tous identiques.

Par ailleurs la thèse précise brièvement que les essais comparatifs avec le PDG 1000 ont montré une très grande similitude des résultats.

1.4.3. Commentaires

Au début du quatrième chapitre de la thèse sont présentées les formules de divers modèles définissant le volume de sol mis en mouvement lors de la pénétration de la pointe.

Le modèle le plus élaboré, le plus récent, et semble-t-il le plus proche de la réalité, est le résultat des travaux de Biarez (1962) et Grésillon (1970). A partir de ce modèle pour la résistance de pointe, on peut obtenir :

$$q_c = \gamma \cdot D \cdot N_q \left(1 + \frac{\sin \varphi \cos \varphi}{L} \cdot D \right)$$

- avec γ étant la masse volumique
- D étant la profondeur,
- N_q étant un facteur de portance du sol,
- L étant la longueur maximum horizontale du sol sollicité par l'enfoncement,
- φ étant l'angle de frottement interne du sol.

où : $L = B \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\pi + \varphi}{4} \right) \cdot e^{3 \cdot \varphi}$ désigne l'épaisseur du cylindre de sol en mouvement ;

B étant le diamètre de la pointe.

Ce modèle n'est cependant applicable qu'à des matériaux purement frottant.

Si on applique cette formule pour un matériau d'angle de frottement interne de 30° le volume de sol sollicité, ou en tout cas mis en mouvement, lors d'un essai de pénétration, avec une pointe de 2 cm^2 est de $6,86 \text{ cm}$ autour du sondage.

Dans le cas d'un étalonnage dans un moule de grande dimension (35 cm de diamètre minimum selon la norme XP P 94-105) la distance minimum entre deux essais et entre un essai et les parois du moule devrait donc être de $6,86 \text{ cm}$. Les trois essais effectués dans un moule doivent donc être disposés aux sommets d'un triangle compris dans un cercle de $21,28 \text{ cm}$ ($35 - (2 \times 6,86)$) de diamètre. Dans ce cercle il est possible de placer un triangle équilatéral de $10,64 \text{ cm}$ de coté maximum. Ce qui offre la possibilité de disposer trois essais pénétrométriques dans le même moule.

Par contre, pour la surface de pointe supérieure (4 cm^2) pour le PANDA, un moule de 35 cm de diamètre est largement insuffisant. Dans ce cas il faudrait un moule d'environ 55 cm de diamètre minimum.

On notera par ailleurs que cette formule ne tient aucun cas de la taille des éléments mis en jeu lors de la pénétration de la pointe.

1.5. Rapport de stage de C. Coddens sur l'étalonnage du PANDA en laboratoire

Cette étude intitulée *“Contrôle du compactage des barrages en terre au pénétromètre dynamique léger. Mise au point et validation d'un mode opératoire en laboratoire”* a été réalisée au Cemagref d'Aix en Provence par M. C. Coddens en tant que mémoire présenté pour l'obtention du diplôme d'ingénieur du CUST, en juin 1994.

1.5.1. Objectif de l'étude

Cette étude a pour objectif de définir un mode opératoire en laboratoire permettant d'étalonner la résistance de pointe en fonction de la densité. Après définition de ce mode opératoire, il est établi, pour le matériau étudié, et par traitement statistique, une relation mathématique déterminant la densité à partir des mesures de teneur en eau et de résistance de pointe.

1.5.2. Conditions expérimentales

Le matériau utilisé est un limon sableux dont la taille maximum des éléments est d'environ 2mm. Trois moules de dimensions différentes ont été utilisés pour cette expérimentation (diamètre/hauteur : 101,6/117 ; 152/152 ; 207,5/256,5) avec un seul essai de pénétration par moule. Aussi, deux tailles de pointes ont été testées, 2cm² et 4cm². Par ailleurs, des essais ont été réalisés avec ou sans le fond du moule, avec tout autre paramètre constant (moule solidaire d'un support aux caractéristiques équivalentes à celles du matériau compacté).

1.5.3. Les principales constatations

Lors de l'essai de pénétration il est constaté un phénomène de débord du matériau au-dessus du moule dans le cas du petit moule avec les pointes de 2 et 4cm² ainsi que dans le cas du moule CBR (taille moyenne) avec la pointe de 4cm². Ainsi, le rapport entre la taille de la pointe et le diamètre du moule explique l'occurrence d'un débordement du matériau au-dessus du moule. Aussi, la rugosité des parois du moule peut intervenir sous forme d'un frottement empêchant le mouvement du matériau à l'intérieur du moule.

Il a été constaté que le matériau est surcompacté autour de l'orifice de pénétration de la pointe. Aussi, le matériau se referme légèrement autour du train de tige sans cependant provoquer un frottement sur celle-ci.

Les résultats obtenus avec les pointes de 2 ou 4 cm² sont similaires. Il en est déduit ici que l'utilisation d'une pointe de 4cm², dont le débord par rapport au train de tige est supérieur, permet d'éviter les frottements qui surviennent dans le cas d'une pointe de 2cm² au-delà de 1m de profondeur (cas d'une utilisation in situ) et conduit au même résultat.

Les résultats obtenus avec le petit moule sont décalés par rapport à ceux obtenus avec les deux autres dimensions de moule. Ce décalage est attribué à un effet de bord modifiant de façon conséquente les résultats.

Lors de la pénétration de la pointe, la partie supérieure correspond à la mise en forme du signal, résultat de la zone de formation du bulbe de pression. Le signal est déformé en profondeur si le moule est muni de son fond, l'onde de choc se réfléchit sur le fond et vient augmenter la résistance du sol à la pénétration de la pointe. Pour obtenir une partie verticale, et donc exploitable du signal, il faut donc que le moule sans fond soit placé de façon parfaitement solidaire sur un massif de sol aux caractéristiques équivalentes au matériau compacté.

Il a été constaté que l'ajout, lors de l'essai, d'une masse équivalent à 28cm de hauteur de sol sur la surface du moule, permet de diminuer largement la hauteur de mise en place du signal. Cela permet donc d'augmenter la hauteur de signal exploitable.

1.5.4. L'analyse statistique

Cette analyse statistique avait pour objectif d'établir l'existence d'un modèle mathématique déterminant la densité à partir des mesures de teneur en eau et de résistance de pointe. Cette analyse s'est faite à partir des résultats obtenus dans les conditions de mise en œuvre en laboratoire citées ci-dessus comme étant les plus favorables. La densité humide est physiquement liée à la teneur en eau, de fait le triplet (densité sèche, teneur en eau et résistance de pointe) est retenu pour le traitement statistique. Ce traitement conduit à un modèle de régression non-linéaire multivariées.

La normalité des résidus permet de quantifier l'erreur sur l'estimation. Pour un intervalle de confiance de 95%, tout couple de mesure (w , q_d) peut être associé à une valeur de densité sèche estimée à 0,05 près. Le pourcentage de la densité optimale requis par les spécifications du CCTP, majoré de l'erreur introduite par l'estimateur, permet de calculer une résistance de pointe q_d minimale.

Il faut garder en tête que ce modèle est entaché d'une variance résiduelle, relative au matériau étudié. Par ailleurs, il faut s'assurer que les effets de bord ne seront pas présents dans le cas d'un matériau plus grossier.

1.5.5. Commentaires

Dans le cas présent il n'est réalisé qu'un seul essai par moule (moule Proctor, CBR ou perméamètre). Or, si le moule préconisé dans la norme XP P 94-105 est de diamètre largement supérieur (32cm) que celui des moules cités précédemment, le texte normatif indique que peuvent être pratiqués 3 essais dans un seul moule. Malgré tout, si on se réfère aux commentaires de l'étude résumée précédemment (thèse de M. ZHOU) on s'apercevra que théoriquement les bulbes de pression n'interagissent pas.

L'encadrement de la densité sèche à 0,05 près conduit, puisque la densité sèche du matériau à l'Optimum Proctor Normal est de 1,89, à une précision de 2,64 % sur le taux de compactage. Rappelons que, pour un objectif de densification q_4 , les valeurs attendues du taux de compactage sont de 95 % en moyenne et de 92 % en fond de couche.

L'étude statistique s'applique à des données obtenues en laboratoire où les paramètres d'influence peuvent être contrôlés. L'extrapolation à des conditions In situ est-elle envisageable ?

II. ÉTUDES COMPARATIVES

II.1. Etude comparative du CER de Rouen sur le domaine d'emploi des appareils

Cette étude intitulée *“Utilisation des pénétromètres dynamiques en contrôle de compactage - Evaluation des domaines d'emploi en fonction des caractéristiques des appareils et de la granulométrie des matériaux”* a été réalisée par M. Quibel du Centre d'Expérimentation Routière à Rouen en septembre 1999, à la demande et grâce au financement du Service d'Etude Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA).

II.1.1. Objectif de l'étude

“L'objectif est de traduire, sur des matériaux de différentes granulométries, le bruit de fond des pénétrogrammes obtenus avec divers pénétromètres dynamiques, et de chercher à définir le domaine d'emploi approprié en fonction de la taille de l'appareil.”

II.1.2. Description de l'expérimentation

a) Appareils testés

Cinq pénétromètres ont été testés lors de cette expérimentation :

MODÈLE	M* (kg)	M** (kg)	H (m)	Cadence (cp/min)	Longueur des tiges (m)	Diamètre des tiges (mm)	Diamètre de la pointe (mm)	Surface de la pointe (cm ²)	Energie (J/cm ²)
LPC contrôle de compactage	35,2	23	0,75	30	1	40	45	16	16,4
LPC en configuration reconnaissance	64	23	0,75	30	1	40	62	30	15,7
PANDA	Energie variable (M = 2kg)				0,5	14	16	2	
LRS A 30	30	20	0,50	30	1	22	36	10	14,7
LRS A 10	10	20	0,50	30	1	22	25	5	9,8

* M est la masse du mouton,

** M' est la masse morte battue pour une profondeur de 1m.

Tableau 7 : Caractéristiques techniques des pénétromètres dynamiques testés au cours de l'étude

b) Conditions expérimentales

⇒ Matériaux testés

Cinq matériaux de natures différentes ont été utilisés sur cinq planches d'essais différentes :

- Planche 1 : C1B4h, proche th. Grave 0/100 constituée par un tout venant écrêté et homogénéisé au chargeur. Les quelques gros éléments, en faible quantité, sont des silex.
- Planche 2 : B4s. Grave 0/31,5 (matériau semi-concassé silico-calcaire, carrière SNEC).
- Planche 3 : B5h. Grave 0/31,5 enrichie en fines. Il s'agit d'un mélange de la grave précédente et de limons dans la proportion de 3 pour 1 en volume, homogénéisée au chargeur.
- Planche 4 : A1-A2h proche m. Limon naturel.

- Planche 5 : A1-A2m-h. Mélange de limon et de cailloux 20/40 dans la proportion de 4 pour 1 en volume, homogénéisé par brassage au chargeur. Le but est d'évaluer la perturbation de la mesure par les gros éléments, accessoirement par rapport à la planche 4.

⇒ Conditions de mise en œuvre des planches

Chaque planche est compactée avec le même engin (compacteur tandem vibrant classé VT2) et dans des conditions similaires avec :

- couche supérieure : $e = 0,30$ m et $n = 8$,
- couche intermédiaire : $e = 0,50$ m et $n = 8$,
- couche inférieure : $e = 0,70$ m et $n = 12$.

La surface utile de chaque planche est de 8×4 mètres. Les essais sont disposés en quinconce de telle sorte qu'ils s'interpénètrent et que chacun soit éloigné de son voisin d'une distance minimale de 60cm (soit 10 fois le diamètre de la plus grosse pointe ou 6 fois la taille des plus gros éléments de la planche) ce qui correspond à des précautions supérieures à celles précisées dans les normes, ceci afin d'éviter une éventuelle interaction entre les différents essais.

Sur chacune de ces planches 10 essais sont réalisés sur toute la hauteur du remblai (sauf la planche 5 parfois limitée aux 2 couches supérieures) avec chacun des cinq pénétromètres, soit au total 50 essais par planche.

II.1.3. Analyse des résultats

Les résultats expérimentaux ont fait l'objet d'une analyse dans les trois directions suivantes :

- ✱ détermination d'un indicateur lié au bruit de fond d'un pénétrogramme,
- ✱ étude de la dispersion des résultats entre les 10 essais réalisés par un même appareil pour une même planche
- ✱ étude de la dispersion des mesures d'un essai autour de la courbe "lissée" du pénétrogramme correspondant.

Ces analyses et les principales conclusions sont résumées ci-après. En préliminaire, il convient également de rappeler que certains appareils ont connu, pendant la période d'essai, des dysfonctionnements qui n'ont pas tous été réglés avant la fin de l'expérimentation ; ceci a compliqué l'analyse et l'interprétation des résultats.

a) Détermination d'un indicateur lié au bruit de fond d'un pénétrogramme

L'analyse des résultats a consisté dans un premier temps en l'étude du bruit de fond, c'est à dire l'étude des variations de part et d'autre de la ligne moyenne (pénétrogramme lissé). Le bruit de fond est la conséquence de plusieurs facteurs :

- la résolution de l'appareil (supposée a priori faible),
- les erreurs parasites de mesure (rebond de tige à l'approche du refus),
- les hétérogénéités locales du matériau, dues en particulier à la granulométrie. Ce point est en relation avec l'objectif des essais de comparer, lorsque la granulométrie augmente, les bruits de fond des pénétrogrammes des divers appareils.

Pour rendre possible l'analyse il a été défini un indicateur du bruit de fond ayant pour propriétés :

- d'être linéaire, proportionnel aux variations autour de la moyenne,
- d'être "indépendant" de l'énergie de l'appareil,
- d'être indépendant de la situation du pénétrogramme.

L'expression de l'indicateur est :

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - m)^2}{m}}$$

avec,

x_i : valeurs successives de la grandeur mesurée (eci ou qdi),

m : moyenne glissante (estimation de la valeur non bruitée de x_i) calculée sur 7 valeurs

n : nombre de valeurs de eci sur la zone où on détermine le bruit de fond moyen par l'indicateur δ .

m : moyenne globale des valeurs x_i sur la zone considérée.

$$m = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i$$

Une seule valeur de l'indicateur est attribuée par sondage, elle est calculée entre le 4^{ème} choc en surface et la fin du pénétrogramme, avant que celui-ci ne soit influencé par le sol support. La moyenne et l'écart type sont calculés pour les 10 indicateurs obtenus avec un même appareil et un même matériau.

L'interprétation des résultats se fait grâce aux indicateurs moyens de bruit de fond. Cependant, les indicateurs minimums peuvent être plus représentatifs dans le cas des appareils ayant subi des dysfonctionnements.

L'analyse de l'influence du matériau, tout appareil confondu, montre que le bruit de fond (au vu des valeurs minimums de l'indicateur) aurait tendance à croître avec la granulométrie du matériau mais dans une faible proportion dans la gamme des sols testés. Toutefois l'augmentation est plus significative avec le PANDA.

Les résultats permettent de proposer une échelle de l'indicateur (qui serait susceptible de classer le bruit de fond moyen d'un pénétrogramme donné.

I	$\delta \leq 0,30$	bruit de fond faible
II	$0,30 < \delta \leq 0,50$	bruit de fond moyen
III	$0,50 < \delta \leq 1,00$	bruit de fond élevé
IV	$\delta \geq 1,00$	bruit de fond très élevé

Tableau 8 : Echelle du bruit de fond

b) Dispersion des résultats d'un même pénétromètre

La dispersion des résultats obtenus par un pénétromètre sur un matériau donné est abordée sur la base de la comparaison des valeurs moyennes des enfoncements par coup (ou des résistances de pointe) sur toute la hauteur de chaque essai. Le critère retenu est l'écart type σ_1 de ces 10 valeurs moyennes notées $e_{ci\ moy}$.

A partir de cette valeur σ_1 , en notant m la moyenne des $e_{ci\ moy}$ et en supposant la population gaussienne, 95% des $e_{ci\ moy}$ sont théoriquement situés dans l'intervalle $(m-2\sigma_1) - (m+2\sigma_1)$. A partir de cette constatation il est proposé un indicateur r_1 de la dispersion défini par :

$$r_1 = (m+2\sigma_1) / (m-2\sigma_1)$$

Les principales conclusions sont les suivantes :

- pour le pénétromètre à énergie constante (hormis le LRS A 10 dont l'énergie est beaucoup plus faible) les valeurs r_1 sont en moyenne de 1,5.
- pour le pénétromètre à énergie variable cette valeur de dispersion est de 2.
- les matériaux les plus grossiers ne conduisent pas à des dispersions beaucoup plus importantes.

Notons par ailleurs qu'un rapport $r_1 = 1,5$ correspond à une dispersion de +/- 2,5% sur la valeur du taux de compactage T si l'on admet la relation $\text{Log } e_c = -b.T + c$.

c) Fuseau enveloppe d'un pénétrogramme dû au bruit de fond

Le bruit de fond d'un essai est défini sur la base de l'écart type σ_2 des écarts entre les mesures brutes et les valeurs lissées (moyenne glissante sur 7 valeurs). On note à ce sujet la relation $\sigma_2 = \sigma\sqrt{m}$ avec l'indicateur de bruit défini au a).

De la même manière que pour la dispersion des résultats il est proposé un coefficient de "bruit de fond" r_2 défini par :

$$r_2 = (m+2\sigma_2) / (m-2\sigma_2)$$

L'ensemble des valeurs minimums obtenues par type de sol et type d'appareil est compris entre 1,3 et 2,2 , sauf dans le cas de dysfonctionnement systématique de l'appareil sur l'ensemble d'une planche d'essai.

II.1.4. Synthèse des résultats

a) Interprétation des pénétrogrammes

L'interprétation des pénétrogrammes soulève souvent des questions liées au dépassement de la droite limite par le " bruit de fond " (voir la figure ci-dessous).

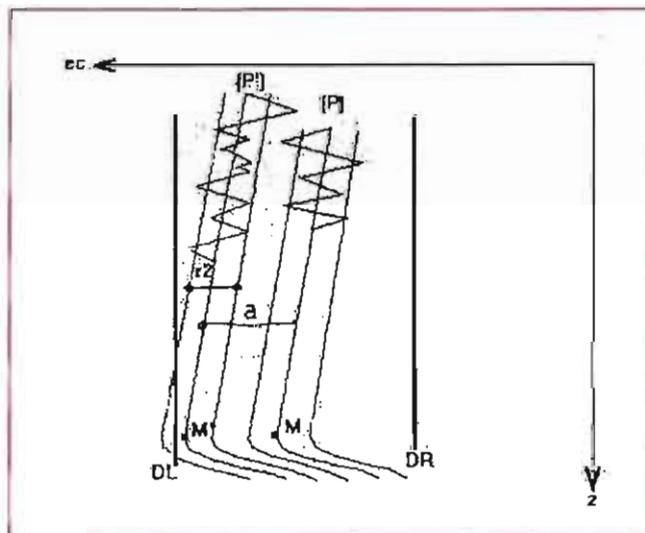


Figure 22 : Interprétation type en fond de couche

Si on considère un pénétrogramme (P) correspondant à la moyenne d'une population de pénétrogrammes. La dispersion des différents pénétrogrammes, au sens des 95% de la population des points de mesure, permet d'envisager l'existence un pénétrogramme (P') distant, en enfoncement par coup, du rapport a ($a = 1,2$ pour $r_1 = 1,5$) par rapport à (P).

Chacun de ces pénétrogrammes présente le même fuseau pour le bruit de fond, exprimé par le rapport $r_2 = (m-2\sigma_2)/(m+2\sigma_2)$.

Ainsi, il est possible que le pénétrogramme (P') présente en fond de couche une ligne moyenne restant dans la zone d'acceptation mais ayant de nombreux points et une partie du fuseau de dispersion au delà de la droite de refus. Cependant, la lecture doit se faire en fonction de la ligne moyenne du pénétrogramme.

Concernant le lissage, il semble que cela soit inutile tant que r_2 est inférieur à 1,5. Il n'apporterait donc un plus que sur des sols grossiers.

b) Comparaison des appareils grâce aux rapports r_1 et r_2

La figure ci-dessous présente un type de graphique permettant de synthétiser les éléments analysés en ce qui concerne le bruit de fond et la dispersion d'une population de points de mesure.

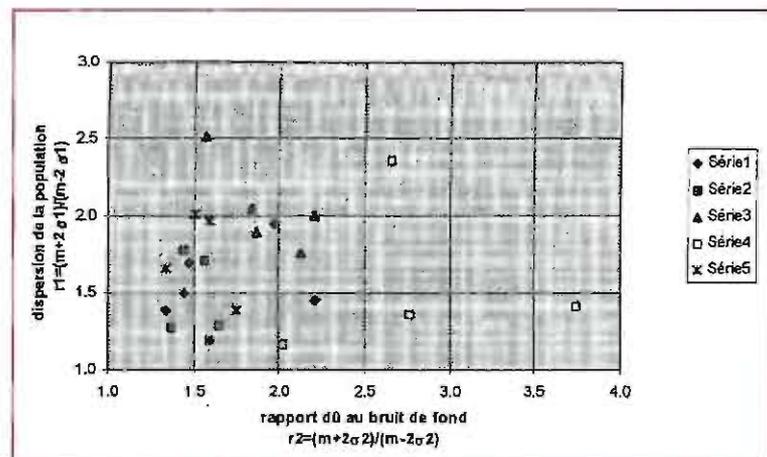


Figure 23 : Représentation de la dispersion d'une population par rapport au bruit de fond.

On note que les valeurs de r_2 supérieures à 2,5 correspondent à un dysfonctionnement de l'un des appareils (à l'état de prototype à l'époque des essais).

II.1.5. Conclusion

La conclusion de cette étude constitue une synthèse explicite des différents résultats obtenus lors de cette expérimentation, ce qui nous conduit à la reproduire quasi in extenso. Bien sûr cela ne signifie pas que ces conclusions fassent office de référence absolue.

“La présente expérimentation a été fortement perturbée par les dysfonctionnements, fréquents, du système de mesure des enfoncements par coup des pénétromètres dynamiques à énergie constante. Une fiabilisation des appareils est donc une action prioritaire à mener.

Il est confirmé par rapport à la norme, que pour les contrôles de compactage, les pénétromètres dynamiques à énergie constante doivent avoir une énergie unitaire de pointe d'au minimum $10\text{J}/\text{cm}^2$. En dessous de ce seuil, ils ne pourraient valablement intervenir que sur des sols à D_{max} inférieur à 50mm [ceci a été mis en évidence grâce aux résultats obtenus avec le LRS A 10 qui présente une énergie de $9,8\text{J}/\text{cm}^2$].

Plus un pénétromètre à énergie constante a une configuration “légère” et plus la dispersion est observée d'une population de points de mesures sur un sol donné est amplifiée par rapport à la dispersion spatiale vraie. Par contre, le bruit de fond n'est pas nécessairement différent.

Le pénétromètre dynamique léger à énergie variable testé a en moyenne à la fois un bruit de fond plus élevé que les pénétromètres à énergie constante fonctionnant correctement, et a également une dispersion des populations des points de mesures plus élevées.

Avec les pénétromètres à énergie constante, le lissage des pénétrogrammes pour atténuer le bruit de fond ne serait une fonctionnalité utile que sur les sols grossiers. Si elle est employée, cela ne doit pas supprimer la consultation du pénétrogramme d'origine pour détecter d'éventuels dysfonctionnements de la mesure, sans les masquer. On peut compléter le logiciel d'exploitation des résultats par le calcul de l'indicateur de bruit de fond à chaque point de mesure, ce qui renseigne sur la qualité de l'essai, et permet de déceler un dysfonctionnement de l'appareil [des valeurs trop élevées sont le signe d'un dysfonctionnement].

Pour les sols dont le D_{max} est inférieur à 50mm, ces pénétromètres ont normalement une bonne capacité de détection des intercouches en fonction A, au sens de la norme, le bruit de fond induisant un fuseau n'excédant pas +/- 20%.

En fonction B, la comparaison du pénétrogramme par rapport à la droite limite est analysée compte tenu des enseignements en matière de bruit de fond et de dispersions. Les bruits de fond provenant des dysfonctionnements de l'appareil sont ceux qui gênent les utilisateurs dans l'interprétation des contrôles, lorsque les altérations du tracé du pénétrogramme peuvent déborder de la droite limite. Ceci implique de considérer la fiabilisation déjà citée comme prioritaire.

La norme fournit comme critère d'arrêt du battage, en dehors de l'existence d'un frottement latéral du train de tige excessif, l'impossibilité de franchissement d'un point dur. Celle-ci est exprimée par la non-obtention d'un enfoncement par coup de plus de 2mm durant 100 coups successifs. Certains cailloux isolés à une cote donnée peuvent être déplacés ou fragmentés, et permettre la continuation de l'auscultation. Par rapport à l'objectif principal des expérimentations, il ne semble pas envisageable d'apporter a priori des critères plus précis, utilisant par exemple les rapports entre diamètres de pointe et diamètre maximal ou moyen des grains du sol, délimitant un domaine d'emploi pour chaque pénétromètre.”

II.1.6. Commentaires

Dans le calcul de l'indicateur du bruit de fond entre en considération la moyenne glissante (estimation de la valeur non bruitée). Elle est calculée ici sur 7 valeurs ($k=3$) ce qui correspond à une épaisseur variable de sol. Une seconde solution aurait été de considérer une fenêtre glissante de taille déterminée (et donc au nombre de valeur variable), afin d'éviter des fenêtres d'extensions verticales trop importantes ? Finalement la question est ici de savoir si la méthode de détermination de cette valeur lissée, c'est à dire la méthode de lissage du pénétrogramme, n'influe pas sur la valeur de l'estimateur.

Un bruit de fond faible n'est pas forcément le signe d'un pénétromètre performant, en effet si l'énergie mise en jeu est trop importante par rapport au matériau testé, l'enfoncement par coup n'est pas adapté et la discrimination peut être trop faible. A l'inverse le pénétromètre LRS A 10 présente, de façon extrêmement répétable le plus faible bruit de fond des appareils testés tout en étant le pénétromètre à énergie constante développant la plus faible énergie de pointe.

L'indicateur de bruit de fond permet de bien caractériser l'ampleur des fluctuations autour du signal lissé, mais ne traduit pas forcément une qualité de résolution de l'appareillage. Une échelle de valeur pour le bruit de fond moyen d'un point de mesure (tableau 8) apporte peu d'aide à l'interprétation des résultats ou à la détermination de la qualité de ceux-ci. Cependant, cet indicateur du bruit de fond peut permettre de déceler une anomalie du matériel de sondage à la condition qu'il soit lié à l'appareil et à la taille des éléments du matériau. On a vu une variabilité dans l'ampleur du bruit de fond entre chaque appareil sans pour autant que le résultat du pénétrogramme lissé ne soit forcément de plus mauvaise qualité (exemple du PANDA très bruité dans certains cas).

Le LRS A 10 développe une énergie unitaire ($9,85 \text{ J/cm}^2$) à peine inférieure à la limite basse de la norme (10 J/cm^2), ce qui se traduit par des dispersions et difficultés de pénétration importantes. La limite inférieure de la norme n'est-elle pas trop basse ?

II.2. Etude comparative du LRPC de Nancy sur le calcaire de Jaumont (5/15mm)

Cette étude intitulée *“Synthèse des résultats d’essais sur les matériaux utilisés en remblayage de tranchée - 5/15 calcaire de Jaumont”* a été réalisée par le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Nancy en février 1996 à la demande et grâce au financement de l’Agence de L’Eau Rhin Meuse, la DRAST et le LCPC.

II.2.1. Objectif de l’étude

Cette étude s’inscrit dans le cadre d’un programme de définition pour la région Lorraine, de fiches de recommandation de mise en œuvre des matériaux de substitution utilisés localement. Cette étude doit prendre en compte l’identification du matériau, ses caractéristiques au compactage, l’objectif de densification, et dans une certaine mesure la réponse de contrôle a posteriori du PDG 1000.

Le présent rapport présente les résultats acquis sur un gravillon 5/15 mm calcaire testé en fosse expérimentale, et comprenant :

- * l’identification des caractéristiques mécaniques et géotechniques du matériau,
- * la mise en œuvre du matériau et son comportement sous-compactage,
- * le contrôle, a posteriori, de la mise en œuvre par différents moyens d’investigation.

II.2.2. Conditions expérimentales

a) La planche d’essai

Elle se présente comme une fosse de 12m de long (dont 9m sont réellement utilisables), 1,50m de large et 2m de hauteur. Les parois sont blindées selon la technique “la Berlinoise”.

Le site baigne naturellement dans la nappe, qui atteint une hauteur maximum en période pluvieuse de 25 cm sous le terrain naturel. L’utilisation de pompes dans des piézomètres situés de part et d’autre de la tranchée permet de simuler les interactions de la nappe avec les résultats de contrôle de compactage.

La planche d’essai a été virtuellement partagée en deux parties où avec le même matériau était visé un objectif q_4 (utilisation d’une pilonneuse) et un objectif q_3 (utilisation d’une plaque vibrante).

b) L’identification des matériaux

Le matériau utilisé est un calcaire couramment employé en travaux de remblayage de tranchées dans la région Mosellane.

La fraction granulométrie testée est celle d’un 5/15 mm. Ce matériau a subi de nombreux essais géotechniques en laboratoire avant et après la mise en œuvre dans la tranchée : granulométrie, Los Angeles, Micro Deval en présence d’eau, la sensibilité au gel, la détermination de la masse volumique sèche, fragmentabilité, essai Proctor normal, valeur au bleu de méthylène.

L’identification fait apparaître que ce calcaire est un matériau fragile et évolutif sous l’effet des chocs et de l’attrition, il est classé R22 après compactage, par la norme XP P 11-300. Cependant cette classification ne suffit pas pour définir les conditions d’utilisation. Il faut prendre en considération sa granulométrie au moment de la mise en œuvre, ce qui le classe dans la catégorie D22 pour les sols naturels.

c) Les essais de pénétration

L'expérimentation a mis en œuvre 3 appareils (PDG 1000, PANDA et le pénétromètre de la norme DIN allemande (Lindenmeyer, nombre de coups pour 10cm)). Dans un premier temps, les pénétrogrammes obtenus avec le PDG 1000 sont comparés aux densités réelles, obtenues avec un gammadensimètre. Puis la comparaison est faite avec les courbes de contrôle du matériau D2. Dans un troisième temps, on a analysé les réponses du PANDA et du DIN en fonction de celle du PDG 1000.

Les résultats obtenus à l'aide du pénétromètre du DIN allemand sont présentés en annexe dans l'étude mais non analysés.

d) Influence de la nappe

La nappe a été rabattue pour la mise en œuvre du compactage, les premiers essais de pénétration ont été réalisés après compactage et sans la nappe, puis le pompage a été arrêté, la nappe est remontée jusqu'à -25cm de la surface, une deuxième série d'essais a été réalisée avec la nappe en position haute. Enfin la nappe a été de nouveau rabattue et une nouvelle série d'essais de pénétration a été menée.

Les dernières étapes ont donc consisté à tester la réponse des pénétromètres lorsque le matériau baigne dans la nappe, puis après un ressuage complet. La phase de ressuage comprend des essais de pénétration 3 jours après le passage de la nappe sous le niveau bas de la fosse.

II.2.3. Observations et conclusions de l'étude

a) Résultats des essais d'identification avant et après compactage

Les résultats de cette partie concernant l'étude de l'action des compacteurs et l'évolution du matériau sous l'action du compactage, mettent en avant que :

- l'objectif a été largement atteint avec la pilonneuse, tandis qu'il n'a pas été atteint avec la plaque vibrante. Ceci en respectant les consignes de compactage données par le guide du remblayage des tranchées pour un sol D2 (conditions moins strictes que pour un matériau classé R22).
- une évolution favorable, dans le cas spécifique de ce matériau, se produit quand le compactage est effectué à la pilonneuse. En effet ce calcaire est friable et le pilonnage engendre la production de fines qui comble les interstices entre les éléments plus gros, ce qui augmente la qualité du compactage et permet également au matériau de se "fermer" correctement en surface.

b) Le contrôle de compactage à l'aide de pénétromètres dynamiques

Les résultats du contrôle au PDG 1000 permettent de tracer un graphique avec des couples (densité sèche ; enfoncement par coup). Une relation linéaire est déduite du graphe à partir de 4 points, elle est de la forme $\log(y) = a.x + b$.

Des conclusions spécifiques au calcaire de Jaumont 5/15 mm sont tirées de cette expérimentation. Les valeurs d'enfoncement limite et de référence en fonction des objectifs de densification sont déterminées pour le PDG 1000.

Les résultats obtenus avec le PANDA (avec une pointe de 2cm²) ont également permis d'établir une relation densité-résistance de pointe, elle est de type polynomial, $y = ax^2+bx+c$. Cette relation est également établie à partir de 4 points de mesure, correspondant à quatre profils pénétrométriques sur la planche d'essai.

Les résultats obtenus avec le PDG 1000 et le PANDA sont comparés en étant rapportés à des valeurs de résistance de pointe. Il en est déduit que les résultats sont sous estimés en résistance de pointe avec le PANDA par rapport au PDG 1000 mais ils restent comparables pour des densités peu élevées. Ici il est spécifié, en référence au guide d'utilisation du PANDA, que l'utilisation doit en être limitée à des matériaux fins, de taille maximum inférieure ou égale à 20mm.

L'étude propose des valeurs limite et de référence qui pourraient s'appliquer à tous types de pénétromètres, et exprimées en MPa, c'est à dire en résistance de pointe et non en enfoncement par coup.

d) Influence de la nappe

Concernant le PDG 1000, en présence de la nappe, le pénétrogramme indique des épaisseurs de couches similaires, cependant les enfoncements par coup sont décalés vers des valeurs plus grandes. L'eau a donc un rôle de lubrifiant facilitant la pénétration de la pointe.

Concernant la zone compactée à la plaque vibrante les valeurs de résistance de pointe baissent de 20 à 40%, tandis que pour la zone compactée à la pilonneuse, la baisse enregistrée varie de 30 à 60%.

Après ressuyage, le PDG 1000 voit son pénétrogramme revenir à sa forme initiale (première série d'essais) sauf pour la zone compactée à la plaque vibrante qui présente encore des zones de résistance dynamique plus faible que lors des premiers essais.

Ainsi le degré de saturation joue un rôle non négligeable sur la réponse pénétrométrique. Il n'a pas été établi de relation entre le degré de saturation et la valeur de l'enfoncement.

Concernant le PANDA les conclusions sont identiques, cependant l'influence est moins marquée.

II.2.4. Conclusion générale de l'étude

Cette étude a permis d'établir, pour le cas spécifique du calcaire de Jaumont de coupure 5/15 mm, et pour l'utilisation du PDG 1000, les valeurs d'enfoncement limite et de référence pour les objectifs q_4 et q_3 , valables pour des profondeurs au-delà de 0,6 m.

Elle a également permis de mettre en évidence que le contrôle de compactage ne peut être significatif que s'il est réalisé en phase terminale du chantier alors que la nappe est encore rabattue par pompage.

II.2.5. Commentaires

Les planches d'essai utilisées pour l'expérimentation sont des fosses artificielles (parois en bois) qui ne retranscrivent pas exactement les conditions réelles de compactage sur chantier. En effet, sur un chantier, le frottement latéral sur les parois de la tranchée joue, par l'effet de voûte, sur l'état de compactage final.

L'expérimentation est faite avec les conditions de compactage correspondant à un matériau R22 qui sont plus strictes que celles correspondant à un matériau D2, mais pourquoi ne pas avoir suivi les recommandations de compactage données par le guide de remblayage des tranchées, en passant par la classification DC1, 2 ou 3. L'expérimentation met en évidence dans ce cas que les conditions de moyen nécessaires pour obtenir un compactage q_3 avec la plaque vibrante ne conduisent pas au résultat souhaité. La classification en DC3 aurait été plus contraignante pour le compactage.

Le fait que le PANDA soit moins influencé par la présence d'eau pourrait-il être expliqué par le fait que cet appareil est doté d'une pointe de section réduite ?

II.3. Etude comparative du LRPC de Nancy sur le calcaire de Jaumont (0/50mm)

Cette étude intitulée *“Synthèse des résultats d’essais sur les matériaux utilisés en remblayage de tranchée - 0/50 calcaire de Jaumont”* a été réalisée par le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Nancy en juillet 1996 à la demande et grâce au financement de l’Agence de L’Eau Rhin Meuse, la DRAST et le LCPC.

II.3.1. Objectif de l’étude

Le présent rapport, comme celui ci-dessus, présente les résultats acquis sur une grave 0/50 mm calcaire, testée en fosse expérimentale et comprenant :

- * l’identification des caractéristiques mécaniques et géotechniques du matériau,
- * la mise en œuvre du matériau et son comportement sous-compactage,
- * le contrôle, a posteriori, de la mise en œuvre, par différents moyens d’investigation.

II.3.2. Conditions expérimentales

Les conditions expérimentales sont identiques à celles de l’étude précédente, à quelques détails près soulignés ci-dessous.

a) La planche d’essai

La planche d’essai est la même que pour la coupure 5/15, cependant la mise en œuvre, du fait d’une granularité plus étendue, est rendue plus difficile. De plus, il a été constaté une forte ségrégation au gerbage par le chargeur. En conséquence, le régalage a été effectué à la pelle afin de diminuer cet effet. Cette disposition n’est certainement pas appliquée en situation “réelle” sur chantier.

Comme précédemment la planche d’essai a été virtuellement partagée en deux parties, cependant ici, pour atteindre l’objectif q_3 , il a été utilisé une pilonneuse, et pour atteindre l’objectif q_4 une plaque vibrante a été employée.

b) L’identification des matériaux

Les dispositions expérimentales sont les mêmes que celles mise en œuvre pour la coupure 5/15mm.

c) Les essais de pénétration

Les dispositions expérimentales sont les mêmes que celles mises en œuvre pour la coupure 5/15mm.

d) Influence de la nappe

Les dispositions expérimentales sont les mêmes que celles mise en œuvre pour la coupure 5/15mm.

II.3.3. Observations et conclusions de l'étude

a) Résultats des essais d'identification avant et après compactage

Contrairement au matériau 5/15mm, le 0/50mm ne présente aucune évolution significative après compactage, ni avec la plaque vibrante ni même avec la pilonneuse. Si ce n'est une fermeture de l'état de surface de bonne qualité dans les deux cas.

Ici il n'est pas possible de savoir si l'objectif de densification est atteint car le gamma-densimètre n'a pu sonder la totalité de l'épaisseur de la couche. Par contre, en ne considérant que les premiers centimètres il peut être constaté que la pilonneuse est a priori plus efficace que la plaque vibrante.

b) Le contrôle de compactage à l'aide de pénétromètres dynamiques

Les résultats des essais au PGD 1000 permettent de comparer l'efficacité des appareils de compactage. Il en ressort que la plaque vibrante reste efficace sur les 15-20 premiers centimètres mais sa capacité de compactage décroît ensuite très rapidement. Par contre la pilonneuse est très efficace et son action se répercute jusqu'en fond de couche.

La comparaison des résultats obtenus avec le PGD 1000 et le PANDA conduit à dire que les résultats du PANDA sont légèrement plus faibles (en résistance de pointe). Cependant, l'effet d'échelle semble ne pas avoir joué alors que l'utilisation de ce matériel est censée être limitée à des sols dont les grains ne dépassent pas 20mm.

d) Influence de la nappe

Les profils obtenus avec le PGD 1000 sur la zone compactée à la pilonneuse sont très peu modifiés par l'influence de la nappe. Ce qui n'est pas le cas des zones moins bien compactées (plaque vibrante). En effet, le pénétrogramme est décalé vers les faibles valeurs de résistance de pointe. L'effet lubrifiant de l'eau est d'autant plus important que le matériau est faiblement compacté.

Les profils réalisés au PGD 1000 après ressuyage de la nappe pendant 14 jours, montrent que les profils reviennent à leur valeur initiale voire même s'améliorent, à la fois dans la zone compactée à la pilonneuse mais aussi dans celle compactée à la plaque vibrante.

De même que précédemment pour le PGD 1000, les profils obtenus au PANDA avant et après la mise en eau, sont très peu différents pour la zone compactée à la pilonneuse et sont décalés vers les faibles valeurs de résistance de pointe dans le cas de la zone compactée à la plaque vibrante.

II.3.4. Conclusion générale de l'étude

Les profils obtenus à la pilonneuse sont très satisfaisants. Par contre les profils obtenus à la plaque vibrante montrent des insuffisances de compactage très nettes essentiellement en fond de couche. La nature du matériau et les effets de ségrégation induisent une qualité du compactage hétérogène au sein même des couches. Selon le type de compacteur les spécifications de compactage sont celles de la classe B3 (pilonneuse) ou de la classe R22 (plaque vibrante).

Enfin, la présence d'une nappe phréatique ne semble pas modifier de façon significative le profil pénétrométrique lorsque le matériau est correctement compacté.

II.3.5. Commentaires

Cette étude met en lumière la difficulté d'application du guide technique sur le remblayage des tranchées pour certains sols particuliers.

II.4. Etude du TRL, United Kingdom

Cette étude intitulée *“PANDA Dynamic Cone Penetrometer Assesment”* a été réalisée par MM. Amor S.J., Burtwell M.H., Turner A.S. du Transport Research Laboratory (TRL), centre d'étude pour les transports routiers en United Kingdom, en février 1999, à la demande de la société Sol Solution.

II.4.1. Objectif de l'étude

L'objectif de cette étude est d'évaluer la qualité de la réponse du PANDA en contrôle de compactage des remblais en tranchée, ainsi que de comparer cette réponse avec celle du TRL DCP (TRL Dynamic Cone Penetrometer).

II.4.2. Conditions expérimentales

a) Matériaux testés

Une canalisation en polyéthylène de 120mm de diamètre est mise en place dans la tranchée, sur un lit de pose de 30mm constitué d'une grave homométrique où les éléments ont une taille de 10mm. Le même matériau est utilisé autour de la canalisation et sur une hauteur de 150mm au-dessus de sa génératrice.

La partie supérieure de la tranchée, soit une hauteur de 900mm, est remblayée à l'aide d'un matériau identifié GSB1 (0/37,5mm) par la classification en vigueur en United Kingdom. Aussi, le compactage se base sur les recommandations du Specification for Highway Works (MCHW 1, 1998). Ce document détermine, comme en France, le nombre de passes et l'épaisseur maximum des couches pour atteindre un objectif de densification. Bien sûr, les recommandations sont dépendantes du matériau et du matériel de compactage.

b) Les planches d'essai

Quatre tranchées expérimentales ont été mises en œuvre avec des conditions de compactage différentes mais toujours avec le matériau décrit ci-dessus et avec le même matériel (pilonneuse de 50Kg).

Les tranchées sont toutes de 450 mm de large et la partie inférieure comprenant la canalisation est identique pour toutes les tranchées. Seule la partie supérieure varie.

- Tranchée 1 : le compactage est réalisé selon les recommandations en vigueur en UK, c'est-à-dire des couches de 150 mm d'épaisseur et avec 8 passes de compacteur.
- Tranchée 2 : les couches sont de 250 mm d'épaisseur et avec 8 passes par couche.
- Tranchée 3 : les couches sont de 150 mm d'épaisseur mais avec 4 passes par couche.
- Tranchée 4 : les couches sont de 300 mm d'épaisseur, avec 2 passes par couche.

La densité réelle est mesurée à l'aide d'un gammadensimètre après compactage de chacune des couches.

c) Les appareils testés

Dans toutes les tranchées des essais de pénétration au PANDA et au TRL DCP sont réalisés en quinconces.

Le TRL DCP est un pénétromètre dynamique utilisant une masse de 8 Kg relevée manuellement et tombant en chute libre d'une hauteur constante de 575 mm. Il est recommandé de noter le nombre de coups correspondant à un enfoncement de 10 mm. Des travaux du TRL ont permis d'établir une correspondance entre les valeurs de pénétration et l'indice CBR (California Bearing Ratio).

II.4.3. Observations et conclusions de l'étude

Il a été montré que les résultats concernant l'épaisseur des couches et la résistance du sol à la pénétration, obtenus avec les deux pénétromètres sur ce matériau identifié GSB1, peuvent être reliés.

Aussi, il a été tenté de calculer des formules de conversion des données du TRL en résistance de pointe comparables à celles du PANDA. Cependant, pour valider les modèles théoriques proposés dans cette étude il serait nécessaire d'avoir plus de données et sur des matériaux différents.

La conversion des données du PANDA en données de la forme du TRL DCP permettrait d'utiliser l'équivalence avec le CBR et ainsi éviter la définition de droites de référence et de refus pour des matériaux non identifiés. Cette piste mériterait d'être explorée plus en détail.

Les résultats permettent de mettre en évidence que le compactage est moins efficace sur les bords qu'au centre de la tranchée. Ceci peut être expliqué par les difficultés de manipulation qui s'ajoutent à l'effet de bord induit par le frottement sur les parois de la tranchée.

L'augmentation de l'épaisseur des couches est un facteur plus défavorable pour l'état de densité final que le nombre de passes du compacteur.

Le GSB1 est un matériau variable qui nécessiterait de plus amples études et essais en laboratoire pour compléter l'analyse statistique sur les correspondances entre résistance à la pénétration et les différents états du matériau.

II.4.4. Commentaires

La correspondance entre résistance de pointe et CBR, et donc la capacité portante du matériau, établie par le TRL mérite une analyse approfondie. En effet il est signalé (Quibel, 1989) que portance et résistance mécanique sont liées par des lois complexes fortement dépendantes du degré de saturation et de la nature argileuse de la fraction fine.

II.5. Etude du Urban Utility Center à New York

Cette étude intitulée "*A soil compaction control technology assesment and demonstration*" a été réalisée par le Urban Utility Center de Brooklyn à New York, avec MM Juran I., Rousset A, en septembre 1999.

II.5.1. Objectif de l'étude

L'objectif de cette étude est de comparer la fiabilité et le rendement de 4 appareils de mesure de l'état de compaction d'un sol. Ces 4 appareils sont le PANDA, le gammadensimètre, le "oil Compaction Meter", et le "Dynamic Cone Penetrometer".

II.5.2. Conditions expérimentales

a) Matériaux testés

Le matériau utilisé en remblayage des tranchées qui ont servi aux essais correspond à un sable classé D1 (XP P 11-300). Dans l'une des tranchées ce sable est mélangé, en proportion volumique 1 pour 1, avec un asphalte recyclé issu de la rénovation d'une rue.

b) Les planches d'essai

L'expérimentation comprend 6 tranchées de dimensions identiques (7m de long et 1,5m de profondeur) mais différemment compactées :

- Tranchée 1 : remblayée avec du sable D1, elle est constituée de 5 couches bien compactées (5 passes par couche)
- Tranchée 2 : remblayée avec du sable D1, elle est constituée de 5 couches faiblement compactées (1 seule passe par couche)
- Tranchée 3 : remblayée avec du sable D1, elle est constituée de 5 couches bien compactées (5 passes par couche) sauf la troisième couche qui n'est pas compactée.
- Tranchée 4 : remblayée avec du sable D1, elle est constituée de 2 couches compactées avec 5 passes par couche.
- Tranchée 5 : remblayée avec du sable D1, elle est constituée d'une seule couche compactée depuis la surface avec 5 passes.
- Tranchée 6 : remblayée avec du sable D1 et de l'asphalte recyclé, elle est constituée de 5 couches bien compactées (5 passes par couche).

c) Les appareils testés

Les appareils utilisés lors de cette expérimentation sont au nombre de 4 :

- le PANDA,
- le gammadensimètre,
- le "soil compaction meter". C'est un capteur électronique, perdu après l'essai, qui est placé dans le sol au fond de la couche et qui indique à l'opérateur quand le maximum de compaction a été atteint pour la couche donnée (lampe témoin qui s'allume). Le dispositif consiste en un capteur piézoélectrique qui produit un voltage proportionnel à l'amplitude de l'onde transmise à travers le matériau. Cette amplitude est dépendante de l'état de compaction du sol.
- le "Dynamic Cone Penetrometer". C'est un pénétromètre dynamique à énergie constante où l'on compte le nombre de coups nécessaires à un enfoncement de 3,25 pouces (environ 8,2 cm). Les normes définissent pour les conditions du site (sable et sa teneur en eau) un nombre de coups de référence correspondant à la densité attendue, par exemple ici 7 coups.

Tous les appareils sont utilisés après la mise en œuvre de chacune des couches et seul le PANDA est utilisé sur la totalité de la profondeur à la fin des travaux de compactage.

II.5.3. Observations et conclusions de l'étude

Les résultats en bref :

- * Tranchée 1 (toute la profondeur est bien compactée) : le PANDA indique un compactage correct, par contre le gammadensimètre indique que le compactage est insuffisant, la densité attendue n'est pas atteinte. Le Soil Compaction Meter, indique que le compactage requis est atteint après seulement deux passes du compacteur. Enfin les résultats au DCP sont en dessous de la référence à atteindre.
- * Tranchée 2 (sous-compactage sur toute la profondeur de la tranchée) : le PANDA indique que le compactage est satisfaisant (pour 2 essais sur 3) tandis que les autres appareils indiquent un résultat non satisfaisant. L'explication peut venir du fait que la densité sèche obtenue sur site avec le gammadensimètre est supérieure à la densité sèche maximum obtenue avec la courbe de l'essai Proctor lors de l'étalonnage du PANDA.

- * Tranchée 3 (seule la troisième couche est sous-compactée) : le PANDA détecte bien la couche sous-compactée, le gammadensimètre également, par contre le Soil Compaction Meter même s'il n'indique pas une bonne compaction pour cette troisième couche (la lumière ne s'allume pas), la lumière s'allume tout de même pour la 4^{ème} couche après seulement 2 passes. Le DCP fournit une réponse négative pour l'ensemble de la tranchée.
- * Tranchée 4 (2 couches épaisses compactées avec 5 passes par couche) : Le PANDA indique que le bas des couches est sous-compacté, et rejette le compactage. Le gamma densimètre par contre indique des résultats corrects du fait qu'il soit limité aux premiers décimètres en surface de couche. Le Soil Compaction Meter s'allume après deux passes du compacteur. Les résultats au DCP indiquent un compactage satisfaisant.
- * Tranchée 5 (une seule couche compactée avec 5 passes) : le pénétrogramme obtenu avec le PANDA montre assez vite que le compactage est insuffisant en profondeur. Le gammadensimètre détecte également une sous compaction de la couche. Le Soil Compaction Meter s'allume après 4 passes du compacteur. Le DCP détecte un compactage insuffisant.
- * Tranchée 6 (sable D1 et de l'asphalte recyclé sur 5 couches avec 5 passes par couche) : tous les appareils concluent à un compactage satisfaisant excepté le gammadensimètre.

En conclusion, après avoir rappelé que l'étude a confirmé l'importance de disposer d'une technique pour le contrôle du compactage, l'auteur met en avant les avantages du PANDA, à savoir :

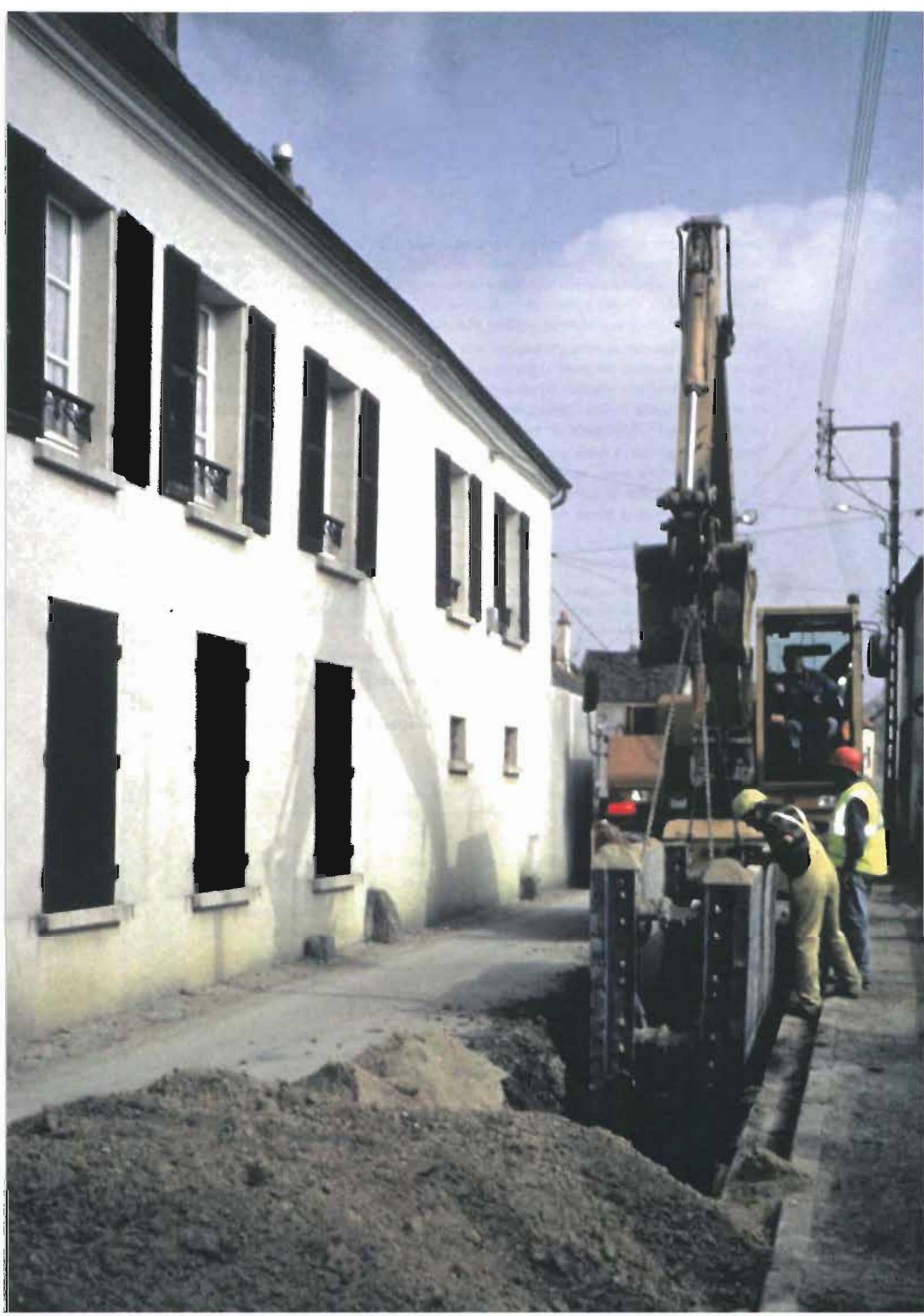
- * simplicité d'utilisation et répétabilité des résultats, qui sont indépendants de l'opérateur,
- * unique appareil testé permettant une utilisation après exécution des travaux et fournissant un profil continu,
- * bonne détection des anomalies de compactage dans le cadre de l'étude réalisée.

II.5.4. Commentaires

D'après les conclusions obtenues pour le PANDA sur la deuxième tranchée, il apparaît assez clairement que les courbes choisies pour l'interprétation ne sont pas adaptées au type de matériau testé.

Au vu des résultats sur la 3^{ème} tranchée, le DCP ne permet la discrimination verticale d'une couche sous-compactée. L'ensemble de la tranchée est rejeté.

Il est intéressant de noter que la limitation du gammadensimètre en profondeur ne lui permet pas de détecter un sous-compactage en bas de couche si celle-ci est trop épaisse.





CHAPITRE V

ÉTAT DES PRATIQUES

Les premiers chapitres du document ont montré que, pour être employé en contrôle de compactage, le pénétromètre dynamique a nécessité de la part des constructeurs, une étude préalable établissant les limites scientifiques, techniques et technologiques d'utilisation. Le résultat est constitué par la rédaction de deux normes qui décrivent les limites dimensionnelles, l'étalonnage, les conditions d'utilisation et la méthode d'interprétation d'un sondage pénétrométrique en contrôle de compactage (XP P 94-063 et XP P 94-105).

Par ailleurs, le contrôle de compactage constituant une technique de sondage in situ, il apparaissait nécessaire de s'intéresser aux conditions d'utilisation sur le terrain, ceci afin de se rendre compte des conditions et contraintes rencontrées lors des essais et de leur impact potentiel sur la qualité de la mesure et la pertinence du procès verbal de l'essai.

D'un point de vue pratique, dans le cas de réseaux d'assainissement, le contrôle de qualité de compactage des remblais de tranchées fait partie des différentes techniques d'inspection des réseaux neufs terminés, préalablement à leur réception. Les contrôles de compactage viennent s'ajouter aux tests d'étanchéité (à l'air et/ou à l'eau) et à l'inspection télévisuelle. Ils complètent ainsi le contrôle de la qualité de mise en œuvre de l'ouvrage inspecté. L'essai de compactage permet de juger de l'environnement immédiat de la canalisation et ainsi, contrairement aux deux autres essais, d'estimer la pérennité du système à long terme.

Afin de se rendre compte des conditions de travail des organismes de contrôle, nous avons contacté un certain nombre d'entre eux et certains ont accepté de nous recevoir sur l'un de leur chantier. Ils nous ont également fait part de quelques remarques concernant leurs conditions de travail.

Nous avons donc visité, de novembre 2000 à mai 2001, 10 chantiers de contrôle répartis sur toute la France. Les principales constatations faites lors de ces visites sont exposées dans ce chapitre.

Il est important de préciser que nous avons garanti l'anonymat de nos observations. De fait, dans ce rapport, les résultats ne sont jamais accompagnés du nom d'une quelconque entreprise, seuls sont restitués des pourcentages, des répartitions géographiques, des observations ou constatations.



I. LES ACTEURS ET LES INTÉRÊTS DU CONTRÔLE

Le **maître d'ouvrage** est la commune, ou la communauté de communes, où sont effectués les travaux. Elle peut être représentée, dans certains cas, par son syndicat des eaux. Elle sélectionne par appel d'offres un maître d'œuvre et lui confie l'étude préalable et la direction générale des travaux.

Le **maître d'œuvre** a en charge la bonne exécution des travaux, de l'appel d'offres jusqu'à la réception. Il est le garant, auprès du maître d'ouvrage, de la qualité, des coûts et des délais.

Le maître d'œuvre est souvent, dans le cas présent, un organisme public : la DDAF ou la DDE. Cependant, l'évolution actuelle tend à ce que les bureaux d'étude privés deviennent les maîtres d'œuvre les plus fréquents.

L'**entreprise de pose** (ou entrepreneur ou "canalisateur") est retenue par le maître d'ouvrage, sous l'assistance technique du maître d'œuvre, parmi les différentes réponses à l'appel d'offres.

L'**entreprise de contrôle** est un organisme qui doit être indépendant de l'entreprise de pose. Cette notion d'indépendance du contrôleur extérieur se limitant en une non-participation à l'autocontrôle de l'entrepreneur (contrôle interne) au niveau du chantier inspecté.

L'entreprise de contrôle interviendra à une ou plusieurs reprises à la demande du maître d'œuvre ou, plus rarement, du maître d'ouvrage.

Les **Agences de l'Eau** subventionnent une part importante des travaux de mise en place de réseaux neufs ainsi que les travaux de réhabilitation de réseaux anciens défectueux. Ces Agences conditionnent l'attribution de leurs subventions à l'exécution de travaux de contrôles de qualité de la pose. Ces travaux de contrôle sont, de façon systématique et obligatoire, les tests d'étanchéité et les visites caméra. Par contre, le contrôle de compactage n'est pas obligatoire, son exigence est variable en fonction des Agences de l'Eau.

Les enjeux financiers liés à la pose d'un linéaire d'assainissement sont importants. Or, la qualité a un coût et les mentalités d'exécution des travaux se doivent de changer pour tirer vers le haut la qualité de pose. Le maître d'ouvrage, via le maître d'œuvre, devra être le moteur de ce changement des pratiques en imposant aux entreprises de pose une reprise systématique des travaux si la qualité de compactage n'est pas respectée. Cependant, pour cela il doit pouvoir s'appuyer sur un moyen de contrôle qui soit fiable et non contestable ; le pénétromètre dynamique peut raisonnablement remplir cette mission, encore faut-il que son utilisation se fasse dans des conditions suffisantes.

II.1. Les recommandations du guide d'accréditation COFRAC

Outre la méthode d'utilisation et d'interprétation des résultats au pénétromètre dynamique, définie par les normes XP P 94-063 et XP P 94-105, il existe un document rédigé par le Comité Français d'Accréditation (COFRAC) : le guide technique d'accréditation. Ce guide COFRAC décrit des règles concernant la manière de mener un contrôle de compactage en tranchée, ceci de sorte qu'il n'existe pas de dérives importantes ayant des conséquences dommageables sur la réponse de l'appareil. Les recommandations du guide doivent être rigoureusement suivies par les entreprises ayant obtenu la dite accréditation, délivrée par cet organisme indépendant. L'objectif est, in fine, de crédibiliser au maximum le test de compactage, afin qu'il soit considéré comme totalement fiable par les maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre et Agences de l'Eau.

Les organismes de contrôle des réseaux neufs d'assainissement effectuent depuis de nombreuses années des tests d'étanchéité et des inspections télévisuelles. Ils souhaitent aujourd'hui qu'il s'instaure des règles déontologiques permettant de valoriser leur travail de contrôle du compactage. Obtenir l'accréditation COFRAC peut constituer un gage de qualité qu'il est possible de promouvoir auprès des décideurs.

Ce référentiel COFRAC décrit donc le déroulement d'un sondage de contrôle de compactage et les dispositions particulières devant être employées. Ce guide technique nous a aidés dans l'élaboration d'une "fiche de visite" des chantiers de contrôle de compactage.

Sont présentées dans la partie ci-dessous les recommandations du guide COFRAC accompagnées de nos quelques commentaires en italique :

La vérification de la qualité du compactage d'une tranchée par la méthode pénétrométrique consiste :

- * à identifier tous les matériaux utilisés dans le remblai (NF P 11-300),
- * à procéder au sondage pénétrométrique (XP P 94-063 ou XP P 94-105)
à interpréter le profil : épaisseurs et comparaison avec les courbes de référence (XP P 94-063 ou XP P 94-105).

II.1.1. Organismes d'inspection

- * La structure de l'organisme de contrôle doit être mentionnée,
L'organisme de contrôle doit être indépendant (aucune mention complémentaire concernant cette notion d'indépendance),
L'organisme de contrôle doit être rémunéré par le maître d'Ouvrage,
- * Le contrôle fait l'objet d'un marché distinct (cahier des charges et consultation),
- * L'organisme de contrôle ne doit pas participer au contrôle interne de l'entreprise "canalisatrice", (ce critère est considéré de manière distincte du critère d'indépendance donné ci-dessus),
- * L'organisme de contrôle doit compter en son sein des personnes connaissant objectif et méthode de l'essai, et capables de l'interprétation des résultats, ainsi que des techniciens ayant des connaissances techniques et de l'expérience.

II.1.2. Procédure générale de réalisation des essais

- * Le contrôle de compactage est réalisé après remblayage et avant l'épreuve d'étanchéité et test caméra,
- * Plusieurs interventions sont possibles à la guise du maître d'œuvre,
- * Les résultats sont communiqués au maître d'œuvre,
- * Après traitement d'insuffisances signalées, il doit être procédé à un nouveau contrôle au niveau de la zone incriminée,

Le surcoût résultant de ces contrôles supplémentaires est imputé à l'entreprise, l'entreprise de contrôle soumet à l'accord du maître d'œuvre le type de matériel prévu pour les contrôles.

11.1.3. Implantation des sondages

L'implantation et le nombre de points de contrôle sont déterminés par le maître d'œuvre et en présence du responsable de l'entreprise de contrôle,

Le maître d'œuvre doit préciser au contrôleur la position de tout obstacle ou difficulté éventuels, il doit également positionner les points de sondage à environ 15 cm à l'extérieur des plans verticaux tangents à la canalisation,

La distance maximale entre deux points est de 50 m pour les réseaux gravitaires et 100 m pour les réseaux sous pression,

Il doit être effectué un contrôle sur chaque tronçon limité par deux regards.

11.1.4. Profondeur des sondages

Jusqu'au niveau inférieur du lit de pose, ou 0,40 m dans le terrain naturel à la demande du maître d'œuvre.

11.1.5. Identification des matériaux

Trois cas existent :

Essais d'identification, au cours des travaux, par l'organisme de contrôle, avec vérification nécessaire de la teneur en eau si les conditions sont trop différentes entre identification et contrôle (action d'une nappe, conditions météorologiques...)

Essais d'identification fournis au contrôleur par le donneur d'ordre (*le donneur d'ordre bénéficie-t-il de renseignements complets, notamment vis à vis de la teneur en eau ?*),

Prélèvements effectués par l'organisme de contrôle à proximité du sondage afin que puisse être effectuée l'identification.

La notion de position centrée ou marginale du matériau dans la classe apparaît-elle sur le procès verbal d'identification du matériau selon la NF P 11-300 ?

11.1.6. Mise en œuvre de l'essai

Prendre garde à l'accessibilité pour l'emplacement du sondage,

Respecter le matériel d'acquisition du pénétromètre dynamique (chaleur, humidité...) (*Sont-elles fournies avec l'appareil ?*),

- Utilisation pour des sols de granulométrie maximum de 100/150 mm pour les pénétromètres à énergie constante,
- Utilisation pour des sols de granulométrie maximum de 50 mm pour les pénétromètres à énergie variable,
- La profondeur d'action est comprise entre 10/20 cm et 5 m, au-delà il faut être vigilant à propos du frottement latéral et de l'inclinaison du mât,
- L'inclinaison maximale tolérée est de 2% par rapport à la verticale (*aucun dispositif de mesure disponible sur les appareils*),
- Le frottement latéral doit être admissible ; il est mesuré à chaque ajout de tige après 2 m de profondeur,
- L'appareillage doit être vérifié tous les mois ou tous les 300 m linéaires de pénétration (rectitude des tiges, diamètre de la pointe, hauteur de chute, dispositif de mesure de l'enfoncement par coup et de la profondeur) (*Comment doit être effectué le contrôle de la mesure de l'enfoncement par coup ?*).

II.1.7. Exploitation des résultats

L'exploitation des résultats est réalisée à partir des valeurs limites correspondant aux pénétrogrammes constituant les cas types.

Les éléments à connaître pour l'interprétation :

- * La classification des matériaux (NF P 11-300),
- * L'état hydrique du matériau au moment du contrôle,
- * L'objectif de densification défini pour chaque zone (NF P 98-331).

L'utilisation des valeurs de référence relatives au matériau obtenues sur planche d'essai (fonction C) sont prioritaires, pour l'interprétation, sur les valeurs de la classe du matériau (fonction B).

II.1.8. Interprétation

Il existe 4 cas d'anomalies décrits dans les normes XP P 94-063 et XP P 94-105 par gravité croissante. Ces cas d'anomalies sont décrits en fonction des surépaisseurs des couches de compactage et de la hauteur de dépassement de la courbe limite.

II.1.9. Rapport de contrôle du compactage

Le rapport comporte :

- * Les références et nom de l'entreprise de contrôle,
- * Les références du chantier,
- * Les procès verbaux d'identification des matériaux de remblai,
- * La référence de l'appareil de contrôle,
- * La date et le nombre d'essais réalisés,
- * Le schéma du réseau contrôlé,
- * Les pénétrogrammes (avec conditions d'essai, profondeur atteinte et valeurs de référence),
- * La synthèse détaillée stipulant la conformité ou la non-conformité des résultats (avec mention du cas d'anomalie rencontré), *[Rq : la limite de non-conformité n'est pas définie. La conformité ne peut être définie par la seule détection d'un cas d'anomalie : en effet, le cas d'anomalie n°1 (surépaisseurs de couche sans dépassement de la droite limite) ne peut être raisonnablement considéré comme correspondant à une non-conformité].*
- * Une synthèse générale de tous les essais réalisés.

II.2. La fiche de visite

On trouvera en annexe la fiche de visite telle que nous l'avons conçue pour être remplie sur le terrain au moment de notre visite du chantier.

III. LES RÉSULTATS ET OBSERVATIONS

Les commentaires recueillis tant sur le chantier qu'au cours de discussions ou échanges téléphoniques, permettent de se rendre compte des conditions habituelles de travail des contrôleurs et d'en tirer un certain nombre de constatations.

Il est nécessaire de souligner que sont souvent mis en avant les défauts ou inconvénients rencontrés aux cours de chantiers ayant posé des problèmes, tandis que les travaux effectués de façon correcte n'attirent pas ou peu l'attention de l'observateur.

III.1. Répartition géographique des visites de chantiers

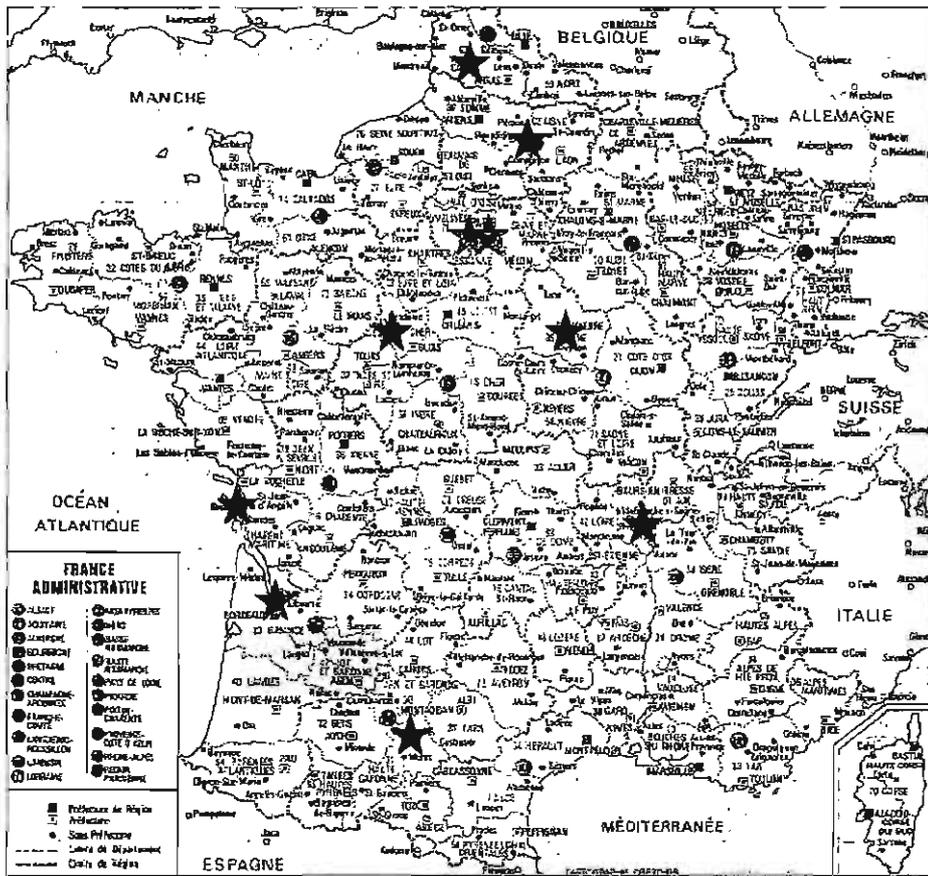


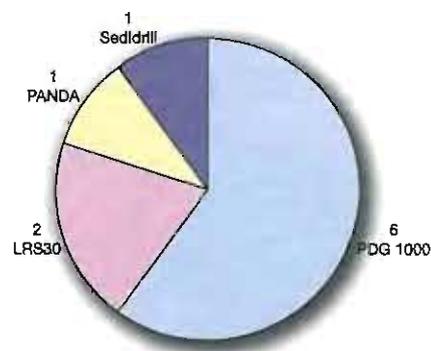
Figure 24 : Implantation géographique des visites de chantier pour l'état des pratiques.

III.2. Résultats de l'enquête

Sur les représentations graphiques en secteurs ci-dessous, sont indiqués les nombres de cas rencontrés (sur 10 visites au total).

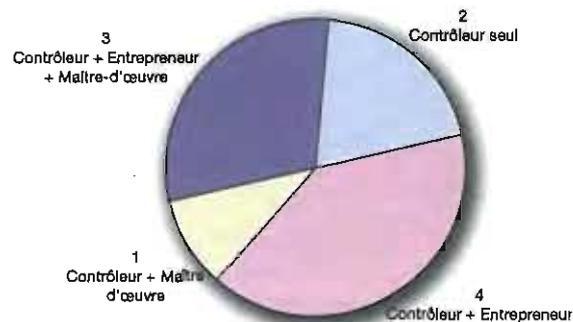
III.2.1. Synthèse des résultats et commentaires

a) Pénétromètre dynamique utilisé



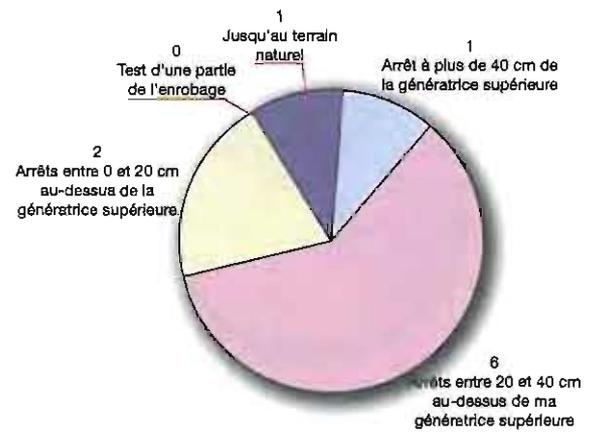
De nombreux entrepreneurs possèdent un Panda pour effectuer leur autocontrôle mais, sur la plupart des chantiers visités, le contrôle extérieur était réalisé à l'aide d'un PDG 1000.

b) Implantation des sondages



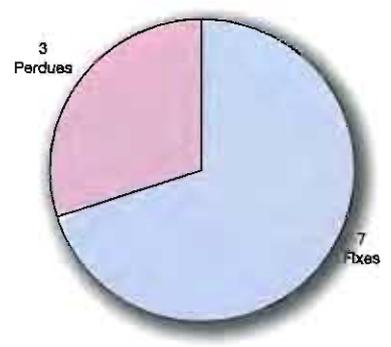
Le maître d'œuvre est souvent présent lorsqu'il relève des services techniques de la ville (il est donc également maître d'ouvrage). Malgré tout, les contrôleurs sont encore très souvent seuls ou avec l'entrepreneur uniquement lors de l'implantation des sondages. Seulement dans 3 cas sur 10 l'ensemble des intervenants est présent.

c) Arrêt du sondage par rapport à la canalisation



Seul le maître d'œuvre ou le maître d'ouvrage peut prendre la responsabilité d'un test jusqu'au terrain naturel. Dans ce cas de figure, la présence de l'entrepreneur paraît indispensable. Dans la pratique, les essais sont toujours arrêtés quelques décimètres au-dessus de la conduite; l'enrobage n'est pas testé.

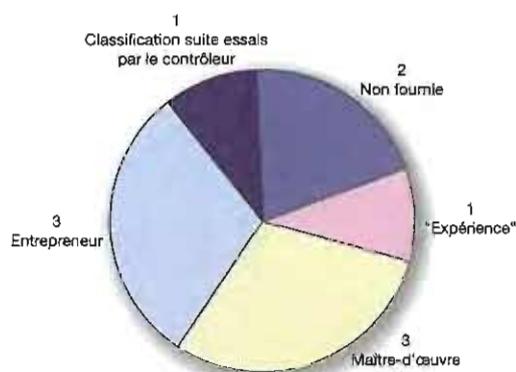
d) Pointe fixe ou pointe perdue ?



Selon les recommandations des normes XP P 94-063, les pointes doivent être perdues pour des sondages au-delà de 1 m de profondeur. Cependant, des pointes fixes sont parfois utilisées par certains contrôleurs quelle que soit la profondeur, tandis que d'autres utilisent systématiquement des pointes perdues de sorte à faciliter l'extraction du train de tiges.

NB : D'après MM. Gourvès (CUST) et Quibel (CETE), l'usure de la pointe n'influe pas sur les résultats du sondage, dès lors que la section de la pointe est respectée.

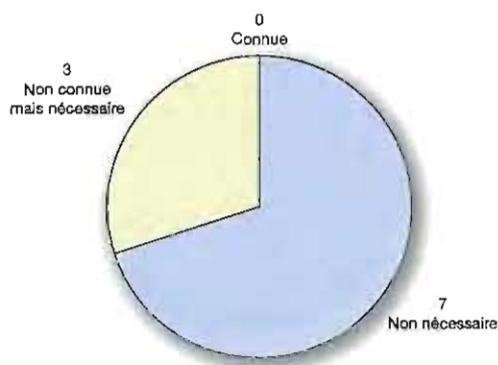
e) *Origine de la classification GTR*



Ce graphique rend compte de la personne qui a fourni au contrôleur la classification GTR du matériau compacté. Cependant, dans la très grande majorité des cas, l'origine réelle de cette classification est le carrier (fournisseur du matériau).

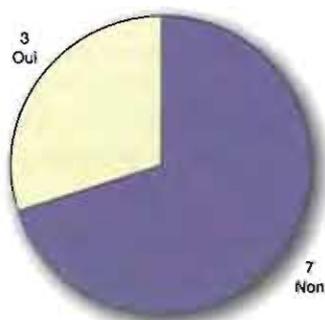
Le cas de classification dit "expérience" est un cas de chantier pour lequel la classification a été choisie par le contrôleur par rapport aux matériaux habituellement employés dans le secteur.

f) *Teneur en eau au moment du contrôle*



Seul un prélèvement de matériau permettrait de garantir la valeur de la teneur en eau au moment du contrôle.

Un prélèvement lors de la mise en œuvre peut suffire s'il n'y a pas présence d'une nappe et si les conditions climatiques ne sont pas extrêmes avec un délai important entre le prélèvement et le contrôle.

g) *Présence de la nappe*

Les contrôleurs ne s'interrogent pas sur la présence de la nappe, pourtant détectable sur le train de tiges. Sa présence pourrait être spécifiée sur le procès verbal de l'essai. La cote de la surface piézométrique au moment du contrôle pourrait être mesurée simplement à l'aide d'une sonde piézométrique glissée dans le trou du sondage.

h) *Matériau employé en remblai*

Les matériaux excavés sont très rarement réemployés en remblai : aucun cas lors de nos visites alors que certains matériaux auraient pu l'être.

III.2.2. Compte rendu succinct des visites

⇒ Visite n° 1

Lors de cette visite, les conditions de travail du contrôleur se sont avérées difficiles. En effet, sur la totalité du linéaire à tester, qui pouvait être divisé en deux parties distinctes, l'une sur une route départementale et l'autre dans un chemin menant à un lotissement, seules quelques dizaines de mètres étaient "disponibles" pour le contrôle. Les travaux dans le lotissement n'étaient pas achevés et, au niveau de la RD, seule une partie était accessible, l'autre étant sujet à des travaux de pose de l'enrobé. La partie testée a fait l'objet de deux sondages, le revêtement enrobé y était déjà en place.

L'implantation des deux sondages est effectuée par l'organisme de contrôle avec une estimation de la profondeur de la canalisation grâce à une extrapolation des profondeurs au niveau des raccordements dans les regards. Le plan de récolement fourni par le maître d'œuvre ne présente que les réseaux neufs ; il existe donc un risque éventuel d'endommagement des réseaux anciens. La conséquence directe est l'arrêt du second essai après simplement 40 cm de sondage, suite à la rencontre d'un point dur non identifié. La détection des réseaux anciens se fait grâce au repérage des sorties de raccords des maisons et l'examen des regards ou boîtes de raccordement, mais le risque reste conséquent. Un détecteur de métaux est souvent employé.

Il est à noter que les sondages ont traversé l'enrobé sans faire l'objet d'un avant trou ; l'essai démarre donc à la surface de l'enrobé.

Par ailleurs, le frottement latéral n'est pas mesuré, pourtant, une vérification à la clé dynamométrique est recommandée au delà de 2 m de profondeur (ici profondeur inférieure à 2 m). La clé n'est pas disponible.

D'après les constructeurs, le frottement latéral reste négligeable tant que la profondeur de sondage est inférieure à 2 m et tant que la verticalité du mât est respectée. Dans ce sens, nous avons noté, à la fin de l'essai, à la sortie de la pointe, qu'il existait un léger décalage entre la position du trou de l'essai et la pointe, alors placée juste au-dessus de celui-ci. Ceci constitue la preuve d'une déviation du train de tige ayant sûrement engendré un frottement latéral dont l'ampleur et l'influence n'ont pas pu être déterminées.

Après informations complémentaires prises auprès de la société de contrôle, le maître d'œuvre n'a pas désiré obtenir le procès verbal de l'essai. La raison invoquée a été que l'enrobé avait été posé.

⇒ Visite n° 2

Ce chantier de contrôle correspondait à la vérification de la qualité du compactage après des travaux de décaissement, suite à la détection d'une zone défectueuse lors du précédent contrôle.

L'essai au pénétromètre dynamique montre que le décaissement du matériau de remblai a été réalisé sur une épaisseur de 0,80 à 1,00 m et suivi d'un compactage au bas du décaissement puis d'une mise en œuvre correcte jusqu'à la surface. Cependant, force est de constater qu'il existe toujours une zone sous-compactée après quelques centimètres sous la surface de décaissement, ce qui implique que la zone proche de la canalisation est restée de densité identique. De plus, l'essai étant stoppé 0,5 m au-dessus de la génératrice supérieure, il est impossible de connaître la qualité de densité dans l'environnement immédiat de la canalisation dont on sait qu'il est le plus important pour la pérennité du réseau.

Par ailleurs, la classification des matériaux a été fournie par l'entrepreneur qui la tenait lui-même du carrier.

Un point important concernant ce chantier est une pratique ne correspondant pas à l'utilisation normalisée du pénétromètre dynamique et qui peut constituer une source de problèmes : les modalités de compactage ont été déterminées, au niveau de planches d'essais, de telle sorte à satisfaire le contrôle de compactage. L'essai au pénétromètre dynamique ne peut servir d'étalonnage à la pratique du compactage. Le Guide du Remblayage spécifie les modalités de compactage et seules celles-ci doivent déterminer

la façon dont un compactage correct doit être effectué. En effet, il est plus sûr, pour atteindre un objectif de densification, d'appliquer strictement les modalités de compactage dictées par le fascicule 70 que de vérifier la concordance avec les droites du test de compactage.

L'entrepreneur sur ce chantier justifie un non-compactage de la zone proche de la canalisation par un risque de flambement (flaches) et d'ovalisation, voire de casse de la canalisation, si le compactage est effectué trop près. Ce qui conduit dans ce cas à un test négatif à la caméra.

Par ailleurs, l'organisme qui effectue le contrôle dispose du matériel nécessaire pour l'identification des matériaux de remblai, mais la proposition d'une identification du matériau au moment du contrôle lui est systématiquement refusée par le maître d'œuvre.

Le procès verbal de l'essai nous a été transmis, à quelques jours près, en même temps qu'au maître d'œuvre, c'est à dire 3 mois après les travaux de contrôle. Par ailleurs, l'interprétation des résultats des essais ne fait en aucun cas référence aux cas d'anomalies définis dans les normes XP P 94-063 et XP P 94-105.

Ici un essai pénétrométrique est jugé non conforme si plus de 50% de la hauteur testée se place dans la zone défavorable, c'est à dire à gauche de la droite limite : il n'est donc tenu aucun compte de la valeur de dépassement ("largeur" de dépassement à gauche de la droite limite).

⇒ Visite n° 3

Au niveau de ce chantier, devait être contrôlé le remblai d'une tranchée comportant une canalisation de collecte des eaux usées. Cependant, la présence d'une canalisation de refoulement au-dessus de la canalisation d'assainissement a empêché que le sondage ne descende au-dessous des 70 premiers centimètres qui correspondent à la profondeur de la canalisation de refoulement, avec une marge sécuritaire de 20 cm. La zone testée est donc loin d'être suffisante pour être quelque peu représentative de l'état de compactage du remblai.

Par ailleurs, au cours de ce chantier, il a été possible d'entendre cette phrase de l'entrepreneur "on m'a dit que le compactage du fond de tranchée n'est pas important".

⇒ Visite n° 4

Ce chantier de pose correspondait à un renforcement de réseau existant. La canalisation posée sera utilisée en soutien de la canalisation existante, présente de l'autre côté de la rue. Les conditions de pose et de contrôle sont donc identiques à celle d'une réception de pose de réseau neuf.

L'originalité du contrôle est constituée par le fait que le maître d'œuvre est lui-même contrôleur. Son parti est donc de se présenter sur le chantier à n'importe quel moment des travaux et à plusieurs reprises pour y effectuer son test de compactage.

La partie contrôlée était difficile à travailler car de nombreux autres réseaux traversaient la tranchée et le travail devait être fait avec l'utilisation d'un blindage, remplacé en certains endroits par des palplanches (manque de place) et donc retirées à la fin du remblayage complet de la tranchée.

Le jour du contrôle, une vingtaine de mètres était découverte, les dix premiers mètres étaient en cours de remblayage et les autres étaient remblayés jusqu'à 70 cm en dessous de la surface de la chaussée. Ce point est a priori peu dérangent dans le cas d'un contrôle concernant la canalisation. Il faudra cependant prendre garde à ajuster la répartition des objectifs de densification sur la hauteur du remblai lors de l'interprétation.

Nous avons pu constater que l'engin de compactage n'était pas présent sur le chantier : il était en "cours de réparation". Le contrôle concernant la hauteur de remblai testée s'est avéré négatif, en dépassement de la droite limite sur pratiquement toute la hauteur.

Après le contrôle par le maître d'œuvre, il a été procédé à un sondage jusqu'au terrain naturel. Le pénétrogramme fait alors ressortir la transition entre l'enrobage et le matériau de remblai, la hauteur du début du compactage et la transition entre lit de pose et terrain naturel. Aussi, les parties communes de deux pénétrogrammes sont similaires, ce qui permet d'avancer à la fois une certaine répétabilité du pénétromètre utilisé ainsi qu'une similitude de densité entre le centre et le bord de tranchée, ceci malgré le travail rendu plus difficile par la présence du blindage.

Il est à noter également que le matériau excavé paraissait de bonne qualité (sableux) et dans un état d'humidité tel qu'il aurait pu être utilisé en l'état pour le remblayage. Dommage que des dispositions n'aient pas été prises dans ce sens.

➔ Visite n° 5

Ce chantier consistait en un remplacement d'un réseau ancien suite à une étude diagnostic du réseau de la ville. Le réseau ancien, en grés, présentait des contre-pentes et faïençages importants.

Les travaux de remblayage ont été effectués avec un matériau de recyclage, un mâchefer, issu de l'incinération d'ordures ménagères, dont le chef de chantier nous a dit qu'il avait eu du mal à le mettre en œuvre durant la deuxième semaine des travaux où le temps était pluvieux. Sur le chantier, une partie non recouverte par la grave bitume fait apparaître un matériau sensible à l'eau avec une ornière importante suite au passage d'un camion.

Ce défaut d'humidité à la mise en œuvre apparaît au niveau des pénétrogrammes de contrôle. Les tests montrent une qualité de remblayage diminuant au fur et à mesure de l'avancement des travaux (contrôles dans le sens d'avancement). Le pénétrogramme se décale de plus en plus vers la gauche en fonction des conditions climatiques défavorables.

Le contrôleur considère ce matériau comme de la grave, il déterminera sa classification au bureau à l'aide d'un tableau faisant la correspondance entre son analyse de visu et la classification. Pour l'interprétation, il a considéré les droites limites et de référence en DC2 pour les 15 premiers centimètres (ce qui est correct) puis du D2 (grave alluvionnaire propre insensible à l'eau) pour le reste du remblai. En se renseignant directement auprès du carrier fournisseur, nous avons pu savoir que le matériau utilisé en remblai était un F6 assimilable B3. Cette démarche, simple et rapide, n'a été menée ni par le contrôleur ni par le maître d'œuvre. Aussi, le chef de chantier avait également à sa disposition, sur le chantier, la fiche technique du matériau.

La conséquence est que le test a été interprété avec des droites plus "exigeantes" (c'est-à-dire situées plus à droite sur le pénétrogramme), ce qui peut engendrer une conclusion erronée de non conformité.

Il est à noter que le matériau employé était le même sur tout le linéaire de tranchée ausculté ; cependant les droites placées sur le pénétrogramme font état d'un DC2 avec dans un cas du D2... (étourderie ?).

Soulignons aussi qu'un matériau B3 est une grave silteuse généralement insensible à l'eau (GTR), ce qui n'était pas du tout le cas du matériau présent sur le chantier visité.

L'assimilation ne peut donc pas être considérée comme fiable, du moins dans le cas présent.

Par ailleurs, le procès verbal des essais nous a été transmis dans un délai assez court : moins d'une semaine après le contrôle. Le document rappelle les cas d'anomalies comme définies dans les normes XP P 94-063 et 105, et définit une limite de non conformité à partir du cas d'anomalie n°2, ce qui apparaît comme étant une interprétation acceptable. Cependant, il n'est présent sur le PV aucune conclusion ou interprétation pour les pénétrogrammes ; ils sont fournis tels quels avec les droites sans même l'interprétation du cas d'anomalie.

Enfin, le pénétromètre dynamique employé sur le terrain présentait deux défauts qui semblent importants. Le premier, lorsque la densité du matériau est importante, le rebond du mouton est conséquent. Le second, l'énergie mise en jeu est telle que les enfoncements, en présence d'un matériau de faible densité et de faible résistance de pointe, peut atteindre 10 à 20 cm par coup. Malgré tout, cet appareil met en jeu une énergie correspondant à la fourchette autorisée par les normes.

⇒ Visite n° 6

Ce chantier de contrôle correspondait à un troisième test de compactage au niveau d'un tronçon pour lequel les deux premiers contrôles s'étaient révélés négatifs. C'est donc après le compactage initial puis deux reprises du compactage que le sondage au pénétromètre dynamique s'est effectué.

Les trois interventions de l'entreprise de contrôle sont le résultat de procès verbaux intermédiaires transmis dans un délai assez court aux services techniques de la ville. Les travaux de pose se déroulaient dans un contexte favorable pour une reprise du compactage dans le cas de non conformités. En effet, la rue était bloquée pendant une période assez longue (2 à 3 semaines).

Il est à noter, pour ce chantier, l'utilisation d'un sablon pour le remblai, matériau sensible aux migrations de fines, ce qui peut engendrer la création de cavités synonymes de désordres pour la canalisation. De plus, ce matériau classé B2 (classification fournie par la ville) est considéré comme sensible à l'eau ; or, il a fait l'objet d'un compactage hydraulique ! La teneur en eau au moment du contrôle, primordiale pour l'interprétation dans le cas d'un matériau sensible à l'eau, n'est pas connue du maître d'œuvre qui ne peut la fournir au contrôleur. Notons ici qu'un prélèvement au moment de la pose aurait permis d'avoir une idée assez proche de la réalité du contrôle, la teneur en eau n'évoluant que très lentement lorsque le matériau n'est pas soumis à des facteurs d'influence (temps pluvieux ou très sec et venté, ou en présence d'une nappe) ou encore s'il y a eu compactage.

Le parti a été pris de considérer un état hydrique "m" (recommandations du service technique de la ville).

⇒ Visite n° 7

La visite s'est déroulée dans un hameau situé en contre bas de la rue principale. Les travaux connectent le hameau grâce à deux canalisations de faible longueur et le raccordent au réseau principal grâce à une canalisation et des pompes de refoulement.

Sur ce chantier, la nappe est proche de la surface et la tranchée en 0/31,5 sert de drain au terrain naturel. La présence de la nappe peut être repérée sur le train de tige, elle se situe à 60 cm de la surface ; la mesure de la profondeur s'est faite sous notre initiative. Par ailleurs, aucune remarque n'est faite, sur le procès verbal, par rapport à la présence de la nappe.

⇒ Visite n° 8

Ce chantier de contrôle correspondait à la réception de la pose d'un réseau neuf.

Le matériau de remblai au niveau du lit de pose, de l'enrobage et en partie inférieure de remblai est un sable, compacté à la plaque vibrante avec une distance de sécurité de 50 cm par rapport à la canalisation du fait que celle-ci est en grès (matériau cassant) (les distances minimales préconisées par le Guide du Remblayage sont de 0,25 à 0,40 m dans le cas de plaques vibrantes jusqu'à 55 cm pour les pilonneuses). Le haut de la partie inférieure du remblai et la partie supérieure de remblai sont compactés avec un compacteur plus lourd : rouleau à bandage lisse de petite taille. La partie supérieure de remblai est constituée d'un 0/40 calcaire dans lequel le pénétromètre a montré une tendance à une déviation du train de tige. L'entrepreneur, présent au moment de l'implantation, n'a manifesté aucune réticence à un test de l'enrobage. Il était sûr de la mise en œuvre ; il n'existait donc d'après lui aucun risque d'endommagement de la canalisation. Il faut tout de même signaler que la largeur de tranchée était ici assez importante (environ 1,00 m à 1,20 m).

Il est possible de noter que le matériau, qui était un sable propre, est classé B2 (sable argileux peu argileux) de teneur en eau "th", ce qui bien sûr est moins exigeant qu'un classement en B1.

Le contrôle s'est avéré positif sur toute la hauteur du remblai jusqu'à quelques centimètres sous la dernière surface de compactage à partir de laquelle la résistance chute pour dépasser la droite limite juste après la génératrice supérieure de la canalisation (classement en B2 th).

Il est important de signaler que l'entrepreneur savait qu'il allait être contrôlé, de fait il a sûrement soigné sa mise en œuvre.

⇒ Visite n° 9

Ce chantier de contrôle intervient dans le cadre d'une nouvelle tranche de pose de réseau neuf dans une commune rurale.

La majeure partie des tronçons testés ont fait l'objet d'une réfection provisoire en enrobé. Point positif : quelques tronçons se situent sous l'accotement mais ont été compactés comme les parties sous chaussées.

L'identification des matériaux de remblayage des tranchées, qui proviennent d'une carrière, a été réalisée par le contrôleur lors de la première tranche de travaux quelques années auparavant ; aucune nouvelle identification, ni mesure de teneur en eau ne sont prévues pour cette tranche. Le contrôleur indique que, dans la région, les matériaux B1 et B2 sont les plus employés.

La pratique locale, lorsqu'un essai conclut à un compactage insuffisant, est de refaire un essai pénétrométrique à 1 m du précédent ; ce n'est qu'après 3 essais " non conformes " que l'anomalie est signalée.

► Visite n° 10

Il s'agit de la troisième tranche d'un chantier d'assainissement d'une commune rurale.

Les travaux sont terminés depuis environ 1 mois et la chaussée a été refaite de manière provisoire. Cette couche superficielle est très résistante : un sondage pénétrométrique n'a pu être réalisé faute de pouvoir traverser la couche de roulement, ni avec le pénétromètre, ni avec une foreuse.

La classification des matériaux de remblai est donnée par l'entreprise sans précision sur l'origine des Informations ; en particulier, bien qu'aucune teneur en eau n'ait été effectuée, le matériau de type B5 est classé "h" par l'entreprise (sans autre justification que la présence d'une nappe en partie des travaux).

Les matériaux de remblai fréquemment utilisés dans la région sont de type B (B1, B2 et B4 à B6) selon le contrôleur. Par ailleurs, celui-ci précise que les essais sur les flancs de la conduite (enrobage) sont très rares.

IV.1. Contrôle de l'enrobage et du lit de pose

Le bon compactage du remblai d'une tranchée d'assainissement permet d'assurer la pérennité à long terme de la canalisation, ce qui constitue une économie financière non négligeable car permettant d'éviter les travaux de réhabilitation ou, du moins, de les éloigner considérablement dans le temps. Dans ce sens, l'environnement immédiat de la canalisation joue un rôle prépondérant pour la stabilité et son bon compactage permet d'éviter les mouvements de la canalisation. Il apparaît donc important qu'il soit effectué un contrôle du compactage dans cette zone.

Cependant, l'une des constatations des visites est que cette zone proche de la canalisation n'est que très rarement incluse dans la hauteur de remblai contrôlée du fait du risque d'endommagement, voire de percement, de la canalisation par la pointe du pénétromètre. Ce risque existe pour plusieurs raisons :

- possible mauvaise implantation du sondage,
- variation horizontale de la position de la canalisation,
- déviation possible du train de tiges du pénétromètre, d'autant plus grande que la taille des matériaux et la profondeur du sondage sont importantes,
- espace réduit entre la paroi de la tranchée et la canalisation (implantation précise nécessaire et déviation du train de tiges interdite).

Pour ces raisons et en considérant les conséquences financières importantes que représente un endommagement de la canalisation, les contrôleurs stoppent l'essai pénétrométrique au-dessus de la génératrice supérieure, le plus souvent à environ 20 à 30 cm (variable de 20 à 70 cm selon les cas). En effet, dans les zones sous-compactées, les enfoncements par coup peuvent être très importants, d'où une profondeur d'arrêt difficile à maîtriser.

Il pourrait donc être suggéré que soient effectués deux tests de compactage :

- le premier au cours des travaux, après qu'aient été mis en place le lit de pose, l'enrobage et les 50 à 100 premiers centimètres au-dessus de la génératrice,
- le second après les travaux, jusqu'à la profondeur déjà testée.

Cet essai supplémentaire permettrait notamment :

- d'implanter plus précisément les sondages par rapport à la position de la canalisation,
- de s'affranchir du risque de déviation de la tige puisqu'il y avait moins de matériau à traverser,
- de faciliter la reprise en sous-cœuvre dans le cas de travaux de mauvaise qualité (moins de matériau à reprendre et présence des engins sur le chantier).

Cependant, cela engendre d'autres types de problèmes :

- au niveau de la coordination des travaux, puisque cela impliquerait une intervention après un remblayage partiel de la zone proche de la canalisation ; or la constitution et le compactage du remblai se font sur toute la hauteur de la tranchée, et au fur et à mesure de l'avancement des travaux.
- au niveau de l'accessibilité de la zone à sonder, car seuls les pénétromètres facilement maniables pourraient travailler à l'intérieur de la tranchée.

IV.2. Implantation des sondages

Pour les raisons évoquées ci-dessus, il est donc important que l'entrepreneur soit présent lors de l'implantation afin d'éviter que le sondage ne détériore la conduite ou un élément annexe à la canalisation (raccords au réseau) ou encore une canalisation d'un autre réseau (adduction d'eau, gaz...). Cependant, il faut éviter que l'entrepreneur, seul avec le contrôleur, ne guide l'implantation vers les zones qu'il sait favorables.

Pour l'anecdote, il est arrivé qu'un entrepreneur pousse l'implantation du contrôle vers une zone où il avait coulé un reste de béton maigre.

Il est donc justifié que le contrôleur, l'entrepreneur (pour la position de la canalisation et les éventuels obstacles tels que les raccords) et le maître d'œuvre soient présents lors de l'implantation.

IV.3. Classification des matériaux

IV.3.1. Origine de la classification

La classification des matériaux est rarement fournie au contrôleur.

Le plus souvent, le maître d'œuvre renvoie le contrôleur vers l'entrepreneur qui lui-même, au mieux, tient les renseignements du carrier.

D'une manière générale, on constate une insuffisance quasi systématique dans la caractérisation des matériaux de remblai.

IV.3.2. Les matériaux particuliers

Les matériaux arrondis utilisés en enrobage et lit de pose ne correspondent à aucune classe pour la fonction B des pénétromètres dynamiques, mais ne nécessitent pas de contrôle puisqu'ils sont auto-compactants.

Les matériaux recyclés posent un réel problème car l'assimilation avec un matériau naturel de la GTR ne semble pas fiable, et ils n'ont pas subi un étalonnage spécifique avec le pénétromètre dynamique employé. La fonction C devrait être systématiquement employée dans leur cas.

IV.3.3. Etat hydrique pour les matériaux sensibles à l'eau

L'état hydrique du matériau reste souvent flou ; même si la teneur en eau a été mesurée auparavant (par exemple au cours des travaux), elle peut avoir évolué entre le moment de l'identification et celui du contrôle. Ce problème de teneur en eau ne se pose pas pour les matériaux insensibles à l'eau tels que ceux issus d'une carrière (le plus souvent). En effet, les 0/20 ou 0/31,5, ont une partie de fines peu importante et non argileuse.

En ce qui concerne la notion de matériau centré, si la classification est donnée elle ne mentionne pas si le matériau est centré ou non dans une classe. De fait, il faut que le contrôleur ait les connaissances nécessaires pour vérifier si le matériau est centré, au vu de résultats des essais d'identification. Cela soulève également le problème de la classification, car un matériau peut être centré dans une classe au vu des résultats d'un essai d'identification mais jugé marginal par ailleurs (exemple : identification en utilisant les limites d'Atterberg ou en utilisant une Valeur de Bleu). Par ailleurs, il est important de savoir que la norme NF P 11-300 a été créée de telle sorte à regrouper les sols ayant des comportements similaires au moment de sa mise en œuvre en remblai ou couche de forme et non lors d'un contrôle de compactage.

IV.3.4. Matériau du lit de pose

Afin d'interpréter correctement l'essai de pénétration, il serait intéressant que le matériau constituant le lit de pose et l'enrobé soit également identifié et classifié puisqu'il est, dans la grande majorité des cas, différent de celui constituant le remblai.

Cependant, il faut préciser que si le matériau d'enrobage est différent c'est parfois une grave propre roulée 5/15 qui ne rentre pas dans les critères de définition de la fonction B. Ce matériau est considéré auto-compactant et (comme déjà précisé) du fait de la forme arrondie des éléments, il ne nécessite pas de contrôle.

IV.4. Le frottement latéral

D'après les constructeurs, le frottement latéral reste négligeable tant que la profondeur de sondage est inférieure à 2 m et tant que la verticalité du mât est respectée. Au delà de 2 m une vérification du frottement latéral à la clé dynamométrique doit être effectuée, et l'inclinaison du mât doit rester inférieure à 2 %.

La mesure de l'inclinaison du mât n'est pas évidente à effectuer, et la présence de gros éléments du sol peut engendrer un frottement latéral important sans que les 2 m de profondeur ne soient atteints. Il pourrait donc être intéressant que soit effectué un contrôle systématique du frottement latéral à la clé dynamométrique, à la fin de chaque sondage, de sorte à s'assurer que le résultat n'ait pas été perturbé.

IV.5. Présence de la nappe

On sait (étude LCPC Nancy, 1996) que la présence de la nappe modifie le résultat d'un contrôle en décalant le pénétrogramme de façon pessimiste (vers la gauche). L'étude du LCPC Nancy met en évidence une modification des résultats en diminuant les résistances d'enfoncement par lubrification des grains du sol (étude sur le calcaire de Jeumont, coupures 5/15 et 0/50), ce qui constitue une source d'erreur, même dans le cas de matériaux insensibles à l'eau.

Malgré tout, aucune disposition n'est prise pour savoir si la nappe est présente, ni aucune recommandation par rapport au cas où elle serait repérée.

La présence de la nappe peut être détectée lors du retrait des tiges après un essai pénétrométrique, à la sortie du trou de sondage. Dans ce cas, une simple sonde piézométrique permettrait de connaître la profondeur de la surface de cette nappe et savoir si notre essai pénétrométrique est susceptible d'être modifié. Cette information paraît importante à spécifier sur le procès verbal de l'essai.

Ne faudrait-il pas étendre l'étalonnage des appareils à une situation saturée des matériaux ?

IV.6. Zone de raccord

La zone des raccords de la canalisation au niveau des regards est une zone au niveau de laquelle la mise en place du remblai est difficile et où sont constatés de nombreux problèmes à long terme. Cette zone spécifique, où la mise en place est difficile, n'est pas contrôlée. En effet, le contrôle se fait généralement au milieu d'un tronçon ou à un minimum d'une dizaine de mètres du regard.

Ne pourrait-on pas imaginer que le remblai soit contrôlé spécifiquement dans cette zone à problème ?

IV.7. Planches d'étalonnage (fonction C)

La fonction C demande une utilisation plus lourde que la fonction B du fait de la mise en œuvre d'une planche d'étalonnage spécifique au chantier. La conséquence est que cette fonction, bien que plus représentative du matériau et de son état de compactage au niveau des travaux, est moins employée.

Comme déjà spécifié dans un cas de visite de chantier, quand sont utilisées des planches d'étalonnage préalables aux travaux de pose, c'est le plus souvent pour connaître les conditions de compactage minimum nécessaires pour satisfaire aux exigences du contrôle au pénétromètre dynamique. Cependant, dans ce cas le compactage était satisfaisant.

IV.8. Répartition des objectifs de densification

Trop souvent les contrôleurs n'ont pas à leur disposition la répartition des objectifs de densification sur la hauteur du remblai. De fait, ils prennent en considération le cas moyen sous chaussée, c'est à dire 20 ou 30 cm de q₂, puis 40 cm de q₃ et le reste du remblai en q₄. Signalons, tout de même, que ces épaisseurs sont celles le plus souvent préconisées par les maîtres d'œuvre.

IV.9. Délai de livraison des résultats du contrôle

Il faut également, pour que le résultat du contrôle puisse orienter la décision du maître d'œuvre au moment de la réception, que les résultats soient fournis par l'organisme de contrôle dans un délai assez court après le test.

IV.10. Le procès verbal

Nous proposons que soient placés systématiquement dans les procès verbaux de réception des réseaux d'assainissement en tranchées :

✓ En début de procès verbal :

- Les références et nom de l'entreprise de contrôle,
- Les références du chantier,
- Les procès verbaux d'identification des matériaux de remblai,
Les références de l'appareil de contrôle,
La date et le nombre d'essais réalisés,
L'implantation des essais sur un schéma du réseau contrôlé.

✓ Pour chaque essai pénétrométrique :

- Le pénétrogramme brut,
- Le pénétrogramme lissé (avec précisions sur la méthode de lissage), accompagné les droites limites et de référence correspondant au matériau et à son état hydrique,
L'origine des droites de référence et de refus (fonction C ou fonction B),
La mention "sans anomalie" ou le cas d'anomalie constaté (tel que défini dans les normes XP P 94-063 et XP P 94-105),

Une coupe en parallèle du pénétrogramme lissé avec en correspondance de cotes :

Les différents matériaux employés et leur état hydrique (sous chaussées, en remblai et en enrobage),

- Les objectifs de densification,
- La position de la canalisation,
- La présence éventuelle de la nappe,
- La largeur de tranchée,
- La présence éventuelle de l'enrobé et l'exécution ou non d'un avant-trou,
- La mesure du frottement latéral en fin d'essai,
- La présence d'un blindage,
- Un commentaire éventuel sur le déroulement de l'essai.

✓ *En annexe :*

- La définition des cas d'anomalie selon les normes XP P 94-063/105,
- les pages 56 et 57 du Guide Technique "Remblayage des tranchées et réfection des tranchées" de 1992, chapitre "Aide à la décision à l'issue des contrôles".

Ces renseignements constitueraient, pour les maîtres d'œuvre, des informations permettant d'estimer la gravité d'une éventuelle anomalie en fonction de l'environnement et de la sensibilité de la tranchée. Il aurait ainsi en main les éléments nécessaires pour prendre les décisions adéquates.

IV.11. L'étalonnage des pénétromètres dynamiques

Dans le cadre d'une démarche qualité, il faut souligner que l'étalonnage en fonction B des appareils est effectué par le constructeur et ne subit aucun contrôle extérieur. Or, l'étalonnage revêt une importance primordiale sur la qualité des résultats.

L'étalonnage en fonction B des pénétromètres dynamiques est une opération longue, fastidieuse et coûteuse décrite par les normes XP P 94-063 et XP P 94-105. Il serait donc intéressant que l'étalonnage reste à la charge du constructeur mais qu'un contrôle technique, effectué par un organisme indépendant, valide les résultats d'étalonnage et teste les moyens métrologiques présents sur l'appareil. Ce contrôle permettrait également de définir la fréquence de révision des appareils.

Cette démarche permettrait, outre le fait de s'assurer de la pertinence des conclusions, d'augmenter encore la crédibilité du contrôle de compactage.

V. CONCLUSION CONCERNANT L'ÉTAT DES PRATIQUES

Pour conclure cette partie, nous pouvons dire que les 10 visites effectuées permettent de donner un aperçu général de l'état des pratiques et nous ont apporté de précieux enseignements.

Tout d'abord, notre tour d'horizon montre des variabilités géographiques importantes qui séparent le Nord et l'Est de la France du reste du pays, même si cette variabilité est en réalité fonction du maître d'œuvre plus que de la région. Aussi, l'impact de l'influence des Agences de l'Eau est loin d'être négligeable.

Les principales constatations faites lors des visites et les enseignements qui en découlent sont les suivants :

- * L'implantation des essais pénétrométriques doit se faire en présence de l'entrepreneur et du maître d'œuvre de sorte que l'essai puisse sonder l'enrobage de la canalisation et prendre en compte l'ensemble du linéaire (y compris les zones de compactage difficile). Ce n'est actuellement pas le cas.
- L'identification GTR (nature et état hydrique) des matériaux est souvent trop approximative : elle devrait être effectuée de façon systématique par le contrôleur suite à un prélèvement à proximité du sondage. La fonction C doit être utilisée plus fréquemment, dès que le besoin s'en fait sentir (matériaux recyclés par exemple).
- Le matériau d'enrobage doit également faire l'objet d'une identification ; son contrôle de compactage, actuellement non réalisé dans la majorité des cas, pourrait avoir lieu avant remblayage complet de la tranchée.
- Le procès verbal se doit d'être plus explicite de sorte que les maîtres d'œuvre et d'ouvrage aient en main toutes les pièces permettant une décision raisonnée.

La pose des réseaux d'assainissement ne sera effectuée correctement que si la qualité du travail de l'entrepreneur est reconnue par des contrôles fiables et correctement mis en œuvre. Généraliser l'essai pénétrométrique permettra d'atteindre cet objectif. Pour preuve, dans certaines régions où des décaissements ont été exigés suite à des contrôles négatifs, il y a eu modification de la façon de travailler. A l'heure actuelle, le calcul du prix de pose y est fait par rapport au temps de compactage et non plus par rapport à la longueur du linéaire posé.



VILLE DE PETIT-QUEVILLY
S. E. M.



CHAPITRE VI

PLAN EXPÉRIMENTAL ET MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE

Les premiers chapitres de la présente étude consistaient en une synthèse bibliographique des différents ouvrages consacrés au sujet. Cette analyse bibliographique complétée par un état des pratiques de contrôle, confirme l'intérêt de comparer les réponses des différents pénétromètres dynamiques, dans des conditions strictement identiques, au niveau de planches expérimentales.

Nous proposons ici un plan expérimental, accompagné d'une méthodologie d'exploitation des données. Ils ont été établis dans l'objectif de cerner avec précision les conditions d'utilisation et la fiabilité des pénétromètres dynamiques les plus couramment employés actuellement en France pour le contrôle de compactage des remblais de tranchées d'assainissement.

I. MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE DES RÉSULTATS

Afin d'analyser, juger et comparer la qualité des résultats obtenus avec chacun des pénétromètres dynamiques, nous avons établi une méthodologie d'analyse s'appuyant sur plusieurs coefficients.

Ils sont au nombre de 4 :

- * Coefficient de bruit de fond,
- * Coefficient de dispersion,
- * Coefficient de position du pénétrogramme par rapport aux droites limite et de référence,
- * Hauteur de dépassement de la droite limite (si c'est le cas).

Les coefficients tels que nous les présentons dans ce document sont issus d'une étape de tests. En effet, après avoir défini les coefficients, nous les avons appliqués aux résultats issus d'une expérimentation du CER de 1999 (voir II. ci-dessous). Cette démarche nous a permis de juger de la pertinence de ces coefficients, puis de les faire évoluer de sorte qu'ils soient réellement représentatifs des phénomènes à caractériser.

L'analyse des pénétrogrammes est précédée d'un lissage des mesures brutes dont l'objectif et la méthode sont présentés ci-après.

Il est important de souligner ici que, sur les exemples étudiés dans le cadre la présente étude, le calcul des différents coefficients se fait à partir des mesures lissées.

I.1. Lissage

Le lissage consiste en une modification des mesures brutes issues de l'essai pénétrométrique de sorte à obtenir un pénétrogramme exempt de grandes variations. Le lissage est donc l'opération qui permettra de diminuer l'impact des points aberrants du pénétrogramme et ainsi d'augmenter sa "lisibilité" et faciliter son interprétation.

Nous avons opéré, sur chacun des pénétrogrammes à analyser, une moyenne glissante dans une fenêtre de hauteur variable. Cette méthode de lissage consiste en l'attribution, en chaque point du pénétrogramme brut, d'une nouvelle valeur, calculée en faisant la moyenne des valeurs du point considéré et des k points de mesure répartis de part et d'autre de celui-ci. Ce qui s'exprime par formule suivante :

$$m_i = \frac{1}{2k+1} \cdot \sum_{i-k}^{i+k} x_i$$

où m_i est la valeur lissée, au niveau du point i du pénétrogramme,
k correspond au nombre de points de part et d'autre du point i,
 x_i est la valeur brute du pénétrogramme au point i.

La valeur de k peut être variable, nous avons opté ici pour une valeur de k égale à 2, soit une moyenne glissante sur 5 valeurs.

Il est important de souligner ici que nous avons vérifié que la méthode de lissage n'influe pas sur le calcul des coefficients, tout du moins que l'ordre de grandeur reste le même et que la position relative des coefficients entre appareils reste également identique.

I.2. Bruit de fond

I.2.1. Définition du bruit de fond

Le bruit de fond peut être défini comme étant la variation du pénétrogramme autour de la ligne moyenne issue de l'opération de lissage.

De fait, après lissage d'un pénétrogramme, la différence à une profondeur donnée, entre la valeur brute et la valeur lissée, constitue la valeur du bruit de fond.

I.2.2. Définition mathématique de l'indicateur de bruit de fond

De façon à obtenir un coefficient qui permette la comparaison des différents pénétromètres dynamiques, nous avons défini un coefficient de bruit de fond adimensionnel qui n'est influencé ni par l'échelle, ni par l'ordre de grandeur des valeurs d'enfoncement (ou de résistance de pointe) :

$$B = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_i \left(\frac{V_{bi} - V_{li}}{V_{li}} \right)^2}$$

où B est l'indicateur de bruit de fond sur la hauteur considérée,
 V_{bi} est la valeur brute du pénétrogramme au niveau du coup i ,
 V_{li} est la valeur lissée du pénétrogramme au niveau du coup i ,
 n est le nombre de valeurs présentes sur la hauteur de la couche considérée.

B est donc un indicateur adimensionnel calculé pour chaque pénétrogramme sur une même couche et correspondant à un écart type pondéré des V_{bi} .

Un B moyen est calculé pour chaque appareil à partir de l'ensemble des points de contrôle (10 dans le cas présent) d'une même couche sur une même planche.

I.2.3. Remarque concernant le bruit de fond

Les études menées par M. Gourvès (CUST) attribuent au dispositif de mesure de l'appareil une grande part du bruit de fond. Autrement dit, malgré la précision de la mesure des enfoncements par coup, il subsiste une variabilité matérielle qui est à l'origine d'une grande part du bruit de fond. Cette constatation a été confirmée par M. Quibel (CER de Rouen).

I.3. Etude de la dispersion

I.3.1. Définition de la dispersion

La dispersion peut être définie comme étant la répétabilité des mesures données par un appareil, c'est à dire sa capacité à fournir un même pénétrogramme dans des conditions similaires (nature, état et densité du matériau, et épaisseur des couches).

I.3.2. Définition mathématique de l'indicateur de dispersion

L'indicateur de dispersion est basé sur la variabilité des valeurs moyennes d'enfoncement (ou de résistance de pointe) fournies sur plusieurs sondages avec le même appareil au sein d'une couche. De même que pour le coefficient de bruit de fond, la définition mathématique fait en sorte d'obtenir un indicateur adimensionnel et non influencé ni par l'échelle, ni par l'ordre de grandeur des valeurs, ce qui permet de comparer les appareils.

Les étapes de définition de l'indicateur de dispersion **D** (dans le cas de 10 "répétitions" des sondages pénétrométriques) sont les suivantes :

- * Détermination, pour chacun des 10 sondages pénétrométriques d'une planche et chacune des couches, de la valeur moyenne d'enfoncement par coup e_{moy} (ou de résistance de pointe qd_{moy}).
- * Calcul, pour chaque couche, des moyennes m et écarts types s des e_{moy} (ou qd_{moy}) à partir des 10 pénétrogrammes qui traversent la couche.
- * Calcul de l'indicateur de dispersion pour chaque couche D_c , selon la formule suivante :

$$D_c = \frac{m + 2\sigma}{m - 2\sigma}$$

La dispersion **D** propre à un appareil pourra être considérée comme étant la moyenne des différents D_c sur un même matériau.

La formulation mathématique du coefficient de dispersion utilisé pose un problème si le terme 2σ est proche ou supérieur à la moyenne, il en résulte un coefficient de dispersion pouvant être très élevé, voire négatif. Un coefficient négatif est alors le signe d'une dispersion beaucoup plus élevée que pour un **D** très grand.

Par voie de conséquence, il faut limiter l'analyse de la dispersion aux valeurs d'enfoncement (ou de résistance de pointe) moyens, ce qui permet d'éviter des écarts types trop importants. Initialement, nous avons envisagé de l'appliquer aux enfoncements minimum et maximum.

1.3.3. Analyse des valeurs des indices de dispersion

Le coefficient de dispersion tel qu'il est défini pose le problème de la représentativité des différences des valeurs du coefficient entre appareils. En effet, comment dire que la différence entre les dispersions de deux appareils est réellement significative devant la dispersion au sein d'une série de données pour un appareil ?

Malgré tout, l'application aux résultats du CER (voir les paragraphes suivants), nous a permis de juger de la représentativité du coefficient. Ainsi, il est possible d'avancer qu'un appareil dont le coefficient de dispersion est compris entre 1,5 et 3 présente une dispersion normale, tandis qu'une dispersion supérieure peut être considérée comme suspecte.

Aussi, il est important de souligner (remarque de M. Quibel du CER de Rouen) que les hétérogénéités horizontales du matériau, même au niveau de planches expérimentales avec une mise œuvre soignée, peuvent avoir une influence conséquente sur la valeur du coefficient de dispersion.

1.4. Etude de la position du pénétrogramme lissé par rapport aux droites limite et de référence

1.4.1. Définition d'un coefficient de position

L'objectif est de définir un indicateur adimensionnel qui permettra de caractériser, de la même manière pour chaque appareil, la position relative du pénétrogramme par rapport aux droites limite et de référence.

1.4.2. Définition mathématique du coefficient de position

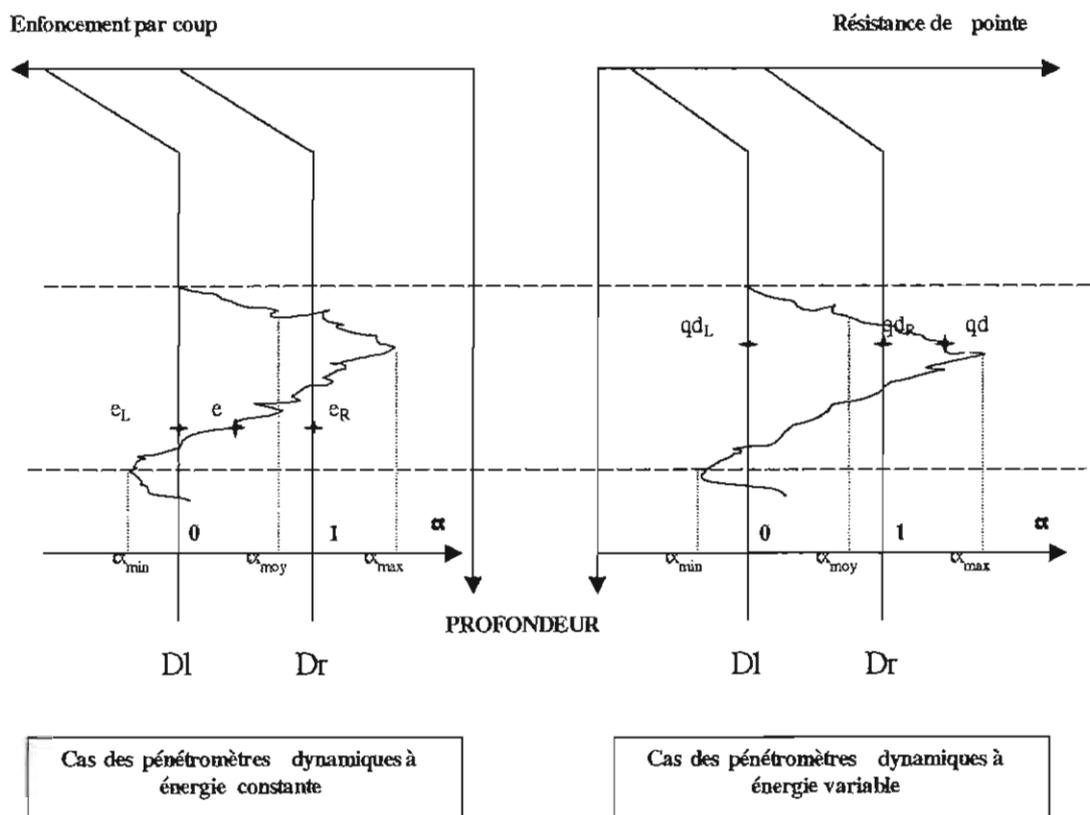


Figure 25 : Représentation graphique de la définition des coefficients alpha.

L'indicateur proposé est défini comme suit :

✓ **Calcul du coefficient α en chaque point du pénétrogramme étudié.**

* Pour les pénétromètres à énergie constante :

$$\alpha = \frac{e_L - e}{e_L - e_R}$$

- où e est la mesure de l'enfoncement au point considéré,
- e_L est la valeur de la droite limite à la profondeur du point considéré,
- e_R est la valeur de la droite de référence à la profondeur du point considéré.

✓ Pour les pénétromètres à énergie variable :

$$\alpha = \frac{q_d - q_{dL}}{q_{dR} - q_{dL}}$$

où q_d est la mesure de la résistance de pointe au point considéré,
 q_{dL} est la valeur de la droite limite à la profondeur du point considéré,
 q_{dR} est la valeur de la droite de référence à la profondeur du point considéré.

L'indicateur α permet de juger de la position du pénétrogramme par rapport aux droites limites et de référence, en effet on a :

- $\alpha < 0$ lorsque le pénétrogramme se trouve à gauche de la courbe limite (compactage insuffisant),
- $\alpha = 0$ pour un point situé sur la courbe limite,
- $0 < \alpha < 1$ pour une valeur située entre les courbes limite et de référence,
- $\alpha = 1$ pour un point situé sur la courbe de référence,
- $\alpha > 1$ pour une valeur située au delà de la courbe de référence (compactage supérieur à l'objectif).

✓ Détermination pour chaque couche, de chaque pénétrogramme, des :

- * α_{moy} , moyenne de l'ensemble des α sur la couche,
- * α_{min} , valeur minimum parmi les α de la couche,
- * α_{max} , valeur maximum parmi les α de la couche,

✓ Détermination pour chaque couche, chaque planche et chaque pénétromètre, des :

- * Moyenne des α_{moy} ,
- * Moyenne des α_{min} ,
- * Moyenne des α_{max} ,

1.4.3. Hauteur de dépassement et analyse des valeurs alpha

Lorsque la valeur de alpha minimum est négative c'est le signe de la détection d'une anomalie par le pénétromètre dynamique considéré. Dans ce cas de figure, pour juger de l'importance de cette anomalie, il faut considérer la hauteur de dépassement (elle sert notamment à la définition des cas d'anomalie dans les normes).

1.4.4. Test de différence significative

Afin de savoir si les variations d'un coefficient alpha entre appareils sont réellement significatives d'une différence de réponse des appareils, il faut mener un test statistique de différence significative. Nous utiliserons un test courant en statistique : le test de Student.

✓ Test de Student :

Pour comparer les alpha calculés pour deux pénétromètres au niveau d'une couche, pour une planche donnée, le test de Student s'applique.

L'utilisation de ce test nécessite de faire l'hypothèse que la distribution des 10 valeurs (10 sondages par planche avec le même appareil) de alpha suit une loi normale.

Pour effectuer le test, il faut, dans un premier temps, effectuer le calcul :

$$t = \frac{|\bar{\alpha}_1 - \bar{\alpha}_2|}{\sigma_{(\bar{\alpha}_1, \bar{\alpha}_2)}}$$

avec

$$\sigma_{(\bar{\alpha}_1, \bar{\alpha}_2)} = \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}$$

pour lesquelles $\bar{\alpha}_1$ est la moyenne des alpha de la couche pour le pénétromètre 1,
 $\bar{\alpha}_2$ est la moyenne des alpha de la couche pour le pénétromètre 2,
 σ_1 est l'écart type des alpha de la couche pour le pénétromètre 1,
 σ_2 est l'écart type des alpha de la couche pour le pénétromètre 2,
 n_1 est le nombre de sondages traversant la couche pour le pénétromètre 1,
 n_2 est le nombre de sondages traversant la couche pour le pénétromètre 2.

Le test consiste à comparer le t calculé avec le t de Student avec une probabilité de 95% et un degré de liberté de (n-1) (par exemple, t de Student (0,975 ; 10-1) = 2,26).

Si le t calculé est supérieur au t de Student, la différence entre les appareils est significative avec une probabilité de 0,95 ; les alpha des deux appareils peuvent être jugés significativement différents. On peut ainsi assurer, dans ce cas, que la dispersion des alpha pour chacun des deux appareils ne constitue pas un obstacle à la comparaison de leurs mesures.

1.4.5. Analyse des valeurs de alpha

Il est important de souligner que, dans la mesure où le calcul du coefficient alpha fait intervenir les valeurs des droites limite et de référence, la comparaison entre les différents alpha fait intervenir aussi bien la réponse propre du pénétromètre dynamique que la qualité de leur étalonnage. La part de l'un ou de l'autre reste difficile à déterminer, d'où l'intérêt de prévoir, dans le programme expérimental, la possibilité de juger de la représentativité de l'étalonnage de l'appareil par rapport au matériau testé.

II. APPLICATION AUX RÉSULTATS ISSUS DE L'EXPÉRIMENTATION DU CER (1999)

Le CER de Rouen a mené en 1999, à la demande du SETRA, une étude sur le bruit de fond et la dispersion de 3 des pénétromètres dynamiques sélectionnés pour la présente étude. Cette expérimentation, lourde de mise en œuvre, a vu la mise en place de 5 planches expérimentales chacune constituée d'un matériau différent. Dix sondages par planche ont été réalisés avec chacun des appareils.

Grâce à la coopération de chacun des partenaires de cette étude (CER, SETRA et constructeurs de pénétromètres), nous avons pu appliquer aux résultats recueillis lors de cette expérimentation la méthode de traitement des données que nous avons élaborée.

L'objectif était triple :

- * Evaluer la validité de la méthode de traitement des données, et la faire évoluer si nécessaire. Les modifications en résultant ont été prises en compte dans la définition des coefficients décrits au paragraphe précédent.
- * Analyser le plan expérimental et l'adapter de sorte qu'il convienne aux objectifs de la présente étude. Nous nous sommes appuyés sur la mise en œuvre du CER pour élaborer le plan expérimental défini ci-dessous.
- * Tirer les premières conclusions quant à la fiabilité des pénétromètres dynamiques concernés. C'est ce que nous allons exposer maintenant.

II.1. Etude du bruit de fond

II.1.1. Résultats

Appareils testés ⇒		PANDA		PDG 1000		LRS 30	
		Cema gref	CER (99)	Cema gref	CER (99)	Cema gref	CER (99)
Planches expérimentales							
N° planche	Matériau de la planche						
Planche 1	TV CETE C1B4h front. th	0.22	1.14	0.69	0.76	0.62	1.13
Planche 2	Grave SNEC, B4s	0.18	0.92	0.49	0.65	0.55	1.05
Planche 3	Grave + Limon, B5h	0.17	0.72	0.60	0.54	0.41	1.10
Planche 4	Limon, A1-A2h proche m	0.13	0.44	0.51	0.76	0.33	0.94
Planche 5	Limon + cailloux, A1-A2 m	0.14	0.70	0.52	0.49	0.36	1.00
Moyenne		0.18	0.78	0.59	0.64	0.48	1.04

Tableau 9 : Valeurs des bruits de fond moyens pour chaque appareil et chaque planche selon la méthode du Cemagref définie au chapitre précédent et celle du CER (1999).

II.1.2. Commentaires

Le calcul du coefficient de bruit de fond selon la méthode du Cemagref appelle quelques commentaires :

- * Sur toutes les planches (quel que soit le matériau), le Panda est le pénétromètre dynamique ayant le bruit de fond le plus faible, c'est-à-dire la somme des écarts entre le pénétrogramme brut et le pénétrogramme lissé la plus faible.

- * Le PDG 1000 et le LRS présentent des valeurs de bruit de fond sensiblement identiques. Cependant, le LRS présente un B légèrement inférieur pour 4 des 5 planches.
- * L'ordre de grandeur du coefficient B semble similaire pour tous les appareils. Il est cependant possible d'avancer que le Panda est l'appareil le moins "bruité".
- * Par ailleurs, nous avons tenté un lissage sur 7 valeurs (au lieu de 5) au niveau des 2 premières planches, afin de nous rendre compte d'une éventuelle influence de la méthode de lissage sur le calcul de B. Il en ressort que le bruit de fond n'est apparemment pas influencé par la méthode de lissage.
- * Pour tous les appareils, le bruit de fond est le plus important pour la planche 1. Ce matériau est le seul à présenter des éléments de dimension comprise entre 30 et 100 mm (10%).
- * De même, pour tous les appareils, le bruit de fond est le plus faible pour la planche 4 où le matériau est fin et ne présente aucun élément de dimension supérieure à 20 mm.
- * Il est également possible de constater, pour tous les appareils, une légère augmentation de B entre la planche 4 (sol A1) et la planche 5 (même sol A1 + cailloux de coupure 20/40).

Par ailleurs, force est de constater que les résultats obtenus avec l'une et l'autre des deux méthodes (Cemagref (2001) et CER (1999)) sont différents tant au niveau des ordres de grandeur que de la position des résultats entre appareils.

Remarque CER : Le bruit de fond δ dans le rapport CER était orienté : recherche d'une traduction de l'hétérogénéité du matériau (on aurait dû omettre de parler d'influence du type de pénétromètre). Il n'est volontairement pas adimensionnel pour les raisons précisées dans le rapport.

Le bruit de fond B du CEMAGREF est adimensionnel (c'est en fait le coefficient de variation) mais on ne peut pas pour autant dire qu'il traduit la qualité d'un appareil. Si on donne 2 fois plus d'énergie à un appareil, il est normal que le fuseau d'encadrement du bruit de fond baisse. Or ce fuseau à $\pm 2 \sigma$ vaut $(1 + 2B) / (1 - 2B)$.

II.1.3. Conclusion

Pour conclure, il semblerait que la taille moyenne, la dimension et la proportion des plus gros éléments du matériau influent sur le bruit de fond en le faisant augmenter.

Il faut rester prudent quant à la valeur et la représentativité du bruit de fond. En effet, cet indicateur ne permet pas de juger directement de la lisibilité d'un pénétrogramme. Si les enfoncements sont faibles, l'aspect perturbé du pénétrogramme ressort tout de même sans pour autant que cela constitue un bruit de fond.

Ainsi certaines questions restent ouvertes : Quelles conclusions tirer des résultats issus des deux méthodes ? Quelle méthode doit être employée par la suite ? Quelle est la pertinence du coefficient de bruit de fond ?

Enfin, rappelons qu'une part (importante d'après M. Gourvès) du bruit de fond est engendrée par le dispositif de mesure de l'enfoncement par coup de l'appareil (quel que soit l'appareil).

II.2. Etude de la dispersion

II.2.1. Résultats

Nous avons retranscrit dans le tableau ci-après les résultats des calculs de dispersion d'après plusieurs méthodes. La première colonne correspond au calcul selon la méthode du CER (1999). La deuxième partie donne les résultats selon la méthode du Cemagref, appliquée uniquement à la troisième couche (en profondeur) ou en faisant la moyenne sur les 3 couches de la tranchée.

Planche	Pénétromètres	Etudes CER 1999	Etudes Cemagref 2001	
		Hauteur totale	Couche 3 en profondeur	Hauteur totale (moyenne sur les 3 couches)
1	Panda	2	1,9	2,6
	PDG 1000	1,9	1,3	1,9
	LRS 30	1,5	2,0	1,7
2	Panda	1,8	2,0	1,9
	PDG 1000	1,4	1,4	1,5
	LRS 30	1,4	1,5	1,5
3	Panda	1,9	3,4	2,6
	PDG 1000	1,5	1,9	1,5
	LRS 30	1,4	1,7	1,7
4	Panda	2,5	2,3	2,3
	PDG 1000	1,4	1,7	1,4
	LRS 30	1,2	1,7	1,7
5	Panda	2	11,1	5,8
	PDG 1000	1,7	4,2	1,7
	LRS 30	2,4	2,2	2,6

Tableau 10 : Valeurs des dispersions moyennes pour chaque appareil et chaque planche selon la méthode du CER (1999) celle du Cemagref appliquée à la seule couche 3 en profondeur ou à l'intégralité du remblai.

II.2.2. Commentaires

On trouvera, joints en annexe, les pénétrogrammes rassemblés sur un même graphique pour chaque appareil et chaque planche ("pénétrogrammes cumulés"). Une analyse de ces pénétrogrammes cumulés permettra de juger de la répétabilité des appareils et donc de la qualité du coefficient de dispersion. Il faut cependant regarder ces graphiques avec prudence ; l'échelle peut jouer sur la dispersion apparente.

Le PDG 1000 et le LRS 30 ont tous les deux des échelles d'enfoncement par coup similaires (exception faite pour un pénétrogramme du LRS 30). Par contre, le Panda ayant un axe horizontal avec pour unité des résistances de pointe, la dispersion ne peut être comparée visuellement avec d'autres appareils.

Les intercouches n'étant pas toujours situées à la même cote le long des planches, il est possible que les pénétrogrammes se trouvent décalés, d'où une fausse impression de dispersion.

Le tableau de résultats et la correspondance avec les pénétrogrammes cumulés appellent quelques commentaires :

- * Le coefficient de dispersion traduit bien l'aspect visuel perturbé des pénétrogrammes cumulés. Par exemple, pour le Panda les planches 1, 3 et surtout 5 sont celles qui présentent la dispersion apparente sur le graphique la plus marquée, ce sont également celles pour lesquelles les coefficients de dispersion sont les plus grands. La planche 5 notamment a un coefficient D élevé (5,77), ce qui traduit bien la grande dispersion visible sur le graphe des pénétrogrammes cumulés.
- * Les coefficients de dispersion des différents pénétromètres dynamiques sont compris entre 1,5 et 2,6, c'est le signe (après analyse visuelle des pénétrogrammes cumulés) d'une dispersion normale. On peut considérer au vu des 15 exemples disponibles, qu'au delà de 3,00 la dispersion devient suspecte.
- * Tous les pénétromètres dynamiques suivent à peu près la même évolution du coefficient de dispersion lors du passage d'une planche à une autre.

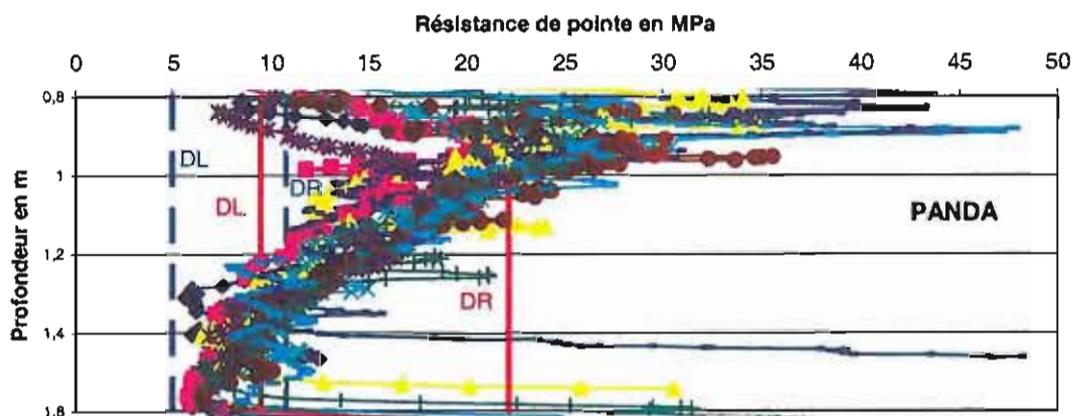
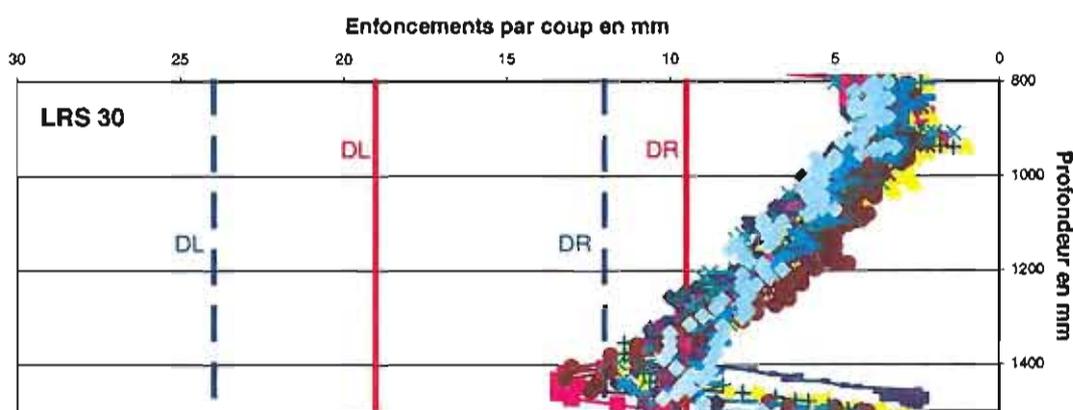
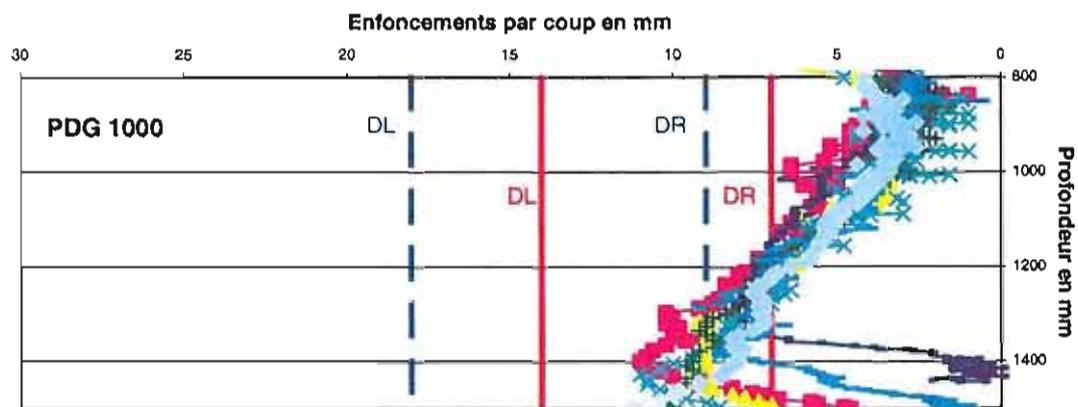


Figure 26 : Représentation graphique des pénétrogrammes cumulés et des droites limite (DL) et de référence (DR) pour 2 sous classes d'état m (pointillé) et s (trait plein)
 Planche 2, classe GTR : B4, q4.

II.3.3. Commentaires sur les coefficients alpha

✓ Sur le calcul des coefficients alpha

Nous avons présenté auparavant, en même temps que la méthode de calcul, la signification de la position du coefficient alpha. Il est possible d'ajouter ici deux remarques par rapport aux indicateurs α_{\min} , α_{moy} et α_{\max} :

- * un α_{\min} positif est le signe d'un pénétromètre dynamique ne détectant aucune anomalie de compactage,
- * un α_{\min} négatif est le signe d'un pénétromètre détectant une anomalie dont la "gravité" peut être juger par la position de α_{moy} : proche de 0 voire négative pour une anomalie de compactage importante, proche ou supérieure à 1 pour une anomalie peu importante.

✓ Sur la variation des coefficients alpha entre appareils

Dans tous les cas de figure, les réponses du PDG 1000 et du LRS 30 sont extrêmement proches, aussi bien au niveau de alpha min, que de alpha moy et que de alpha max.

Globalement, les réponses des 3 appareils (PDG 1000, LRS 30 et PANDA) sont équivalentes, c'est à dire que les alpha min sont souvent négatifs simultanément et que les alpha moy ont des valeurs proches. Malgré tout il subsiste quelques exceptions (par exemple sur la planche 2 au niveau des classes B4s, q4 et B4m, q3, ou au niveau de la planche 4 pour la classe A1m, q4).

Dans de nombreux cas, l'amplitude de variation entre les valeurs minimum et les valeurs maximum pour le Panda sont plus importantes que pour les 2 autres appareils. De fait, les valeurs minimum du Panda seront plus facilement négatives même si les alpha moyens sont équivalents. Le Panda se prononcera donc plus facilement pour une anomalie de compactage. L'ampleur de cette anomalie sera faible si le alpha moyen est équivalent à celui des autres pénétromètres dynamiques.

✓ Sur la variation des coefficients alpha pour deux matériaux au sein d'une même classe GTR

Il est intéressant de souligner qu'au niveau de la planche 4 les pénétromètres détectent des anomalies de compactage, tandis qu'au niveau de la planche 5 (même sol auquel il a été ajouté une coupure 20/40, et donc même classe GTR) aucune anomalie de compactage n'est détectée par aucun des appareils.

✓ Sur la variation des coefficients alpha lors d'un changement de classe de teneur en eau

Au niveau d'une planche et pour un même objectif de densification, lorsqu'on applique des droites limite et de référence correspondant à des teneurs en eau différentes, on peut constater une variation des valeurs du coefficient alpha. Les variations sont logiques : les valeurs des coefficients augmentent lorsque la classe de teneur en eau augmente. En règle générale, les variations des valeurs de alpha sont du même ordre pour chacun des appareils.

Il est important de noter que l'ampleur de ces variations peut être importante et donc porter à conséquence au moment de l'interprétation d'un pénétrogramme si la bonne teneur en eau n'est pas appliquée. Prenons pour exemple les résultats au niveau de la planche 2 : on passe d'une classe B4s, q3 où tous les appareils détectent une anomalie (tous les alpha min sont franchement négatifs) à une classe B4m, q3 où les alpha min sont positifs voire à peine négatif pour le Panda.

✓ Validité de la comparaison des mesures

Nous avons testé sur 2 cas, les 9 jeux de données (α_{min} , α_{moy} et α_{max} des 3 appareils) :

- cas 1 : planche 2, B4s, q4 (résultats différents selon les appareils)
- cas 2 : planche 4, A1h, q4 (résultats proches entre appareils)

Comparaison	PANDA-PDG 1000			PANDA-LRS 30			PDG 1000-LRS 30		
	alpha min	alpha moy	alpha max	alpha min	alpha moy	alpha max	alpha min	alpha moy	alpha max
T calculé Cas 1	9.69	9.00	0.56	21.00	11.06	0.52	2.94	3.67	0.20
T calculé Cas 2	19.16	4.57	2.67	8.31	4.97	1.11	6.71	0.97	14.68

Tableau 11 : Résultats du Test de Student.

Les valeurs du tableau (T calculé) doivent être comparées au T de Student (2,26).

Pour chaque cas nous avons 9 séries de 10 valeurs ; pour chacune de ces séries nous calculons la moyenne m et l'écart type σ . En supposant que les valeurs suivent une loi de répartition normale, ces valeurs se trouvent dans l'intervalle $[m-2\sigma; m+2\sigma]$ avec une probabilité de 95%. Ces intervalles de confiance sont représentés sur la figure 26 pour le cas 1 où l'on constate pour α_{min} et α_{moy} les intervalles obtenus pour le Panda et chacun des 2 autres appareils sont disjoints. On peut, par conséquent, dire que les résultats des appareils sont significativement différents, ce qui est confirmé par l'application du test de Student à ces mêmes valeurs (tableau 11). Pour le cas 2, la constatation est la même pour α_{min} où les intervalles de confiance des 3 appareils sont quasiment disjoints.

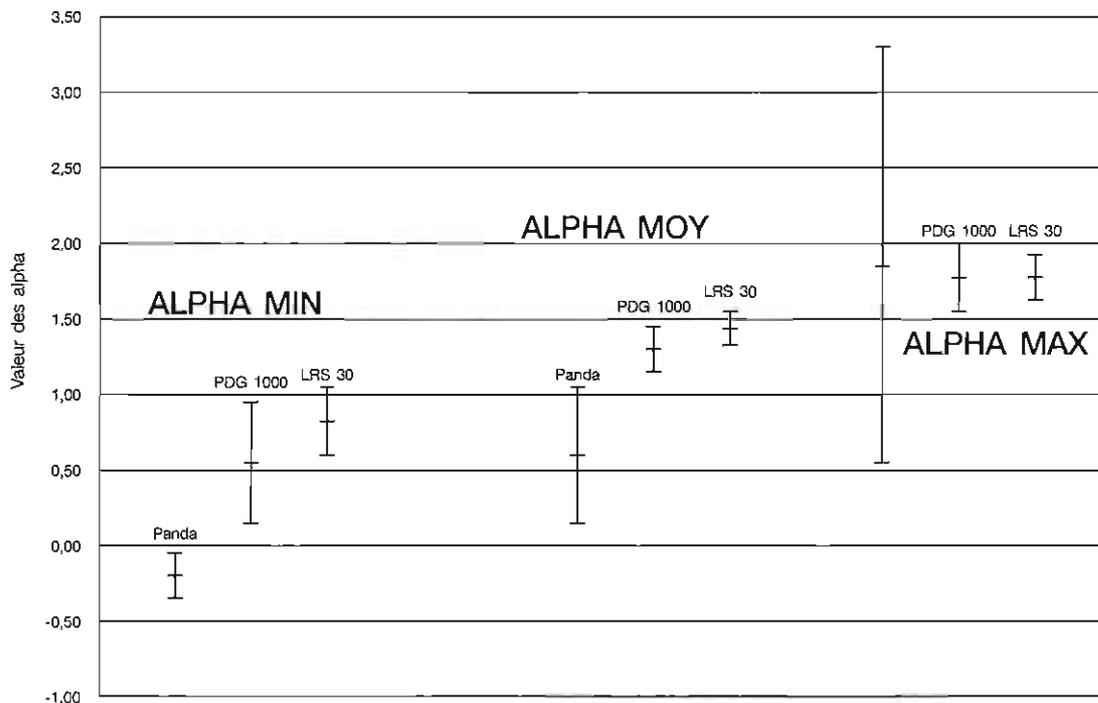


Figure 27 : Représentation graphique des intervalles de confiance des coefficients alpha
Planche 2, classe GTR : B4s, q4.

De cette analyse, on peut conclure que les résultats obtenus par les différents pénétromètres sont, dans certains cas, significativement différents et que la dispersion des mesures de chacun des appareils n'empêche donc pas de les comparer valablement. Ceci confirme l'intérêt de planches expérimentales dont on peut dire que les résultats seront tout à fait exploitables malgré l'existence d'une variabilité des mesures pour chacun des appareils. Néanmoins, il faut préciser que la dispersion de chacun des appareils a notamment pour origine (pour un appareil fonctionnant de façon conforme) le degré d'hétérogénéité du matériau, que des planches expérimentales en site contrôlé (c'est le cas ici) permettent de réduire à un niveau inférieur à un chantier expérimental, lui-même inférieur à un chantier ordinaire. Cet élément devra être pris en considération dans le programme expérimental à venir pour lequel un soin particulier devra être apporté à l'homogénéité des matériaux utilisés.

II.3.4. Conclusion

De ces commentaires ressortent quelques constatations :

- * Pour tous les appareils, les valeurs des coefficients évoluent dans un sens logique : ils sont plus grands pour des sols d'état hydrique m que s et plus grands pour des sols d'objectif de densification q_4 que q_3 . Les différences sont plus grandes pour des changements d'objectif de densification.
- * Les réponses du LRS 30 et du PDG 1000 sont équivalentes en toutes circonstances ; elles sont, par contre, différentes pour un Panda.
- * La variabilité des réponses entre le Panda et les deux autres appareils est différente en fonction des cas.
- * Dans de nombreux cas, le Panda est plus exigeant que le LRS 30 et le PDG 1000.
- * Si le LRS 30 et le PDG 1000 ont souvent des réponses très proches, est-ce le résultat d'une extrapolation de la base de données du PDG 1000 vers le LRS 30 ?
- * Les classes GTR sont-elles adaptées à la diversité des réponses des pénétromètres dynamiques ?
- * L'analyse des séries de données (intervalles de confiance et test de Student) montre que les résultats des différents appareils peuvent être valablement comparés sans que les conclusions soient entachées par la présence d'une dispersion des mesures.

Par ailleurs, ne connaissant pas la densité réelle du remblai, il est ici impossible de juger de la qualité des réponses des appareils. Cependant, nous pouvons dès à présent souligner que les pénétromètres dynamiques employés fournissent des résultats en général comparables mais parfois significativement différents. L'expérimentation future permettra de juger de la pertinence des réponses par appareil.

Le sentiment général est que les réponses entre les différents pénétromètres dynamiques testés sont dues, d'une part, à l'appareil lui-même mais aussi et surtout aux droites limites et de référence et donc à l'étalonnage. En effet, les variations des valeurs relatives entre coefficients alpha des appareils sont flagrantes au niveau d'une même planche (c'est-à-dire avec les mêmes pénétoigrammes) quand on passe d'une classe GTR à une autre. Par ailleurs, le PDG 1000 et le LRS 30 ont des réponses extrêmement proches.

III. LE PLAN EXPERIMENTAL

L'étude bibliographique, l'état des pratiques, l'établissement et la validation d'une méthodologie d'analyse des résultats sont autant d'éléments permettant la définition d'un plan expérimental correspondant aux attentes des Agences de l'Eau : c'est-à-dire juger et comparer la qualité et la fiabilité des réponses des pénétromètres dynamiques, utilisés pour le contrôle de compactage des remblais de tranchées, en fonction du matériau employé et de sa densité.

III.1. Matériels et matériaux

III.1.1. Les pénétromètres dynamiques testés

Les 4 pénétromètres dynamiques qui seront testés sont ceux qui ont été recensés sur le marché français comme servant à ce genre de contrôles. Leurs caractéristiques dimensionnelles et fonctionnelles sont récapitulées dans le tableau ci-dessous. (voir aussi le Chapitre 3).

Pénétromètres	PDG 1000	Sédrill	LRS A 30	PANDA
Hauteur de chute	75 cm	75 cm	50 cm	Non constante
Masse du marteau	35,2 Kg	64 Kg	30 Kg	2 Kg
Energie unitaire de pointe	16,4 J/cm ²	23,5 J/cm ²	14,7 J/cm ²	Variable
Masse morte battue (longueur d'une tige)	23 Kg + 4 Kg/tige (1 m)	14 Kg + 6 Kg/tige (1 m)	20 Kg + 2,90 Kg/tige (1 m)	? Kg + ? Kg/tige (0,5 m)
Cadence de frappe	30 cp/min (conseillée)	Variable 10 à 35 cp/min	Variable 15 à 30 cp/min	Variable conseillée à 30 cp/min
Diamètre de la pointe	45 mm (perdue ou fixe)	50,5 mm (perdue ou fixe)	36 mm (perdue ou fixe)	16 mm
Section de la pointe	16 cm ²	20 cm ²	10 cm ²	2 cm ²
Diamètre des tiges	40 mm	32 mm	22 mm	14 mm

Tableau 12 : Caractéristiques des différents pénétromètres dynamiques envisagés pour l'expérimentation future.

III.1.2. Les matériaux testés

Nous proposons de sélectionner des matériaux de différents types, représentatifs des sols de remblai actuellement utilisés ainsi que de ceux dont l'utilisation est susceptible d'augmenter compte tenu des recommandations de réemploi des matériaux excavés. Par ailleurs, ce choix permet de tester un panel représentatif du comportement des matériaux granulaires cohérents, insensibles ou non à l'eau.

- * 0/31,5 concassé (classé DC2 le plus souvent), qui est un matériau très fréquemment employé en remblayage de tranchées d'assainissement (Cf Etat des pratiques).
- * A1, matériau fin peu argileux, sensible à l'eau.
- * A1 additionné d'une fraction conséquente d'une coupure de 20/40, ceci afin d'évaluer la différence de réponse au sein d'une même classe de la GTR.
- * Sable (B1 ou D1), souvent utilisé autour de la canalisation, c'est également un matériau insensible à l'eau.

III.2. Définition des planches expérimentales

III.2.1. Mise en œuvre

✓ Nombre de planches expérimentales

Nous proposons de tester 4 matériaux et 2 objectifs de densification (q3 et q4), ce qui nous conduit à 8 planches expérimentales.

✓ Nombre de points de mesure

L'étude du CER comportait 10 sondages par planche et par appareil, ce nombre nous apparaît satisfaisant pour avoir un échantillon représentatif de la réponse d'un pénétromètre dynamique sur le sol testé. Toutefois ce nombre serait à augmenter en cas de dispersion plus élevée du matériau compacté.

✓ Disposition des essais pénétrométriques

Les essais pénétrométriques doivent être disposés en quinconce avec une interpénétration des appareils. La distance minimum entre les essais ainsi qu'entre un essai et la paroi de la tranchée doit être de 50 cm, ceci afin que les sondages n'interfèrent pas. Cela nous conduit à la disposition suivante :

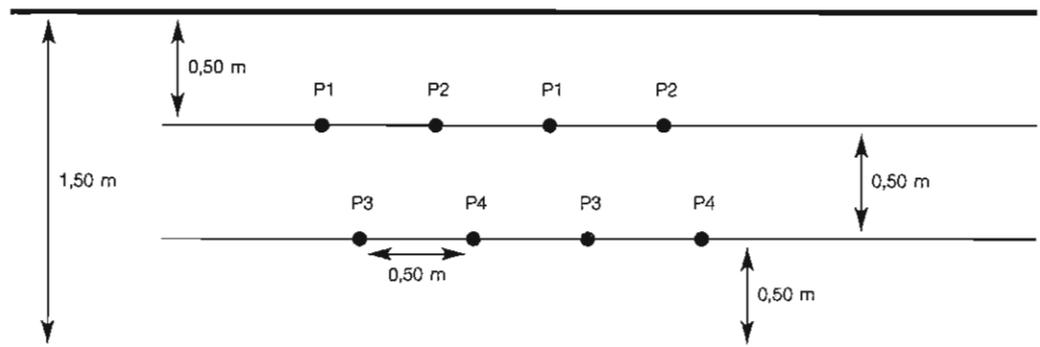


Figure 28 : Disposition des essais pénétrométriques le long de la planche expérimentale.

✓ Dimensions des planches

Le nombre d'appareils (4), le nombre de points de sondages par appareil (10) et les distances minimales entre sondages (0,50 m) et entre un sondage et les parois de la planche (0,50 m), conduisent à des dimensions, dans le plan, de 1,50 m de largeur et 10 m de longueur.

✓ Compacteur

Le choix du compacteur déterminera l'épaisseur (e) et le nombre de passes par couche (n). L'épaisseur est primordiale car c'est à partir de celle-ci que l'on déterminera la profondeur de la tranchée.

De préférence, une plaque vibrante sera utilisée car c'est l'appareil de compactage le employé sur les chantiers en tranchées d'assainissement et c'est un matériel qui permet un compactage à peu près uniforme sur la surface de la couche. Des difficultés éventuelles de manœuvrabilité et traficabilité sur les couches d'épaisseur 2e et 3e sont à prendre en compte.

✓ Mise en œuvre des couches en profondeur

Nous proposons une disposition des couches en profondeur comme sur le schéma ci-dessous, avec une planche différente pour chaque objectif de densification.

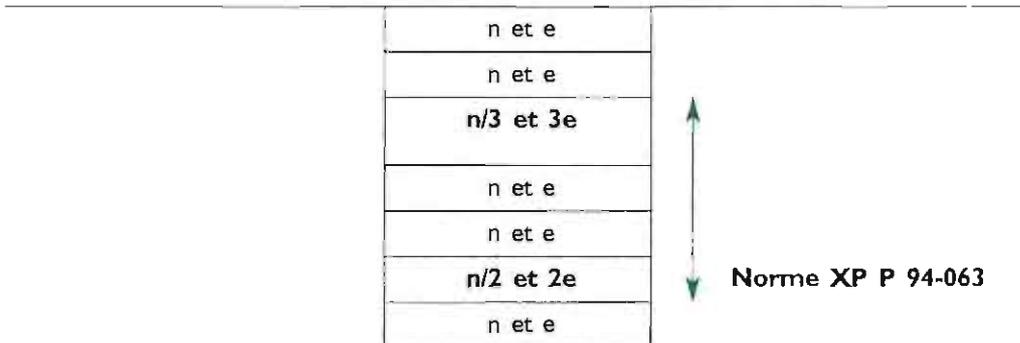


Figure 29 : Disposition des couches dans la tranchée
(n et e étant définis en fonction du compacteur et de l'objectif de compactage)

Au niveau des premières couches, le signal se met en forme.

Sur la hauteur du remblai, sont prévues deux couches avec des sous-compactages (n/2 et 2e ; n/3 et 3e) de niveau différent, ce qui peut permettre de se rendre compte de la discrimination de la réponse des appareils.

La partie inférieure du remblai correspond à la disposition selon les normes XP P 94-063 et XP P 94-105, ce qui permettra une comparaison avec les valeurs d'étalonnage.

Dans le cas d'une plaque vibrante pour laquelle l'épaisseur de couche (e) est de 25 cm, on aboutit à une profondeur de tranchée de 2,50 m.

✓ Mise en œuvre dans les tranchées

Il est à souligner que, selon la législation en vigueur, toute tranchée de plus de 1,30 m de profondeur doit voir ses parois protégées par un blindage si du personnel doit y descendre pour travailler. Il peut être envisagé que le compactage soit assuré par un engin télécommandé ce qui permet d'éviter la présence de personnel dans la tranchée ; cette solution risque cependant d'être insuffisante car des interventions humaines seront nécessaires pour effectuer les mesures et prélèvements définis ci-après pour caractériser chacune des couches. Il semble donc préférable d'imposer systématiquement l'utilisation d'un blindage adapté.

III.2.2. Dispositions pratiques

La nature, l'état hydrique et la densité finale, au sein d'une couche, des matériaux employés lors de l'expérimentation, jouent un rôle prépondérant sur la réponse des pénétromètres dynamiques. De ce fait, il faudra contrôler avec précision de nombreux paramètres avant et pendant la mise œuvre.

✓ Après réception des matériaux :

- * Identification GTR du matériau (granulométrie, sédimentométrie si nécessaire et limites d'Atterberg ou Valeur de Bleu).
- * Mesure de la teneur en eau.
- * Détermination du type de compacteur puis de n et e, ce qui permettra de déduire la profondeur des tranchées.

✓ *Après mise en place de chaque couche :*

- * Mesure de la topographie de la surface des couches.
- * Mesure des densités (gammadensimètre) et teneurs en eau en plusieurs points. Le gammadensimètre permet une mesure précise à 1 ou 2 % près et jusqu'à 30 cm de profondeur, il est possible d'effectuer deux ou trois mesures en un même point, au sein d'une couche, pour connaître la répartition de la densité sur la hauteur de la couche. Des mesures complémentaires à l'aide d'une double sonde gamma pourront éventuellement être réalisées notamment pour définir la densité des couches d'épaisseur importante (2e et 3e).

✓ *Au cours de l'essai pénétrométrique :*

- * Mesure de la densité réelle en place en quelques points (5) de la planche pour évaluer l'évolution des couches lors du compactage des couches supérieures. Cette mesure est possible à l'aide d'un gammadensimètre après décaissement d'une partie de la tranchée.
- * Mesure du frottement latéral à la fin de chaque sondage, l'utilisation de pointes perdues est alors obligatoire.

✓ *Après mise en place du remblai et exécution des essais pénétrométriques :*

- * Prélèvements de matériau jusqu'au terrain naturel en différents points (3) afin de pouvoir effectuer des mesures de teneur en eau sur toute la hauteur. Ces prélèvements pourront être effectués à la tarière, dès la fin de l'exécution des essais pénétrométriques, ceci pour éviter toute interférence sur la réponse des pénétromètres.

III.3. Résultats attendus

III.3.1. Analyse des paramètres de caractérisation du signal pour chaque appareil

Analyse, pour chaque pénétromètre dynamique, en fonction du matériau et de la densité, des coefficients définissant les paramètres suivants :

- * Bruit de fond,
- * Dispersion.

Il devra être menée une comparaison des pénétromètres dynamiques sur ces mêmes paramètres et tiré des conclusions sur d'éventuelles recommandations d'utilisation d'un appareil en présence de telle ou telle condition de matériau et/ou de densité.

III.3.2. Analyse de la pertinence des réponses en fonction de l'objectif de densification testé

- * Analyse du coefficient alpha,
- * Détection des couches sous-compactées (alpha et hauteur de dépassement).

Il devra être menée une analyse comparative des résultats de chaque pénétromètre en fonction du matériau et/ou de la densité. Aussi, il faudra analyser la variation de la réponse lorsque le calcul est effectué avec les droites limite et de référence de classes GTR proches de celle employée.

III.3.3. Représentativité du catalogue des cas en fonction B pour le matériau testé

La détermination de droites limite et de référence à partir de la dispersion des couches en fond de tranchée (disposition conforme aux normes en vigueur) permettra la comparaison avec les valeurs du catalogue de cas en fonction B pour chaque appareil.

III.3.4. Frottement latéral

D'après la norme, la mesure du frottement latéral à la clé dynamométrique doit être impérativement effectuée en dessous d'une profondeur de 2,50 m et la valeur doit rester inférieure à une certaine résistance, faute de quoi il est impossible d'utiliser le pénétrogramme en fonction B. Or, nous avons constaté lors des visites de chantier que, même si les sondages descendent rarement jusqu'à cette profondeur, la déviation des tiges peut engendrer un frottement non négligeable pouvant être variable en fonction des appareils et plus précisément de la différence entre le diamètre de la pointe et celui des tiges.

Le frottement latéral est-il effectif ? Est-il important ? Est-il hors norme ? Est-il plus présent pour certains appareils ? pour certains matériaux ?

III.3.5. Conclusion à l'issue du plan expérimental

La conclusion se devra de synthétiser les différents résultats sur les conditions de l'expérimentation et d'en soulever les difficultés et les limites éventuelles.

Elle devra également résumer les principales constatations concernant l'emploi des pénétromètres dynamiques testés (domaine préférentiel d'emploi), comparer les différents appareils utilisés, en souligner les défauts éventuels et, enfin, apporter un avis circonstancié sur la qualité du contrôle de compactage au pénétromètre dynamique.

IV. CONCLUSION

L'étude bibliographique a montré l'absence d'une étude globale comparant les résultats obtenus avec les principaux pénétromètres actuellement utilisés en France pour le contrôle de compactage des matériaux de remblayage des tranchées d'assainissement. Les quelques études mettant en oeuvre plusieurs appareils ont été réalisées avec un objectif particulier ce qui limite la portée et la généralisation de leurs conclusions. Par ailleurs la nécessaire amélioration de l'état des pratiques de contrôle ne pourra se réaliser que sur des bases scientifiques solides. Cette situation et ces constats nous conduisent à proposer un programme expérimental qui permettra de s'assurer de la fiabilité de ce type de contrôle, d'en fixer les limites éventuelles, d'analyser la cohérence des résultats obtenus avec différents pénétromètres et également d'apporter des justifications nécessaires à l'évolution de l'état des pratiques.

Pour s'assurer de la faisabilité et définir ce programme expérimental une méthodologie d'analyse des mesures a été recherchée et validée sur les essais réalisés dans le cadre de l'étude CER de 1999. Cette validation a permis, d'une part, de vérifier l'intérêt et la pertinence des paramètres mathématiques retenus, et, d'autre part, de tirer quelques enseignements sur la comparaison des résultats des différents pénétromètres ; sur ce dernier point on restera très prudent étant donné que les essais ont été réalisés avec d'autres objectifs et que nous n'avons pas tous les éléments nécessaires à la comparaison des résultats dans le sens où nous l'envisageons.

L'application, aux planches d'essais du CER, de la méthodologie proposée a montré, en premier lieu, que la comparaison des résultats des différents appareils testés est possible et significative dans un cadre expérimental où l'on peut maîtriser parfaitement l'homogénéité des matériaux utilisés (cf. observation du CER ci-dessous). Par ailleurs l'analyse des résultats de ces planches expérimentales met en évidence que dans certains cas les réponses des différents pénétromètres peuvent être contradictoires (au sens des anomalies définies dans les deux normes actuelles) sans que l'un des appareils ne présente de résultats "suspects" en terme de bruit de fond ou de dispersion. Bien que l'on ne puisse pas généraliser cette constatation, d'autant plus que certains paramètres du sol (notamment sa densité) ne sont pas connus, cela confirme l'intérêt de comparer les résultats des différents appareils. En particulier, l'importance des droits limite et de référence et donc de l'étalonnage est à nouveau mis en avant ce qui justifie le réexamen de ce point dans le programme expérimental.

Dans ces conditions le programme expérimental proposé satisfait au double souci de ne pas multiplier les essais (et donc leur coût) et de permettre de répondre aux principales questions soulevées par la présente étude. Dans ce sens on notera en particulier que seuls les deux niveaux de compactage les plus fréquemment pratiqués seront testés et que la définition des couches (épaisseur, nombres de passes) permettra simultanément, d'une part, de pouvoir comparer les résultats sur la base des étalonnages fournis par les constructeurs, mais également, d'autre part, d'obtenir un "point" d'étalonnage, pour chacun des appareils et des matériaux testés, qui pourra être comparé aux données des constructeurs puisque les couches respectent les conditions des normes pour ce faire.

Le CER précise que que les dispersions des planches dont nous avons utilisé les résultats ont des dispersions réduites du fait de l'emploi de matériaux plutôt bien homogènes, d'un compacteur large circulant sur une surface où le balayage était bien maîtrisé, sans recouvrements. Les conditions en tranchées sont nécessairement plus défavorables. Un cylindre approchant la largeur de la tranchée sera plus adapté qu'une plaque, et la planéité du réglage de chaque couche est à soigner. La protection du site contre les eaux est indispensable.



Une étude effectuée en 1985 a mis en évidence que la qualité du compactage des matériaux de remblayage en tranchées d'assainissement est un élément essentiel à la pérennité des conduites ainsi qu'à celle des structures sus-jacentes, notamment les chaussées routières. Dans ces conditions, il s'est avéré utile d'ajouter aux travaux de réception des tranchées d'assainissement, un contrôle du bon compactage des matériaux de remblayage.

A l'heure actuelle, peu d'appareils permettent de vérifier, après exécution des travaux, le bon compactage des matériaux de remblayage. Parmi ces appareils, il semble que seuls les pénétromètres dynamiques, dont la configuration a été adaptée à partir des appareils "classiques" de reconnaissance géotechnique, puissent assurer de façon rentable et peu contraignante ce contrôle a posteriori. Dans ce contexte, la présente étude a pour objectif de définir la fiabilité et la cohérence des résultats obtenus avec les différents pénétromètres dynamiques actuellement utilisés en France.

LES NORMES ET GUIDES

Les normes et guides techniques sur lesquels s'appuient les techniciens et ingénieurs des Travaux Publics lors de la réalisation du compactage ou lors de son contrôle au pénétromètre dynamique, sont des documents techniques qui ont été établis à partir de bases de données riches. Cependant, ils ne peuvent prendre en considération l'ensemble des variabilités liées aux matériaux naturels.

Parmi les guides techniques, le Guide des Terrassements Routiers (GTR) définit en particulier la classification des matériaux de remblai, il permet de regrouper les matériaux dont les comportements sont similaires afin que puissent leur être appliquées les mêmes règles de mise en œuvre. Ce guide intègre la classification des sols selon la norme NF P 11-300. Cette norme de classification permet de ranger les matériaux dans une classe au sein de laquelle leur comportement lors de leur utilisation en remblai sera similaire. Cette même classification est également employée pour diviser les sols lors de l'étalonnage des pénétromètres dynamiques mais n'est pas prévue à cette fin. Il en découle qu'au sein d'une même classe GTR, il peut exister une variabilité du comportement des matériaux sous sollicitation au pénétromètre dynamique.

Le Guide du Remblayage des tranchées, concerne quant à lui les conditions pratiques de réalisation du compactage en tranchées, il définit l'épaisseur des couches et le nombre de passes nécessaires pour atteindre la densité souhaitée en fonction du type de sol et du compacteur utilisé. Il précise aussi les dispositions pratiques de mise en œuvre. Ces règles constituent un précieux support pour l'utilisation des matériaux "classiques" mais doivent être utilisées avec précaution lors du remblayage avec des matériaux "spécifiques" que l'on est tenté d'apparenter à un sol de la classification.

Les normes relatives à l'étalonnage des pénétromètres dynamiques employés en contrôle de compactage sont largement décrites puis commentées. Ces normes tentent de prendre en considération tous les paramètres pouvant influencer sur le résultat d'un sondage pénétrométrique. Pour atteindre cet objectif, la méthode proposée consiste en un étalonnage spécifique de chaque appareil pour chaque classe (ou sous-classe) de sols. L'analyse de ces textes, qui décrivent donc la méthode d'étalonnage, mais aussi la méthode d'interprétation d'un sondage, nous a conduit à formuler quelques observations ou interrogations qui méritent l'attention des utilisateurs de ces normes.

LES APPAREILS ET LES ÉTUDES COMPARATIVES

Dans ce document, nous avons également rassemblé les caractéristiques techniques et les fonctionnalités des appareils pénétrométriques les plus utilisés en France, à l'heure actuelle, en contrôle de compactage des tranchées d'assainissement. Ils respectent tous les indications de calibrage technique et d'étalonnage indiquées par la norme les concernant. De fait, ils présentent de nombreuses similitudes et ne peuvent se différencier, sur ce point, que par leur qualité "mécanique" (mode de déplacement, résistance, robustesse...), leur système d'acquisition (la fiabilité et précision des capteurs installés sur l'appareil), leur convivialité et fonctionnalité des systèmes de commandes, ou encore leurs possibilités pour l'édition d'un procès verbal à la fois clair et détaillé.

Par ailleurs, nous avons résumé puis commenté les études déjà réalisées sur la réponse des pénétromètres dynamiques employés en contrôle de compactage. Ces différentes études confirment l'intérêt de la méthode de contrôle indirect de la densité au moyen de pénétromètres dynamiques par rapport aux méthodes de contrôle direct. Cependant, très peu de ces études proposent une analyse complète de la réponse d'un appareil sur plusieurs sols et plusieurs conditions de mise en place des matériaux. De même, il n'existe pas aujourd'hui de références concernant la cohérence des résultats obtenus sur un même remblai avec différents pénétromètres. Seule l'expérimentation réalisée en 1999 par le Centre d'Expérimentation Routière de Rouen (CER) a concerné un nombre important de sols et de pénétromètres. Toutefois, l'objet de cette étude n'était pas la comparaison des résultats des différents appareils mais la recherche de domaines préférentiels d'utilisation des différents pénétromètres notamment grâce à l'analyse des bruits de fond et de la variabilité des résultats.

LA PRATIQUE ACTUELLE DES CONTRÔLES

Parallèlement à cette étude bibliographique, une analyse des conditions de réalisation des contrôles a été effectuée sur la base de 10 visites de chantiers qui ont permis de donner un aperçu général de l'état des pratiques du contrôle et nous ont apporté de précieux enseignements.

Tout d'abord, cet état des pratiques souligne les variabilités géographiques importantes qui séparent le Nord et l'Est de la France du reste du pays, même si cette variabilité est en réalité fonction du maître d'œuvre plus que de la région. Aussi, l'impact de l'influence des Agences de l'Eau est loin d'être négligeable.

Il en résulte, en particulier, que des efforts doivent être faits pour valoriser correctement un contrôle de compactage au pénétromètre dynamique. Ces efforts doivent principalement porter sur l'implantation des sondages, sur l'identification GTR précise des matériaux, notamment la teneur en eau de ceux-ci, sur la zone d'enrobage de la conduite qui est rarement testée (trop souvent l'essai est arrêté bien au-dessus de la canalisation).

LE PROJET DE PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

L'étude bibliographique et le bilan réalisé sur l'état des pratiques ont permis de confirmer l'intérêt d'un programme expérimental de comparaison des différents pénétromètres ; la dernière partie de l'étude est donc consacrée à la définition des planches expérimentales ainsi qu'à la proposition d'une méthode d'analyse des mesures qui seront réalisées.

La méthodologie proposée pour l'analyse des essais a été appliquée à des essais comparatifs réalisés par le CER de Rouen en 1999. Dans ces conditions il a été possible, d'une part, de vérifier la pertinence de l'approche proposée et, d'autre part, de vérifier sur un cas réel que les différents pénétromètres peuvent être comparés de manière significative sous réserve d'une homogénéité suffisante des matériaux de remblais.

Sur cette base le plan expérimental proposé consistera en la réalisation, pour chaque matériau et chaque objectif de densité, d'une tranchée de 10 mètres de longueur, 1,5 mètre de large et environ 2,5 m mètres de profondeur (selon épaisseur des couches) qui sera remblayée avant de faire l'objet de 10 essais pénétrométriques avec chacun des 4 appareils retenus. Pour obtenir des résultats de portée suffisamment générale il conviendrait de tester au minimum 4 types de matériaux avec 2 objectifs de compactage pour chacun (Q2 et Q3) ce qui représente au total 8 tranchées élémentaires comme définit ci-dessus. Ces essais permettront de vérifier la cohérence des réponses des principaux pénétromètres actuellement utilisés en France en contrôle de compactage dans les conditions définies par les normes françaises.

OUVRAGES GENERAUX SUR LE COMPACTAGE

Arquié G. Le compactage, Routes et pistes. Paris : Fayolle, 1970, 313 p.

Costet J. et Sanglerat G. Cours pratique de mécanique des sols 1- Plasticité et calcul des tassements. Paris : Dunod, 1981, 277 p.

Parsons A.W. Compaction of soils and granular materials. London : HMSO, 1992. p.268-291.

NORMES ET GUIDES TECHNIQUES

NF P 98-231.2. Comportement au compactage des matériaux autres que traités aux liants hydrauliques ou hydrocarbonés – Détermination de la difficulté de compactage par essai à la presse à cisaillement giratoire (PCG) (Homol : Février 19992).

NF P 11-300 Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières.

XP P 94-063. Août 1997. Sols : reconnaissance et essais - Contrôle de la qualité du compactage - Méthode au pénétromètre dynamique à énergie constante. Principe et méthode d'étalonnage des pénétrodensitographes. Exploitation des résultats. Interprétation. Norme Expérimentale.

XP P 94-105. Sols : reconnaissance et essais - Contrôle de la qualité du compactage - Méthode au pénétromètre dynamique à énergie variable. Principe et méthode d'étalonnage du pénétromètre. Exploitation des résultats. Interprétation. Norme Expérimentale.

SETRA-LCPC. Guide technique : Remblayage des tranchées et réfection des chaussées. Paris : LCPC et SETRA, mai 1998. 59 p. + annexes.

SETRA-LCPC. Guide technique : Réalisation des remblais et des couches de forme. Fascicule I et II. Paris : LCPC et SETRA, septembre 1992. 87 p. + annexes (fascicule II).

COFRAC. Guide d'accréditation. Contrôles de compactage par la méthode au pénétromètre dynamique. Groupe de travail AGHTM-Fiabilité des réseaux, juin 1999, 17p.

ETUDES SUR LE CONTROLE DE COMPACTAGE

Agence de l'Eau Seine-Normandie. Réception des réseaux d'assainissement, Contrôle des conditions de pose et de compactage. Nanterre : AESN, mars 1995. 86 p. + annexes.

Amor S.J., Burtwell M.H. and Turner S.A. PANDA Dynamic Cone Penetrometer Assesment. Unpublished Project Report PR/CE/221/98, TRL 03/03. England : Transport Research Laboratory, février 1999. 23 p.+ annexes.

Chaineau L., Gourves R., Bacconnet C. Contrôle de compactage au pénétromètre dynamique à énergie variable. In : Le compactage des sols et des matériaux granulaires, Paris, 19 mai 2000. Presse Ponts et Chaussées, 2000. p. 133 – 14.

Coddens C. Contrôle du compactage des barrages en terre au pénétromètre dynamique léger. Mise au point et validation d'un mode opératoire en laboratoire. Mémoire d'ingénieur CUST : Université de Clermont-Ferrand, juin 1994. 75p. + annexes.

Degoutte G., Mathieu G. Suivi de l'application du protocole d'essais de réception des réseaux d'assainissement – Etudes du comportement mécanique des tuyaux enterrés et du contrôle de compactage des tranchées. Aix-en Provence : Cemagref, janvier 1988. 30p.

Devors C. Remblai expérimental d'Arles, Synthèse et analyse des essais réalisés sur le site et en laboratoire. Mémoire de maîtrise de Science de la Terre : CDGA, Université de Bordeaux I, mai 1998. 72p. + annexes.

Fayolle P. Contrôle de compactage des remblais au pénétromètre dynamique léger – Mode opératoire en laboratoire. Mémoire d'ingénieur CUST : Université de Clermont-Ferrand, juin 1995. 27p. + annexes.

Fayolle P. Contrôle de compactage des remblais au pénétromètre dynamique léger – Mise au point et validation d'un mode opératoire en laboratoire – Mise au point d'un mode opératoire d'essais de chantier. Mémoire d'ingénieur CUST : Université de Clermont-Ferrand, juin 1995. 133p. + annexes.

Folton C., Xavier L. Contrôle de compactage de remblais en matériaux fins à l'aide d'un pénétromètre dynamique léger – Suivi à long terme du remblai expérimental du Mas de Cazeneuve. Aix-en-Provence : Cemagref, Novembre 1999, 33p + annexes.

Galinie P. Contrôle de compactage des remblais au pénétromètre dynamique léger. Mémoire d'ingénieur CUST : Université de Clermont-Ferrand, juin 1998. 98p.

Giersh P., Klein C., Mathieu G. Le contrôle du compactage des tranchées d'assainissement à l'aide d'un pénétromètre dynamique léger. Courants, Mai-Juin 1994, vol. n°27, p.40-50.

Gourves R., Quibel A. Utilisation of dynamic penetrometers to control compaction – Methods and practices. In : Le compactage des sols et des matériaux granulaires, Paris, 19 mai 2000. Presse Ponts et Chaussées, 2000. p. 109 – 117.

Ilan Juran, A soil compaction technology assesment and demonstration. United States, Brooklyn : Urban Utility Center, septembre 1999. 35p.

Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Lille. Utilisation du pénétromètre dynamique pour le contrôle de compacité du remblayage des tranchées d'assainissement avec les matériaux régionaux les plus courants. Centre d'Etude Technique de l'Équipement Nord Picardie, novembre 1993, 16p. + annexes.

Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Nancy. Synthèse de résultats d'essais sur les matériaux utilisés en remblayage de tranchée. Rapport n°1 : 5/15 calcaire de Jaumont. février 1996. 17p. + annexes.

Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Nancy. Synthèse de résultats d'essais sur les matériaux utilisés en remblayage de tranchée. Rapport n°2 : 0/50 calcaire de Jaumont. juillet 1996. 16p. + annexes.

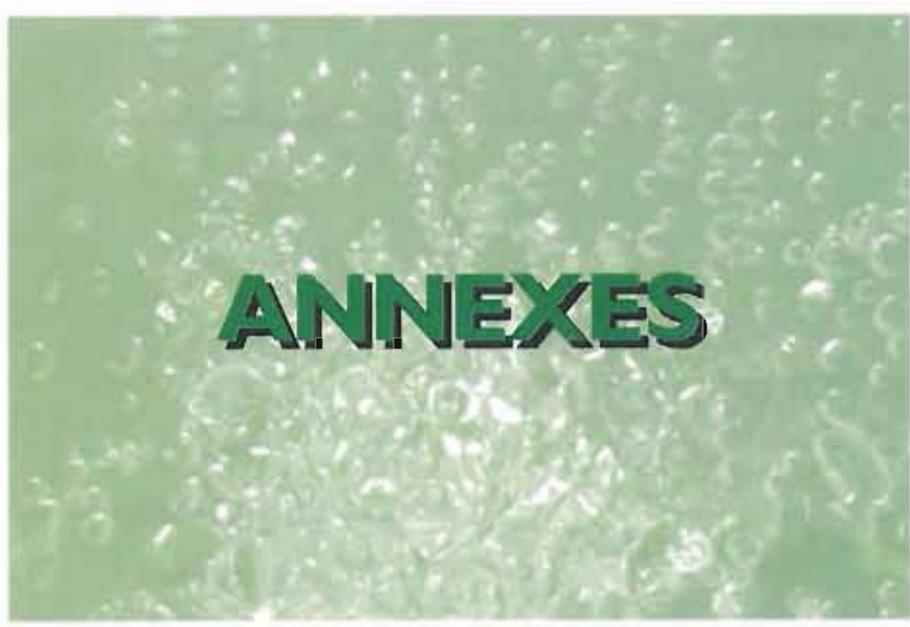
Morel G., Quibel A. Assurance qualité de la mise œuvre des matériaux de remblais, Contrôle extérieur du compactage, Utilisation du pénétrodensitographe LPC, Note technique LPC. Centre d'Études Techniques de l'Équipement Normandie Centre, 1993. 37p. + annexes.

Quibel A. Utilisation des pénétromètres dynamiques en contrôle de compactage. Evaluation des domaines d'emploi en fonction des caractéristiques techniques et de la granulométrie des matériaux. Tomes 1 et 2. Centre d'Expérimentation Routière de Rouen, septembre 1999.

Quibel A. Contrôle du compactage des remblais au moyen du pénétrodensitographe LPC, le PDG 1000. Ministère de l'Équipement, avril 1989, 36 p.

Yoro G. Godo G. Les méthodes de mesure de la densité apparente - Analyse de la dispersion des résultats dans un horizon donné. Cah. Orstom, 1989-1990, sér. Pédol., vol. XXV, n°4, p. 423-429.

Zhou S, Caractérisation des sols de surface à l'aide du pénétromètre dynamique léger à énergie variable, types "PANDA". Thèse de doctorat spécialité génie civil : Ecole doctorale de l'Université Blaise Pascal à Clermont Ferrand, 10 décembre 1997. 161 p.



FICHE DE VISITE DES CHANTIERS DE CONTRÔLE DE COMPACTAGE

GENERALITES :

Date de la visite :

Date des travaux de remblayage :

Lieu du chantier :

Nom et descriptif du chantier
(gravitaire ou sous pression ?) :

Nom de l'entreprise de contrôle :

Nom de l'entreprise des travaux de remblayage :

Nom du maître d'œuvre :

Nom du maître d'ouvrage :

● Voie de contact du contrôleur (contacté par le maître d'œuvre ? Nom du maître d'œuvre) :

● Qui paye le contrôleur ?

● Y a-t-il eu un autocontrôle ? Par qui ? Comment (PD, gammadensimètre...) ?

Observations :

CARACTERISTIQUES DU CHANTIER :

● Tranchée :

Assainissement (oui/non) :

Largeur :

Profondeur (mini/maxi) :

Diamètre de la canalisation :

Fil d'eau de la canalisation :

Nature de la canalisation (PVC, béton...) :

● Modalité de compactage :

Type de compacteur :

Epaisseur des couches (e) :

Nombre de passes par couche (n) :

Blindage (oui/non) :

● Matériaux :

Classe GTR :

Nature :

Teneur en eau lors du contrôle :

Objectif de densification :

Voix d'obtention des résultats (identification lors des travaux ou renseignements fournis par d'autre ? par qui ?, ou prélèvement lors du contrôle ?) :

● Le cahier des charges est-il connu du contrôleur ?

Observations :

IMPLANTATION DES SONDAGES :

- Qui a effectué l'implantation ?
- Quelle est la longueur du linéaire de tranchée ausculté ?
- **Nombre de sondages :**

Au total :

Distance maxi entre deux sondages :

Entre deux regards :

Observations :**PENETROMETRE DYNAMIQUE UTILISE :**

Energie constante ou variable :

Marque de l'appareil :

- **Caractéristiques de l'appareil :**

Section de la pointe (ou diamètre) :

Masse du mouton :

Hauteur de chute :

Pointe fixe ou perdue ?

Caractéristiques du sondage :

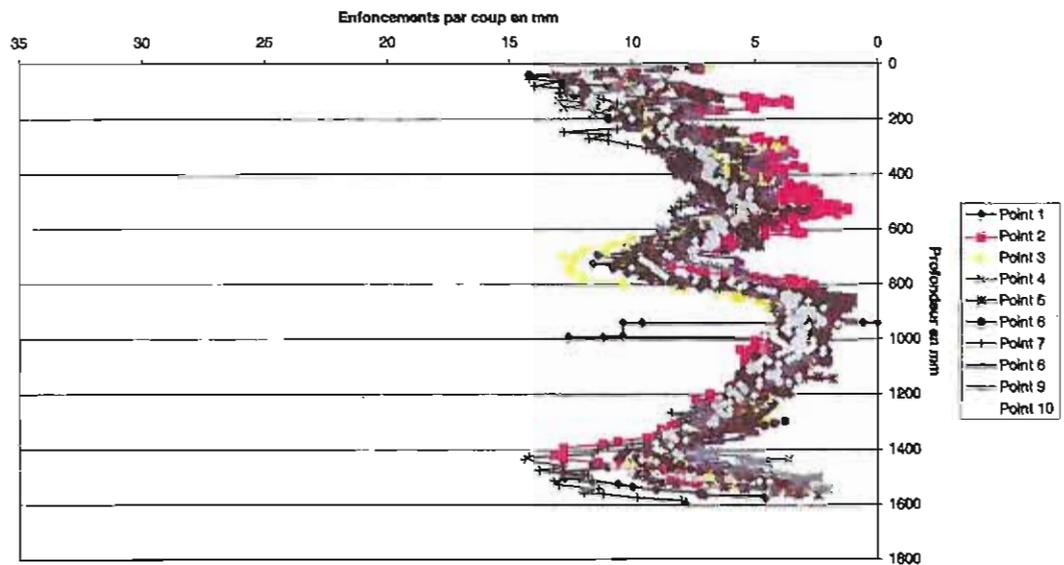
N° du sondage	1	2	3
Profondeur d'arrêt du sondage			
Arrêt automatique (oui/non)			
Avant trou en surface ? (raison et méthode d'exécution)			
Vérification de l'inclinaison du pénétromètre ?			
Vérification du frottement latéral ?			
Position par rapport à la canalisation			

INTERPRETATION ET PROCES VERBAL :

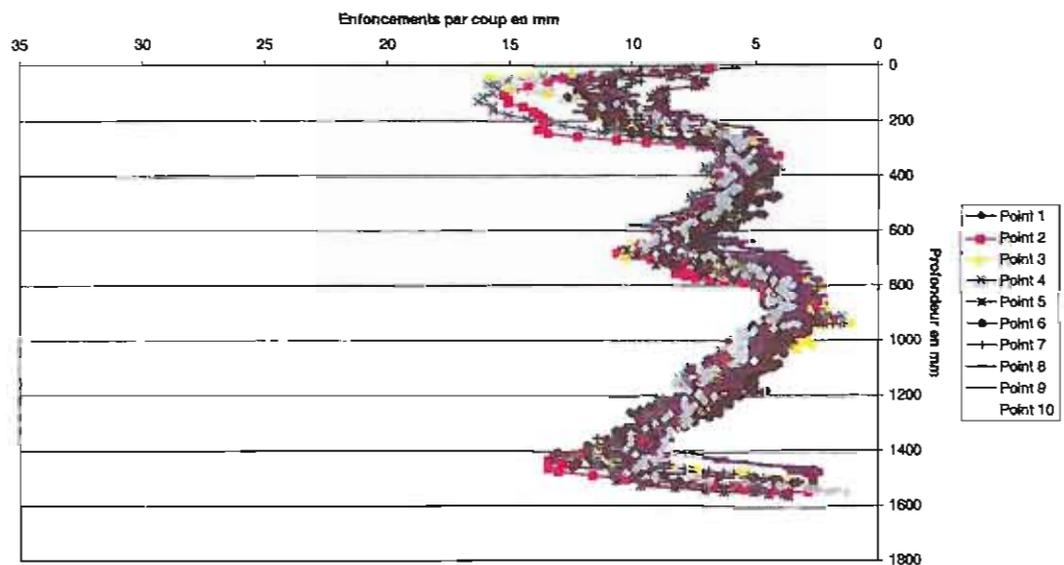
- Edition directe des résultats ?
- Analyse sur place des résultats ?
- Présentation des résultats édités sur le terrain (bruts, lissés, informations générales, objectif de densification) :
- Qui analyse les résultats ?
- Présence d'anomalies sur le chantier visité ?
- Si oui de quelle importance ?

HISTOGRAMMES DES RÉSULTATS DU CALCUL DES COEFFICIENTS DE BRUIT DE FOND ET DE DISPERSION

LRS 30 planche 1 (TV CETE C1B4h front. th)

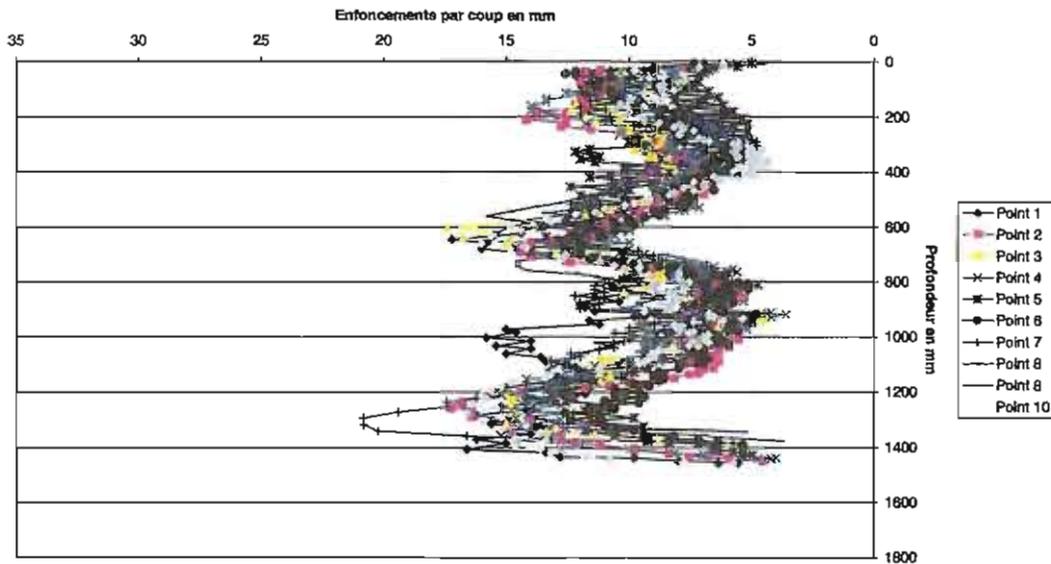


LRS 30 planche 2 (Grave SNEC, B4s)

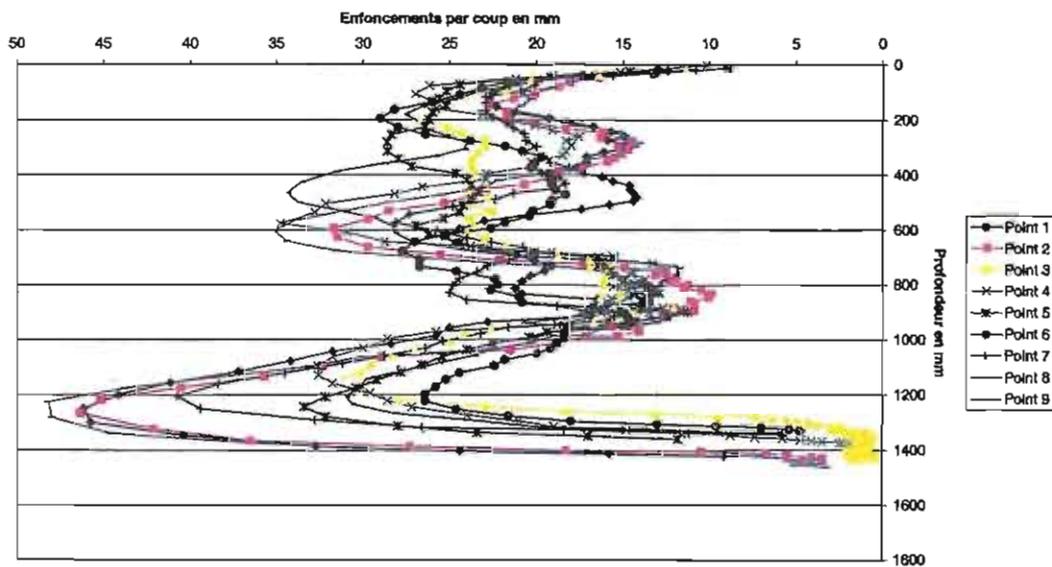


PÉNÉTROGRAMMES CUMULÉS POUR CHAQUE APPAREIL ET CHAQUE PLANCHE

LRS 30 planche 3 (Grave + Limon, B5h)



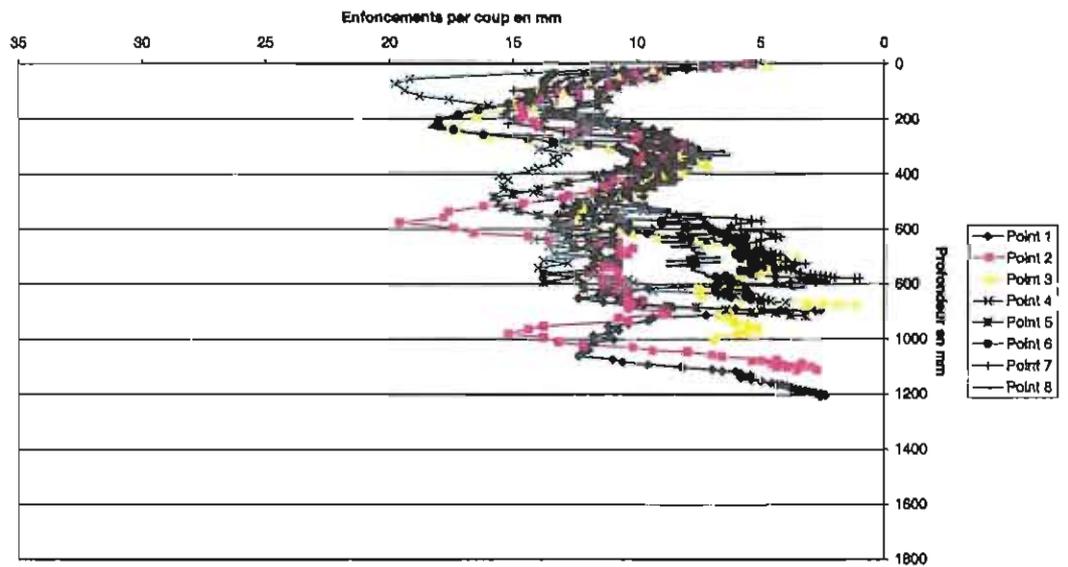
LRS 30 planche 4 (Limon, A1h proche m)



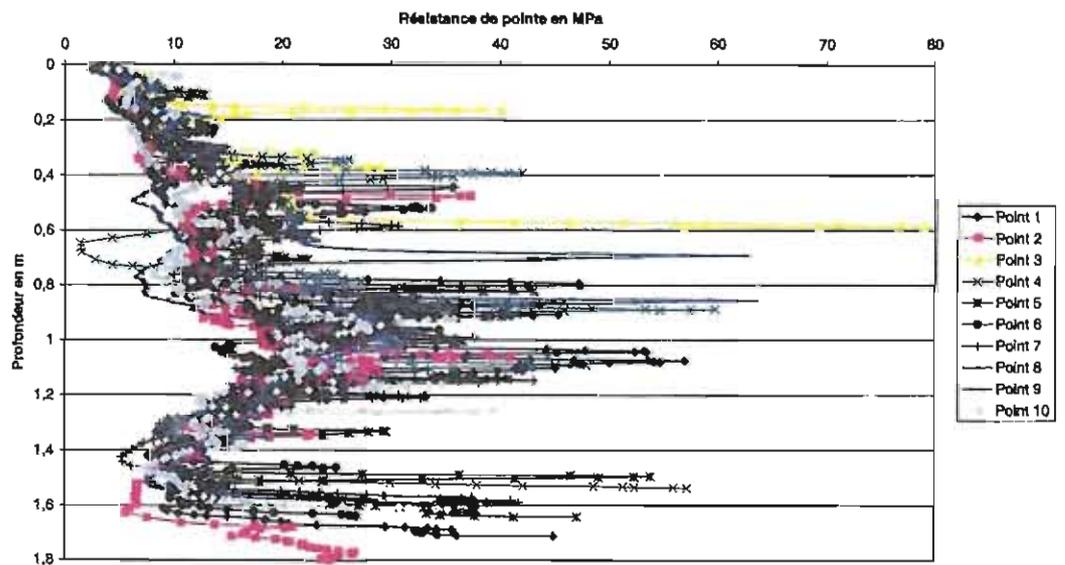
PÉNÉTROGRAMMES CUMULÉS

POUR CHAQUE APPAREIL ET CHAQUE PLANCHE

LRS 30 planche 5 (Limon + cailloux, A1m)

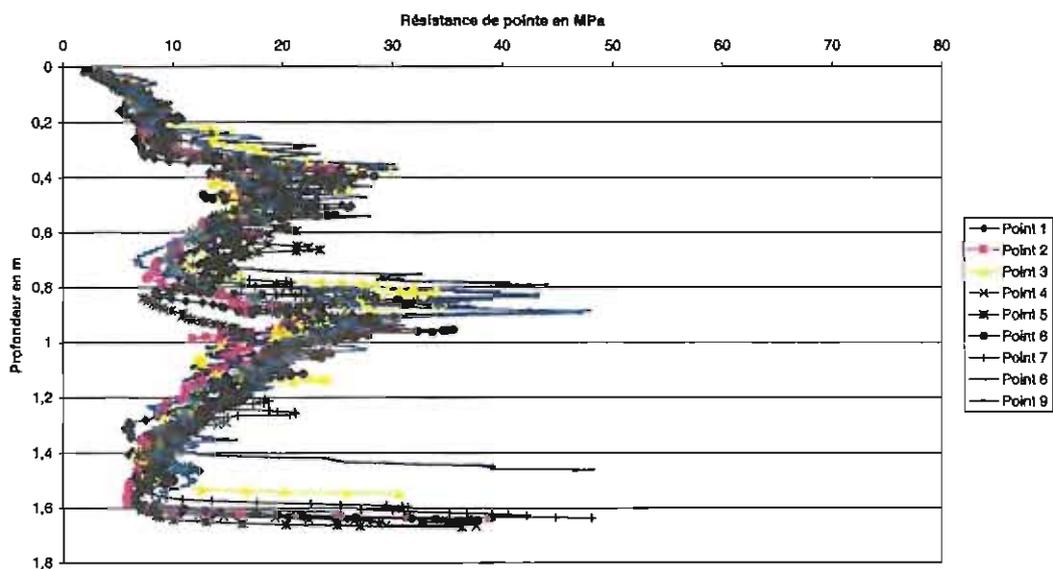


Panda planche 1 (TV CETE C1B4h front. th)

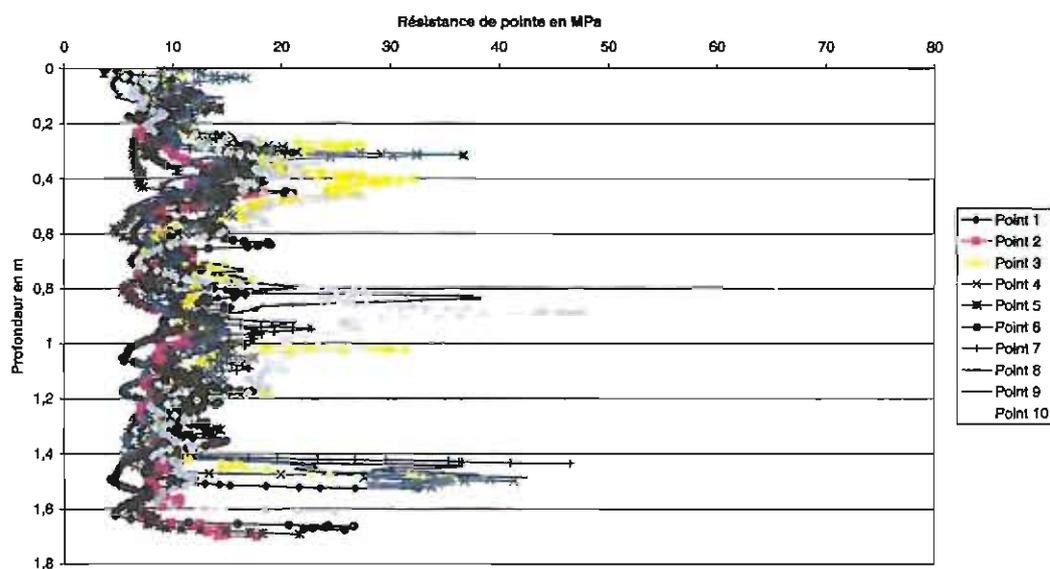


PÉNÉTROGRAMMES CUMULÉS POUR CHAQUE APPAREIL ET CHAQUE PLANCHE

Panda planche 2 (Grave SNEC, B4s)



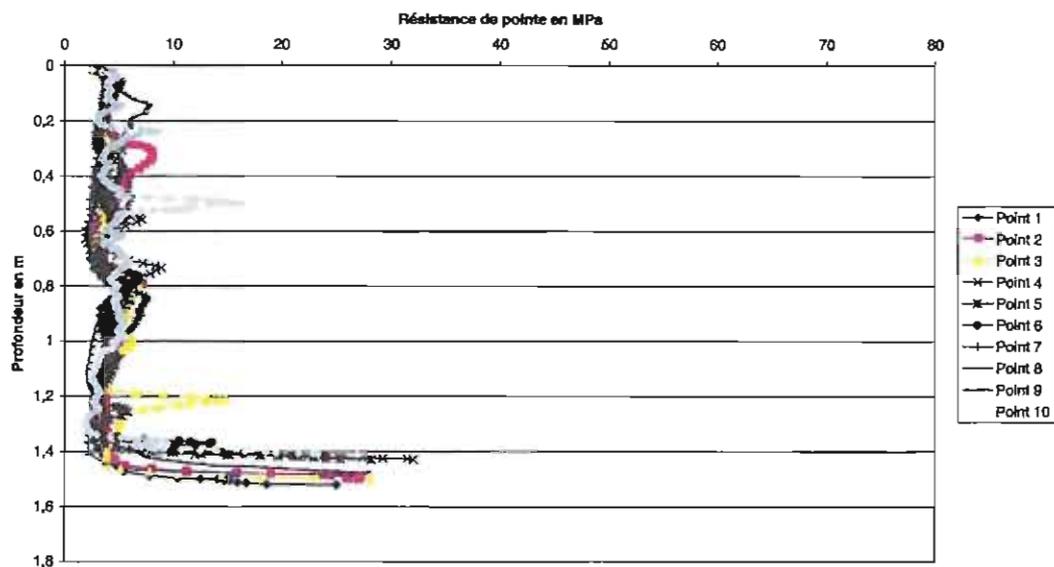
Panda planche 3 (Grave + Limon, B5h)



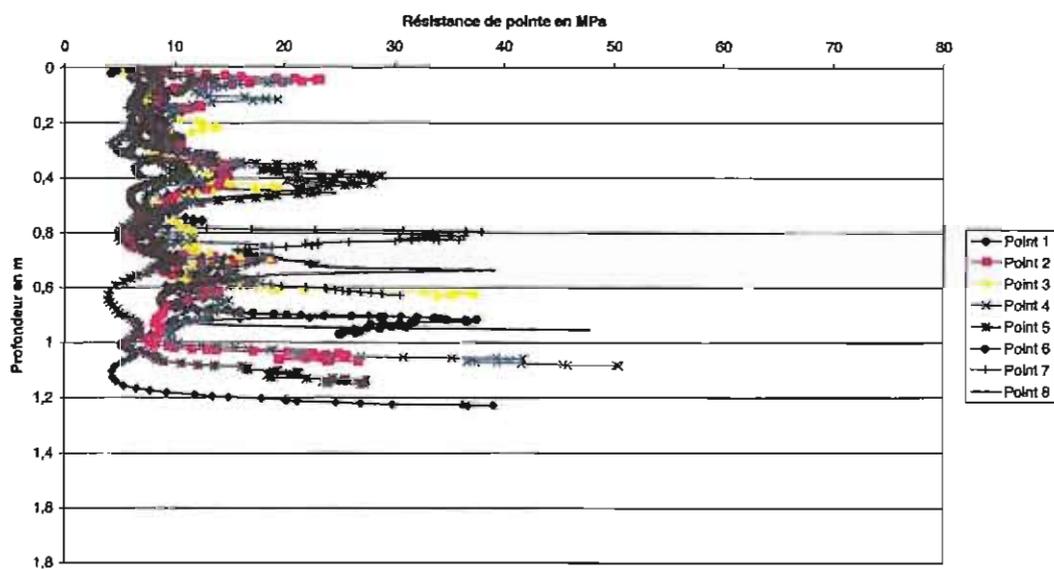
PÉNÉTROGRAMMES CUMULÉS

POUR CHAQUE APPAREIL ET CHAQUE PLANCHE

Panda planche 4 (Limon, A1h proche m)

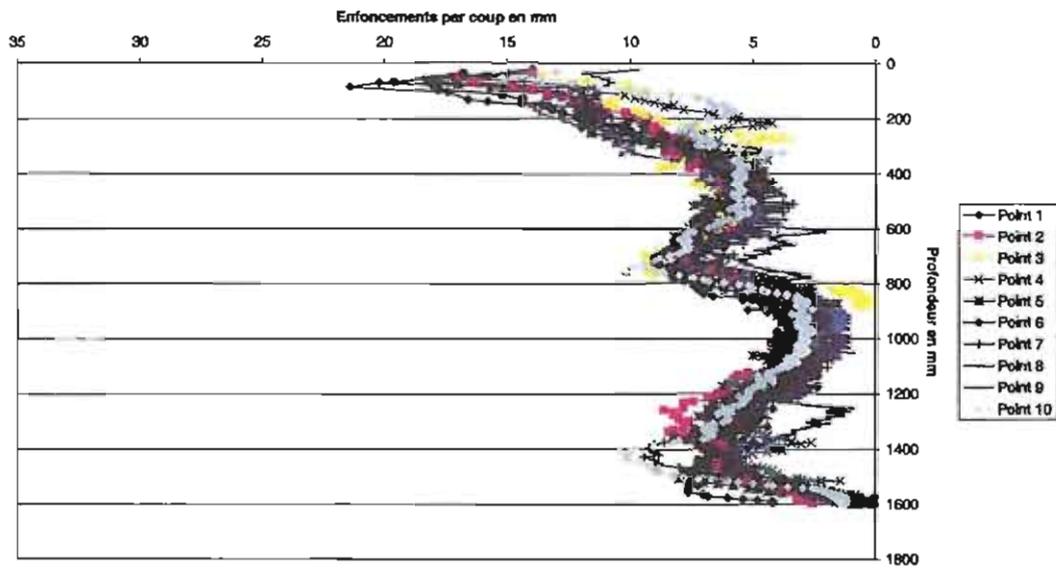


Panda planche 5 (Limon + cailloux 20/40, A1h proche m)

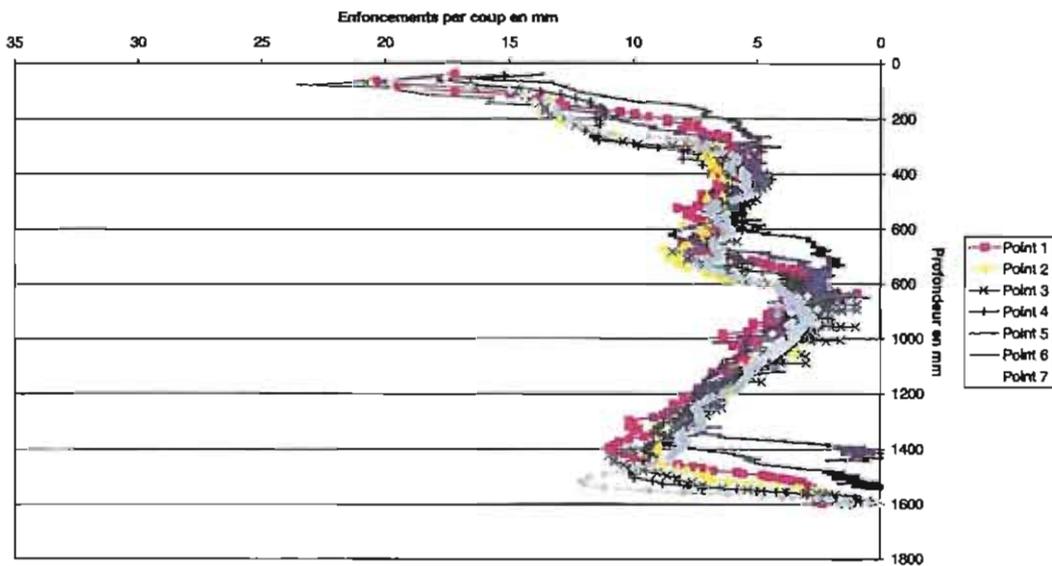


PÉNÉTROGRAMMES CUMULÉS POUR CHAQUE APPAREIL ET CHAQUE PLANCHE

PDG 1000 planche 1 (TV CETE C1B4h front. th)



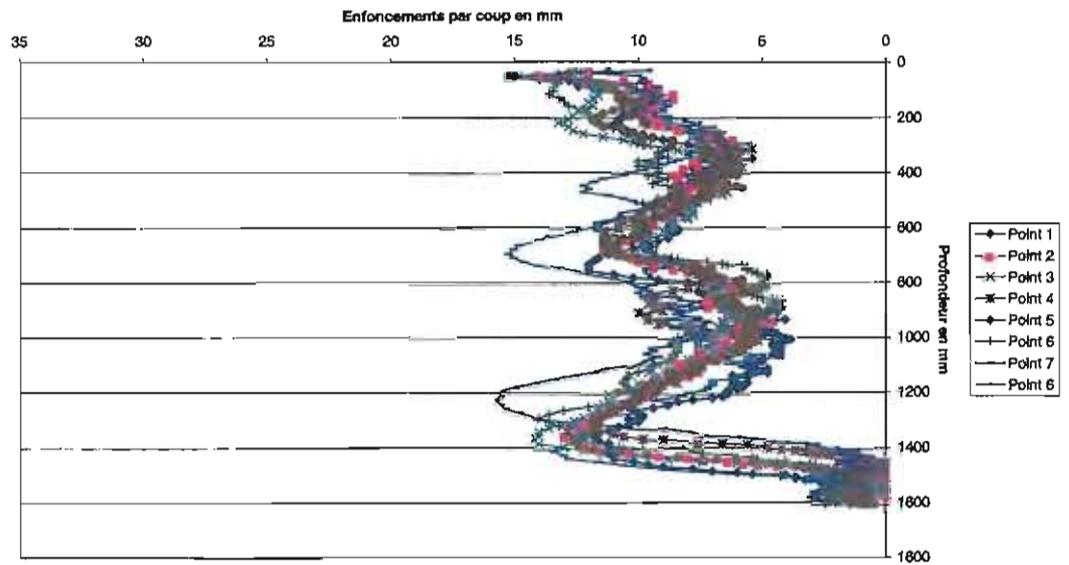
PDG 1000 planche 2 (Grave SNEC, B4s)



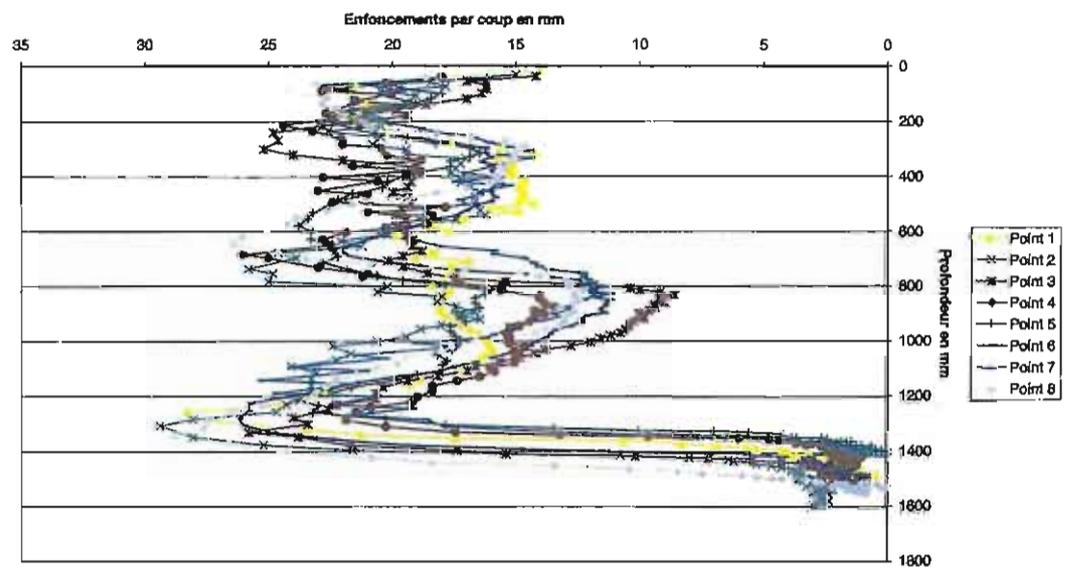


PÉNÉTROGRAMMES CUMULÉS POUR CHAQUE APPAREIL ET CHAQUE PLANCHE

PDG 1000 planche 3 (Grave + Limon B5h)

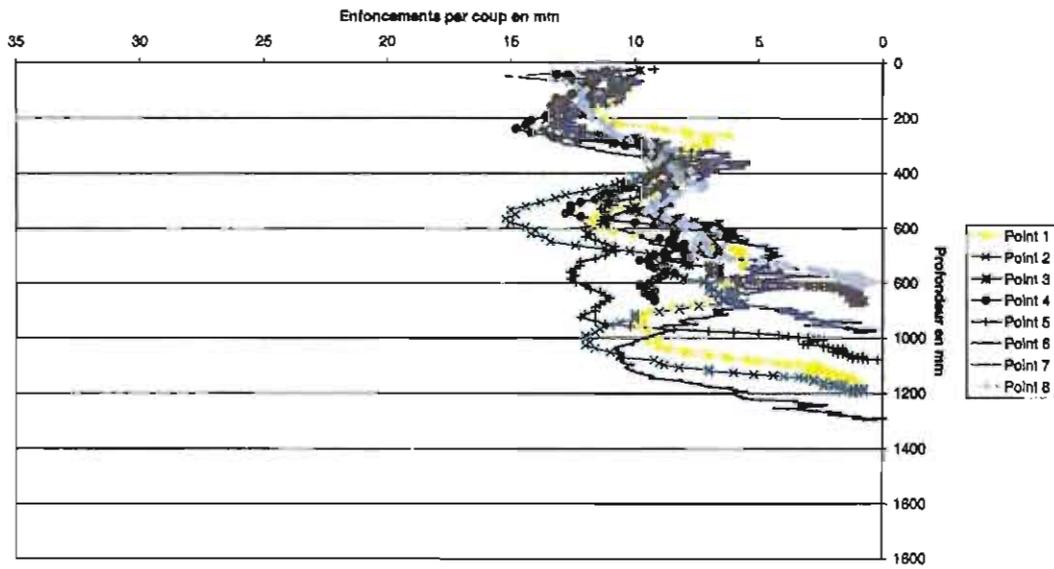


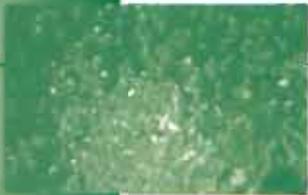
PDG 1000 planche 4 (Limon, A1h proche m)



PÉNÉTROGRAMMES CUMULÉS POUR CHAQUE APPAREIL ET CHAQUE PLANCHE

PDG 1000 planche 5 (Limon + cailloux 20/40, A1h proche m)





COEFFICIENTS ALPHA : TABLEAUX DE RÉSULTATS ET REPRÉSENTATIONS GRAPHIQUES SOUS FORME D'HISTOGRAMMES

PLANCHE 1

	Sol	C1B4 h, q4	C1B4 h, q3	C1B4 th, q4	C1B4 th, q3
Alpha min	Panda	1,61	0,49		
	PDG	1,35	1,53	1,75	2,10
	LRS	1,32	1,50	1,73	2,09
Alpha moy	Panda	6,49	3,45		
	PDG	1,87	2,51	2,00	2,76
	LRS	1,95	2,64	2,03	2,88
Alpha max	Panda	15,32	8,79		
	PDG	2,17	3,06	2,15	3,13
	LRS	2,27	3,21	2,18	3,27

PLANCHE 2

	Sol	B4 s, q4	B4 s, q3	B4 m, q4	B4 m, q3
Alpha min	Panda	- 0,21	- 0,35	0,32	- 0,05
	PDG	0,55	- 0,89	0,87	0,30
	LRS	0,79	- 0,38	1,04	0,67
Alpha moy	Panda	0,63	0,31	2,14	1,42
	PDG	1,31	0,89	1,46	1,48
	LRS	1,43	1,14	1,55	1,68
Alpha max	Panda	1,90	1,31	4,91	3,65
	PDG	1,78	1,98	1,83	2,21
	LRS	1,79	1,99	1,83	2,24

PLANCHE 3

	Sol	B5 h, q4	B5 h, q3	B5 m, q4	B5 m, q3
Alpha min	Panda	1,24	0,27	0,19	- 0,15
	PDG	1,45	0,76	0,85	- 0,06
	LRS	1,58	1,01	1,01	0,23
Alpha moy	Panda	3,31	1,52	1,22	0,68
	PDG	1,88	1,72	1,44	0,99
	LRS	1,96	1,84	1,52	1,11
Alpha max	Panda	7,17	3,86	3,15	2,24
	PDG	2,12	2,27	1,13	1,59
	LRS	2,20	2,38	1,87	1,70

**COEFFICIENTS ALPHA : TABLEAUX DE RÉSULTATS ET REPRÉSENTATIONS
GRAPHIQUES SOUS FORME D'HISTOGRAMMES**

PLANCHE 4

	Sol	A1 h, q4	A1 h, q3	A1 m, q4	A1 m, q3
Alpha min	Panda	0,45	- 0,26	- 0,14	- 0,55
	PDG	1,41	- 0,31	0,62	- 1,48
	LRS	1,33	- 0,51	0,50	- 1,81
Alpha moy	Panda	1,19	0,26	0,25	- 0,24
	PDG	1,77	0,70	1,15	- 0,16
	LRS	1,81	0,87	1,26	0,05
Alpha max	Panda	2,54	1,22	0,98	0,35
	PDG	1,95	1,22	1,43	0,52
	LRS	2,08	1,60	1,66	1,05

PLANCHE 5

	Sol	A1 h, q4	A1 h, q3	A1 m, q4	A1 m, q3
Alpha min	Panda	2,67	1,30	1,05	0,41
	PDG	2,01	1,39	1,52	0,74
	LRS	2,08	1,61	1,67	1,06
Alpha moy	Panda	4,99	2,97	2,29	1,41
	PDG	2,19	1,88	1,78	1,39
	LRS	2,18	1,90	1,83	1,45
Alpha max	Panda	9,64	6,22	4,79	3,43
	PDG	2,32	2,25	1,98	1,86
	LRS	2,25	2,11	1,94	1,74

PLANCHE I (TV CETE CIB4h front. th)

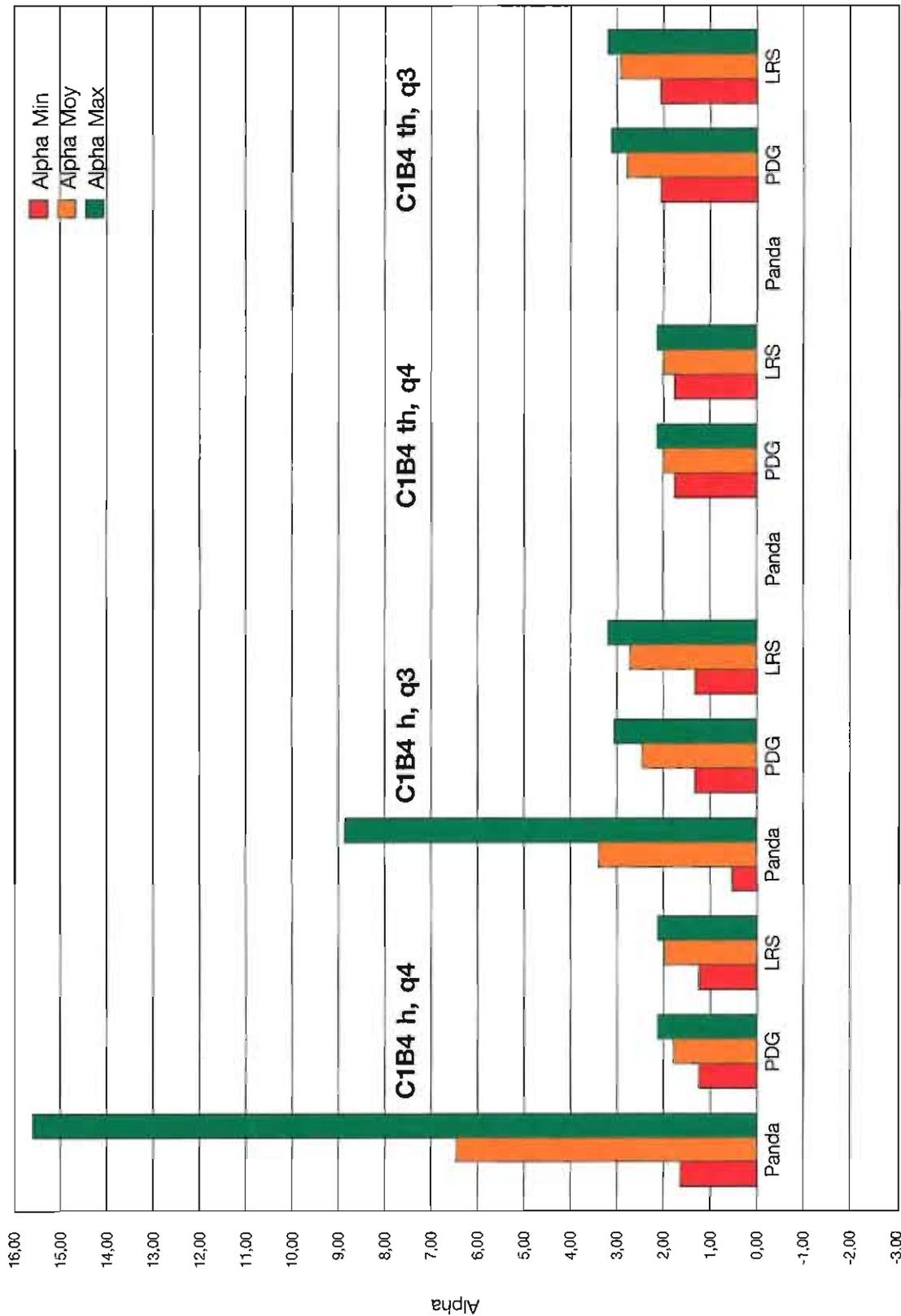


PLANCHE 2 (Grave SNEC, B4s)

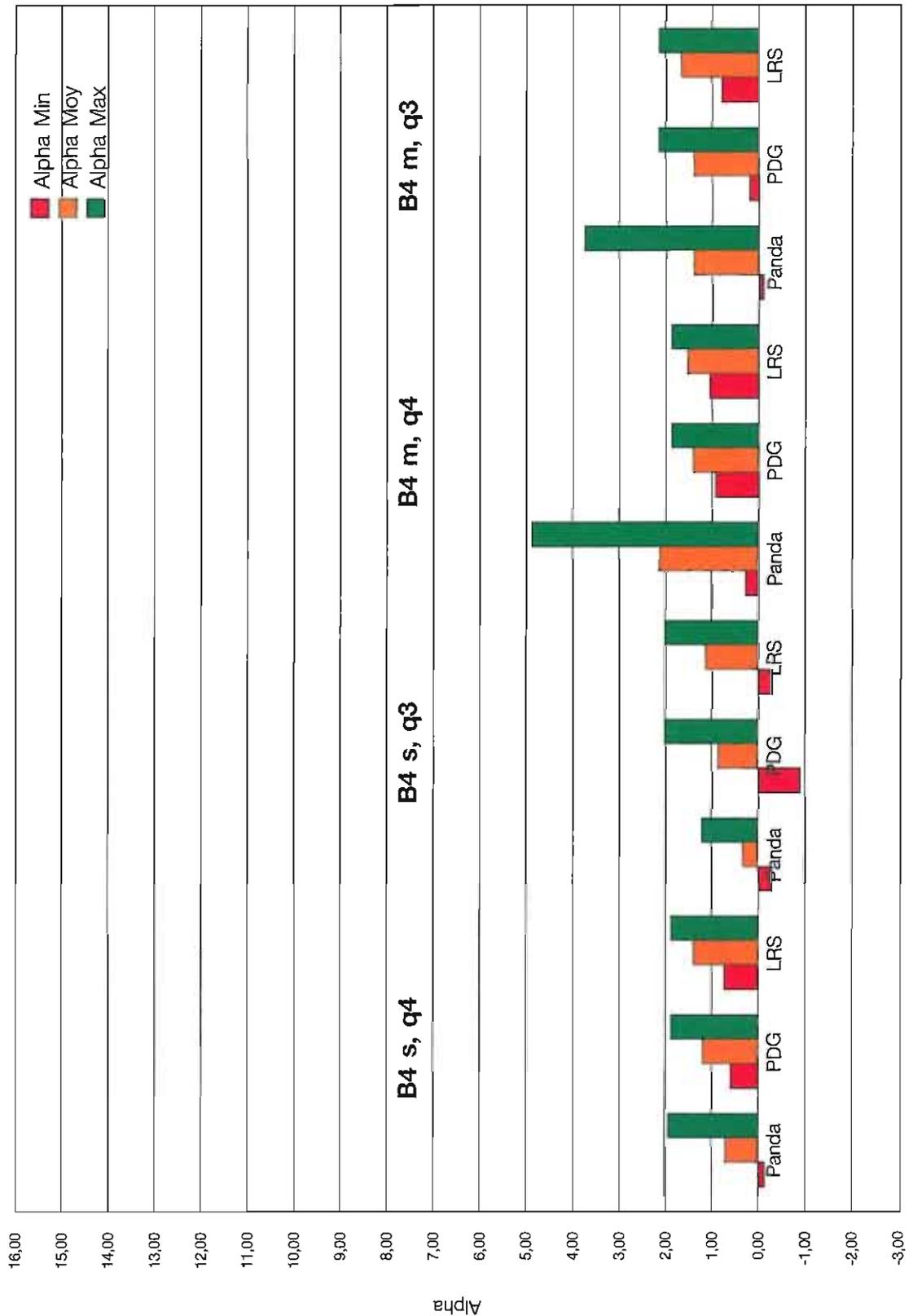


PLANCHE 3 (Grave + Limon B5h)

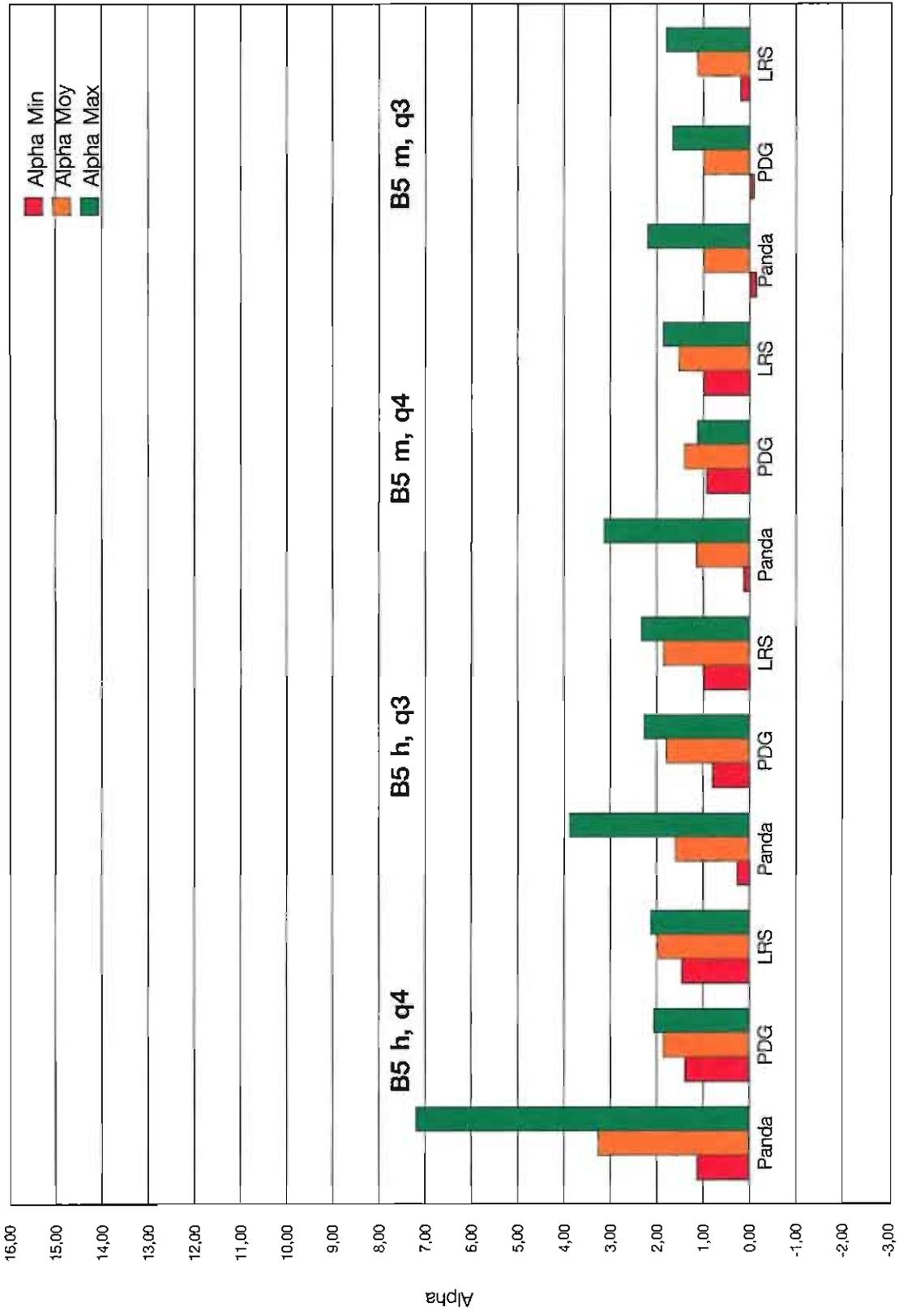


PLANCHE 4 (Limon, Ah proche m)

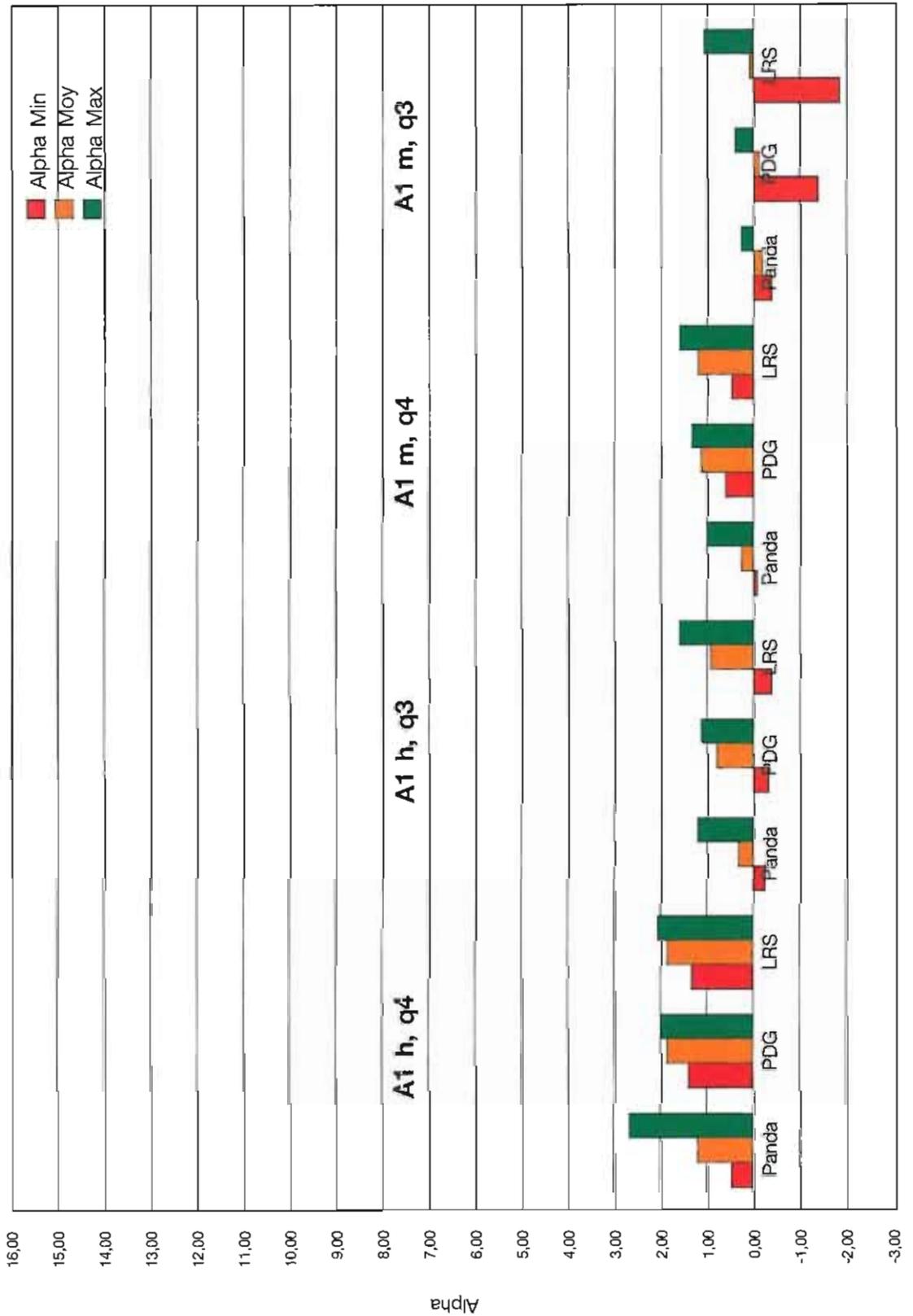
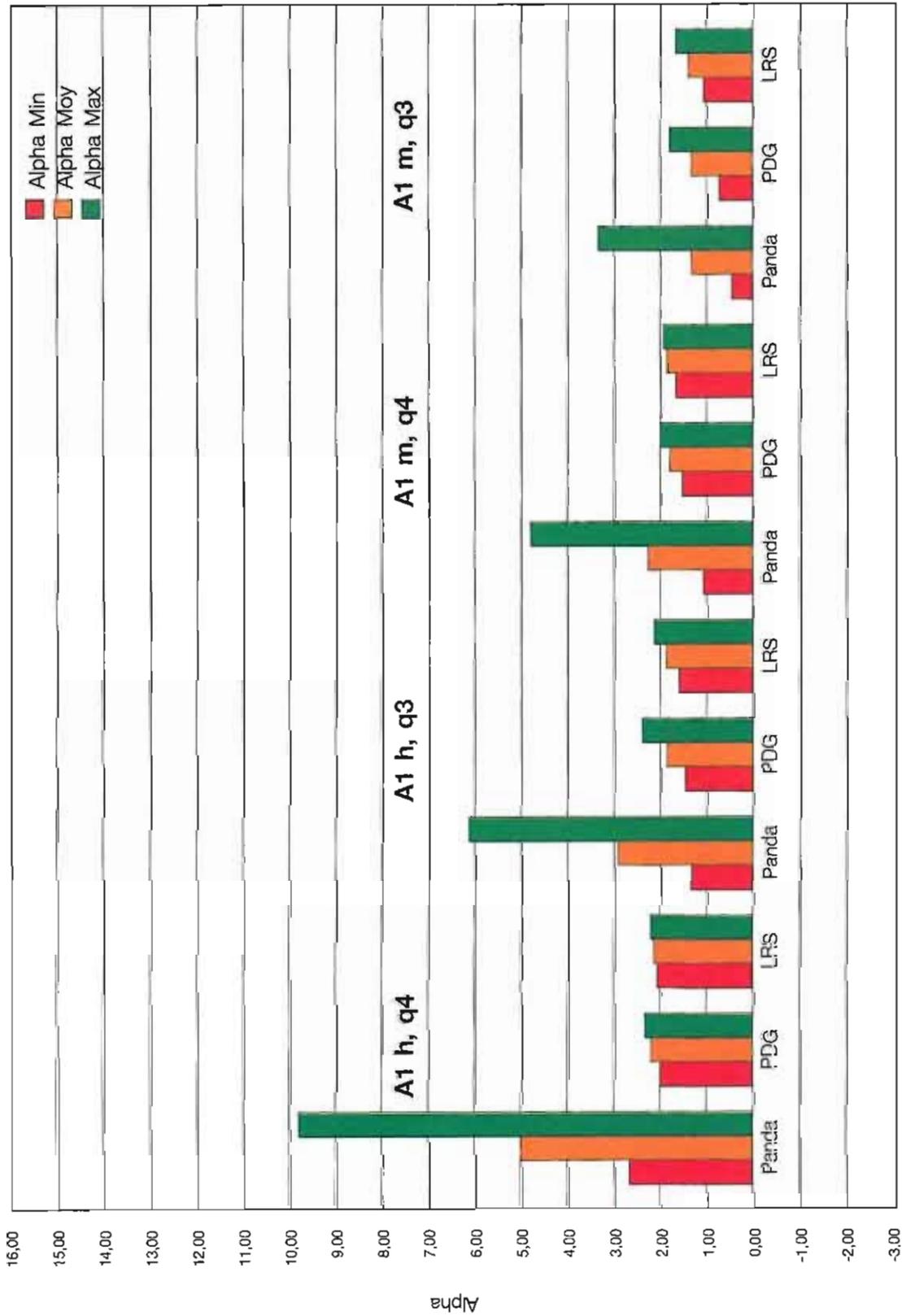
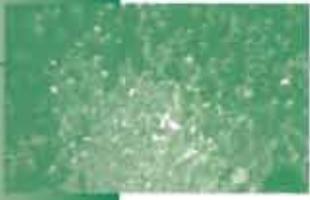


PLANCHE 5 (Limon + cailloux 20/40, A1h proche m)





CRÉDITS PHOTOS

Couverture :
M. Arnaud SANS - SATER

Fabrice TOUPART - AESN

P. DELANCE - AESN

Gérard DESVIGNES - La Précision Photographique pour DLE

René-Claude FOUILLOUX - AESN



Création et Impression :
IVC
Z.A. des Châtaigniers - 5, rue des Entrepreneurs
95150 TAVERNY - 01 34 18 18 17

D'un point de vue réglementaire, l'article 25 de l'arrêté ministériel du 22 décembre 1994 impose que "les ouvrages de collecte fassent l'objet d'une procédure de réception prononcée par la commune". Aussi, il précise qu'à cet effet, "la commune confie la réalisation d'essais à un opérateur qualifié et indépendant de l'entreprise chargé des travaux". "Cette réception comprend notamment le contrôle [...] de la bonne exécution des fouilles et de leur remblayage".

Ce contrôle est effectué au moyen d'essais de compactage. Ceux-ci consistent à vérifier que les conditions de mise en place des matériaux (épaisseur et densité des différentes couches) permettront de garantir la pérennité de la canalisation et des structures sus-jacentes, comme par exemple, les chaussées routières.

En effet, de nombreuses interactions existent entre la conduite et le milieu naturel environnant et l'excavation d'une tranchée provoque la rupture de l'équilibre naturel du terrain. La principale difficulté dans la pose de canalisations consiste donc en un rétablissement de cet équilibre dès la fin des travaux. Après la pose de la canalisation, la tranchée d'assainissement est donc remblayée et le matériau utilisé est compacté de sorte à constituer des conditions stables dans le temps, notamment vis-à-vis du tassement.

La vérification de l'état de compactage des matériaux de remblayage des tranchées se réalise, presque exclusivement, à l'aide de pénétromètres dynamiques, à énergie constante ou variable.

La présente étude a pour but de comparer les différents pénétromètres développés dans les dix dernières années et de tenter de définir une méthode d'analyse de la fiabilité (représentativité et répétitivité) des essais réalisés. Elle s'est déroulée en quatre phases :

- 1) Etude bibliographique.
- 2) Pénétromètres dynamiques disponibles sur le marché français.
- 3) Etat des pratiques.
- 4) Plan expérimental et méthodologie d'analyse.

Sites internet, pour en savoir plus



MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE
ET DU DÉVELOPPEMENT DURABLE

<http://www.environnement.gouv.fr>



Institut français de l'Environnement
<http://www.ifen.fr>



Agences de l'eau
<http://www.eaufrance.tn.fr>



Conseil supérieur de la pêche
<http://www.csp.environnement.gouv.fr>