

AMELIORATION DES SOLS DE FONDATION PAR COLONNES BALLASTEES CAS DES OUVRAGES D'ART DE LA ROCADE MEDITERRANEENNE DE NADOR

Par M. TAOUFIK BENCHELHA

AZIZ SAIDI / DPE KALAA

INTRODUCTION :

Les colonnes ballastées sont des colonnes constituées de matériaux granulaires, sans cohésion, mis en place par refoulement dans le sol et compactés par passes successives.

Ces colonnes ne comportent en particulier aucun liant sur leur hauteur. Elles peuvent être réalisées en maillages réguliers ou variables, en lignes, en groupes ou même de manière isolée.

Leur dimensionnement tient compte du type d'ouvrage, de la nature des charges, des tassements absolus et différentiels ainsi que de la nature du sol à traiter.

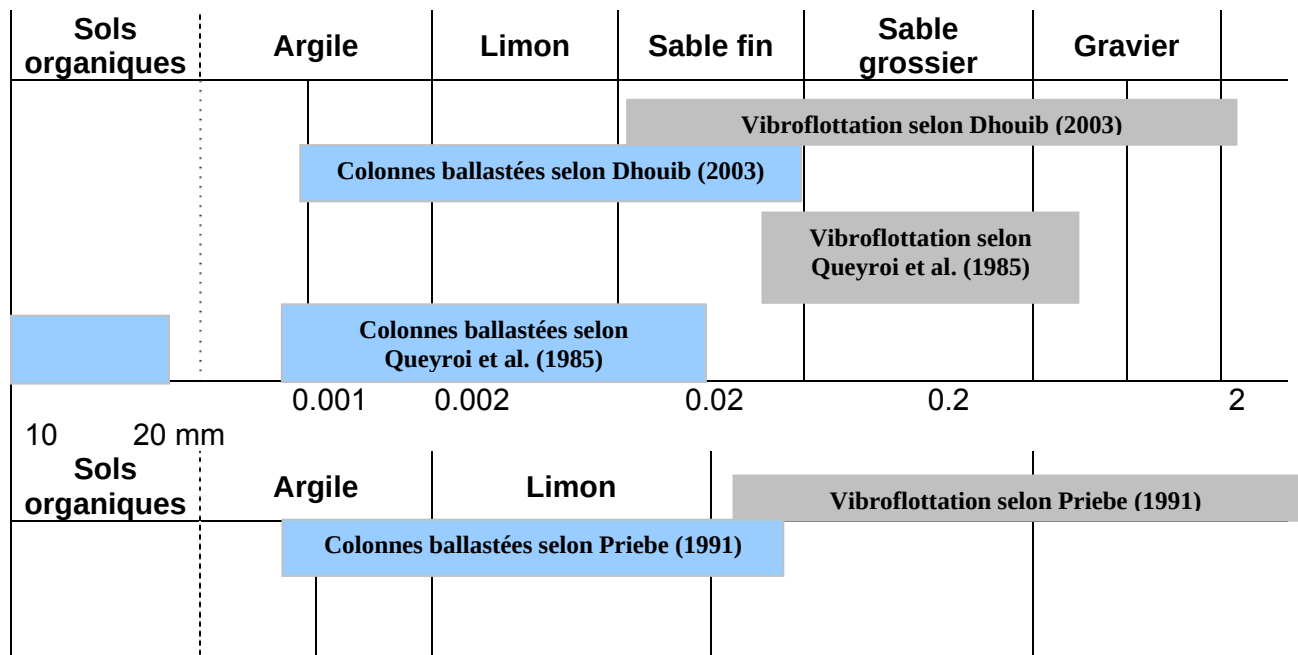
I - OBJECTIF DU TRAITEMENT :

L'amélioration de sol par colonnes ballastées consiste à mettre en oeuvre un «maillage » de colonnes constituées de matériaux ou graveleux, amenant une densification des couches compressibles et les rendant aptes à reprendre des charges issues de fondations.

Le traitement d'un sol par colonnes ballastées conjugue les actions suivantes :

- Augmenter la capacité portante du sol ;
- Diminuer les tassements totaux et différentiels ;
- Diminuer le temps de consolidation par création d'éléments drainant ;
- Diminuer les risques induits par les phénomènes de liquéfaction lors des séismes.

II - DOMAINE D'APPLICATION :



III - MODE OPERATOIRE :

La réalisation des colonnes ballastées se fait soit :

- **Par voie sèche** : On utilise le lançage à l'air.
- **Par voie humide** : On utilise le lançage à l'eau.

Le choix de l'outil, de ses caractéristiques et de la méthode de réalisation dépend étroitement :

- De la nature et de l'état de saturation du sol.
- Du but recherché.
- Des caractéristiques des matériaux d'apport.

Les matériaux d'apport doivent être de qualité et de granulométrie contrôlées et les plus homogènes possibles (gaves naturelles, roulées ou concassées).

La traversée des couches compactes ou d'obstacles peut être facilitée par un forage préalable, avec ou sans extraction de terrain. Tout volume excavé est rempli et compacté par le matériau d'apport.

1- Colonnes ballastées par voie humide :

- Afin de réaliser la colonne ballastée, le vibreur avec les tubes prolongateurs est placé au dessus du point projeté.
- Après démarrage du moteur, le vibreur est descendu lentement.
- Dès le début de l'opération, le sol est saturé en eau et les vibrations de l'outil génèrent un phénomène local et temporaire de liquéfaction du sol.

- Le vibreur, avec les tubes de rallonge, descend alors rapidement dans le sol sous l'effet de son propre poids.
- Lorsque la profondeur de traitement requise est atteinte, le lançage à eau est réduit, de telle façon que l'espace annulaire autour du vibreur et ses extensions reste ouvert grâce à la pression hydrostatique.
- Les matériaux d'apport sont alors introduits dans le trou pendant que l'alimentation permanente en eau assure que les matériaux atteignent bien la base du vibreur et que les particules fines du sol en place soient bien évacuées hors du trou.
- En remontant et redescendant le vibreur de façon contrôlée par passes successives jusqu'à la surface, le matériau d'apport est expansé et compacté dans le sol en place pour former la colonne ballastée.

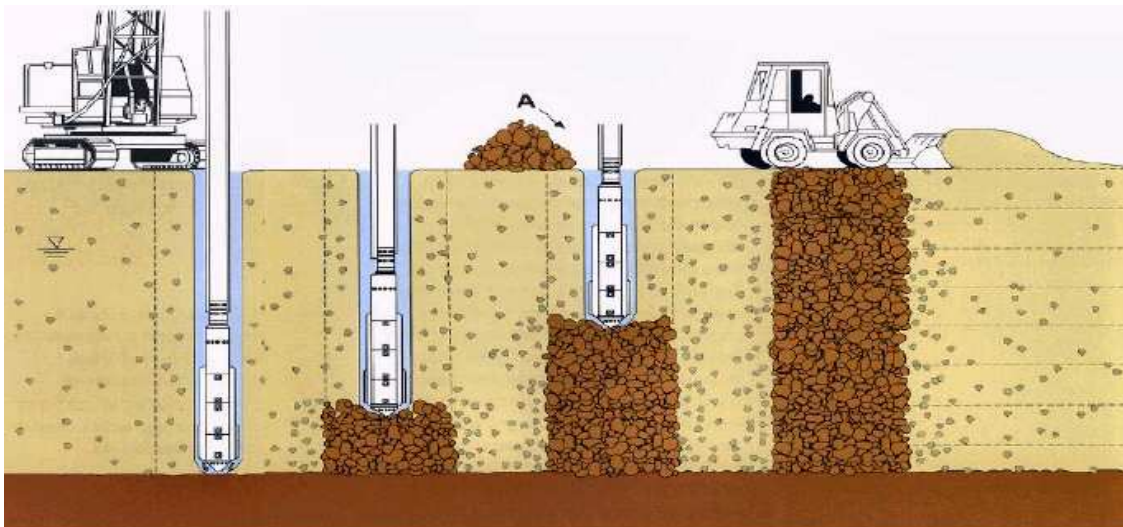
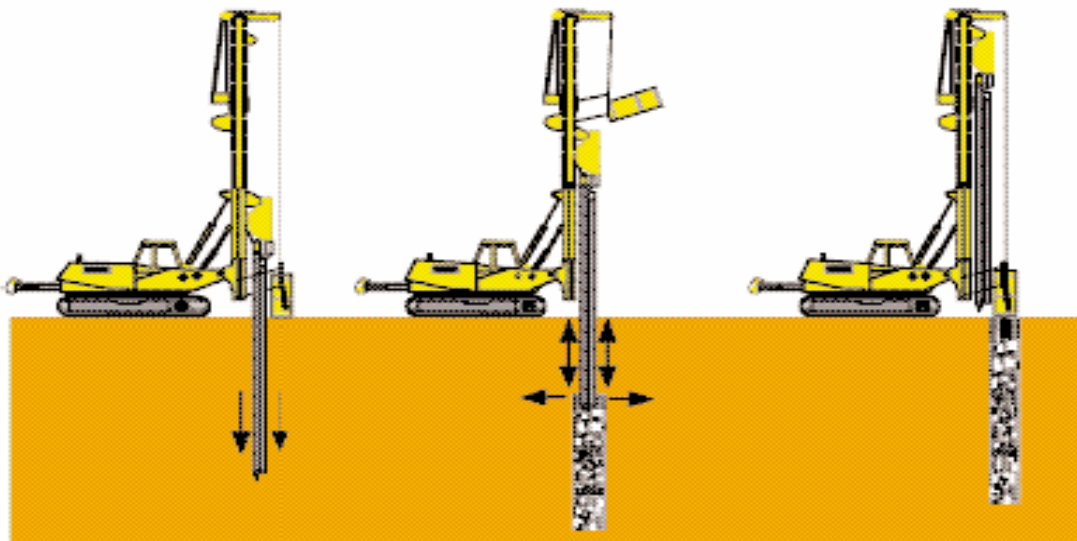


Schéma de réalisation des colonnes ballastées par voie humide

2- Colonnes ballastées par voie sèche :

- La machine est mise en station au dessus du point de fonçage, et stabilisée sur ses vérins. Un chargeur à godet assure l'approvisionnement en agrégats.
- Le contenu de la benne est vidé dans le sas. Après sa fermeture, l'air comprimé permet de maintenir un flux continu de matériau jusqu'à l'orifice de sortie.
- Le vibreur descend, en refoulant latéralement le sol, jusqu'à la profondeur prévue, grâce à l'insufflation d'air comprimé et à la poussée sur l'outil.

- Lorsque la profondeur finale est atteinte, le vibreur est légèrement remonté et le matériau d'apport se met en place dans l'espace ainsi formé. Puis le vibreur est redescendu pour expanser le matériau latéralement dans le sol et le compacter.
- La colonne est exécutée ainsi, par passes successives, jusqu'au niveau



prévu.

Schéma de réalisation des colonnes ballastées par voie sèche

III - DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES :

🚧 Diamètre des colonnes ballastées :

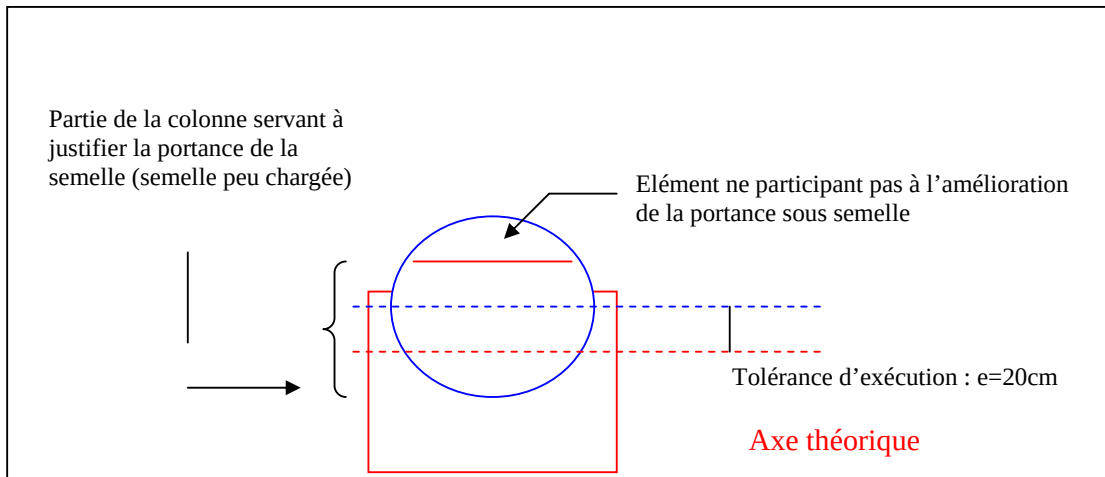
Le diamètre des colonnes ballastées dépend :

- De l'outil utilisé et son adéquation au terrain rencontré.
- Des caractéristiques des terrains rencontrés (le diamètre peut varier sur la hauteur de la colonne en fonction des résistances des couches traitées.).
- De l'énergie totale dépensée.

Le diamètre de la colonne par voie humide est plus important que par voie sèche (les diamètres usuels par voie humide varient de 80 à 120 cm alors que par voie sèche ils sont compris entre 50 et 80 cm).

Disposition des colonnes ballastées :

- Pour les **ouvrages à charges réparties uniformes**, les colonnes sont disposées selon un maillage régulier carré ou triangulaire.
- Sauf justification particulières et hors zone sismique, les colonnes ne sont pas disposées à l'extérieur de l'emprise de l'ouvrage concerné.
- Pour les **semelles filantes et isolées**, le maillage résulte du critère le plus défavorable : contrainte admissible et tassement admissible après traitement du sol.
- En l'absence de vérification adaptée, le débord de la semelle vis-à-vis de la position théorique du nu extérieur des colonnes doit être au moins égal à la tolérance d'exécution.



Cas des colonnes débordant des semelles

Mailles de référence maximales et minimales:

Définition :

- **La maille de référence** est la surface de l'emprise de l'ouvrage divisé par le nombre de colonnes situées sous celui-ci.
- **Le taux de substitution** ou pourcentage d'incorporation est le rapport de la section de la colonne à la maille ; il peut varier avec la profondeur.

- La **maille de référence maximale** est de **9m²** et le taux de substitution minimal est de 3%.
- La **maille de référence minimale** est de **2.4m²**.
- Pour les semelles filantes, l'entraxe maximal est de **2.5m** et ne peut être inférieur à **1.5 ϕ** et **1.2m**.

Tolérance d'exécution :

- Pour le **maillage en réseau**, la colonne ballastée occupe le centre de la maille élémentaire du sol traité et lui donne de nouvelles caractéristiques. Dans ce cas, il n'existe pas de notion d'« excentrement ».
- **Les semelles isolées et filantes** reposant sur le sol amélioré doivent être justifiées comme des éléments de fondation. La tolérance d'exécution est alors de +/-20cm.

 Coefficient réducteur sur les volumes de matériaux incorporés :

Généralement, on admet les **rapports** suivants **du volume approvisionné au volume théorique** :

- Colonnes vibrées avec alimentation en tête, sous l'eau : **1.3 à 1.5.**
- Colonnes avec incorporation en pied, à l'air : **1.2.**

IV - CAS DES OUVRAGES D'ART DE LA ROCADE MEDITERRANEENNE DE NADOR :

1- Données géotechniques :

Les reconnaissances effectuées aux niveaux des appuis des deux ouvrages d'art sur Oued Rhiss et Nekor ont montré qu'il y a un risque de liquéfaction certain au niveau du sous-sol ; et ce jusqu'à 16 à 20m de profondeur. En effet, le sous-sol est constitué en grande partie des alluvions sableuses avec parfois des passages qui contiennent des graviers et d'autres qui sont franchement argileux. Des formations dont les essais d'identification ont montré leur susceptibilité à la liquéfaction, et celle-ci a été confirmée par les essais SPT (Standard Penetration Test) réalisés in situ et qui ont montré que la résistance au cisaillement est inférieure à celle induite par le séisme pris en compte pour la région.

2- Solution retenue :

En vue d'améliorer les caractéristiques du sol ainsi que la résistance cyclique au cisaillement et en tenant compte de la nature du sol, la solution retenue est la vibro-flottation avec substitution par du ballast (colonnes ballastées par voie humide).

L'intérêt de cette méthode c'est qu'elle traite tout le sol :

- Les passages sableux par densification ;
- Les passages argileux par substitution.

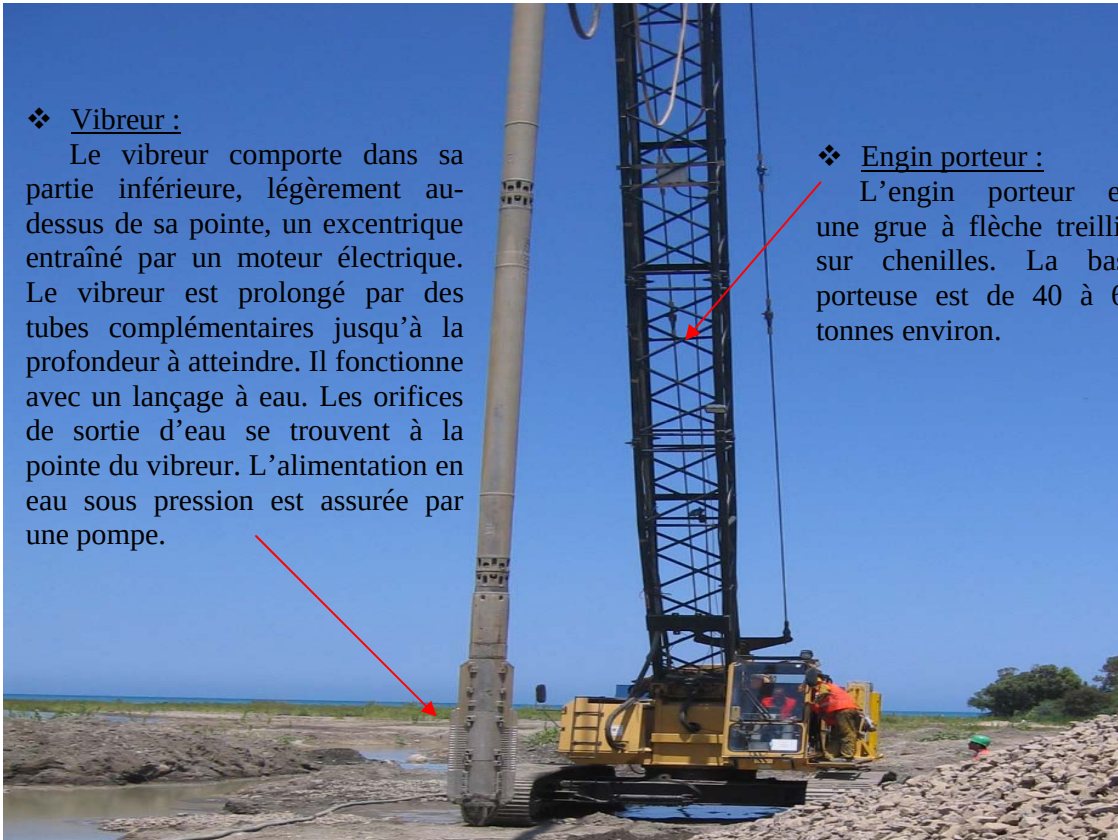
3- Moyens mis en oeuvre :

❖ Vibreur :

Le vibreur comporte dans sa partie inférieure, légèrement au-dessus de sa pointe, un excentrique entraîné par un moteur électrique. Le vibreur est prolongé par des tubes complémentaires jusqu'à la profondeur à atteindre. Il fonctionne avec un lançage à eau. Les orifices de sortie d'eau se trouvent à la pointe du vibreur. L'alimentation en eau sous pression est assurée par une pompe.

❖ Engin porteur :

L'engin porteur est une grue à flèche treillis, sur chenilles. La base porteuse est de 40 à 60 tonnes environ.



4 - Différentes étapes de réalisation des travaux :

Etape 1 :

- Le vibreur est placé au dessus du point projeté ;
- Lanage à eau en cours.



Etape 2 :

Le vibreur descend sous l'effet de son poids propre et génère un phénomène temporaire de liquéfaction de sol.



Etape 3 :

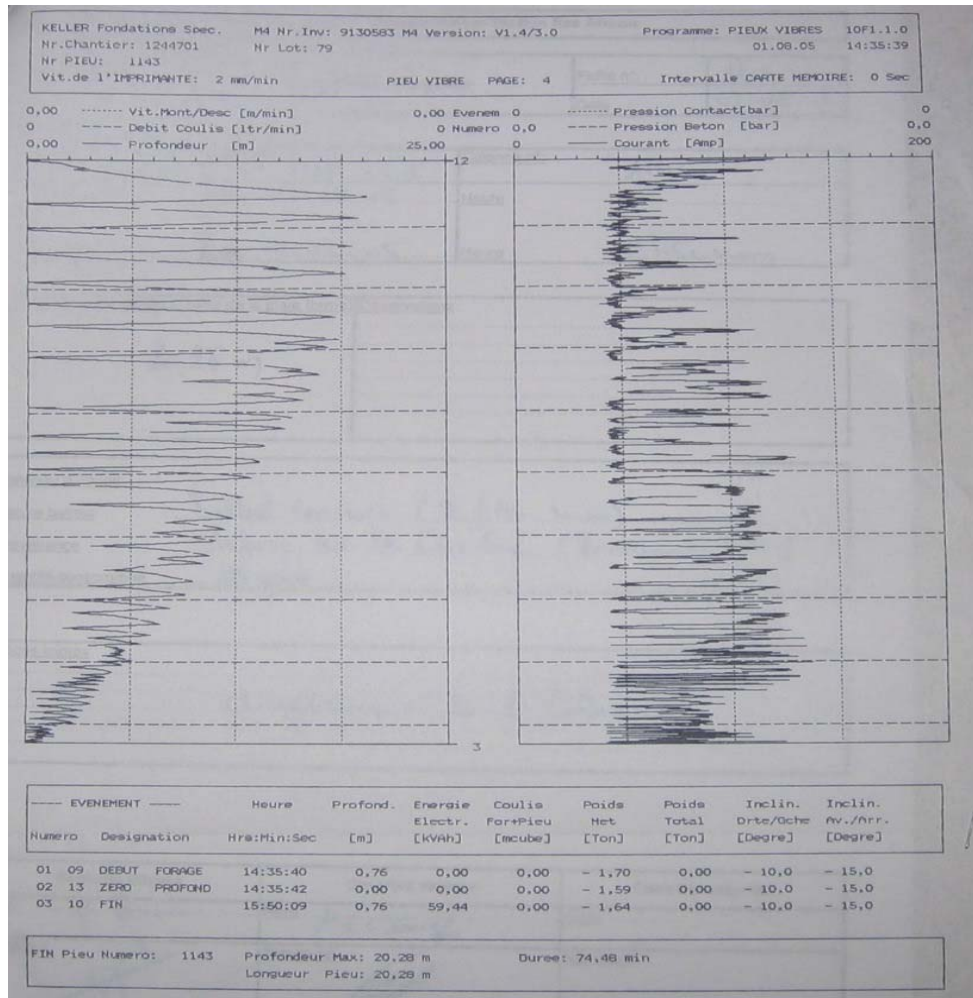
- Evacuation des particules fines du sol en place ;
- Introduction des matériaux d'apport qui seront compactés par passes successives pour former la colonne ballastée.



5 - Contrôle et réception des travaux :

5.1 - Enregistrement des paramètres de travail :

La mise au point du vibreur associé à l'enregistreur de paramètres permet un contrôle continu, à l'exécution et à posteriori, de la qualité du compactage et de la continuité de la colonne et de plus, la possibilité de contrôle de l'apport des matériaux en fonction de la profondeur permet de connaître le diamètre effectif.



Pour chaque colonne ballastée réalisée, un graphique parallèle en fonction du temps est édité, permettant de vérifier :

- L'atteinte de la couche compacte en fin de fonçage de l'outil ;
- L'intensité du compactage à tous les niveaux de la colonne ;
- La continuité de la colonne sur toute sa longueur ;
- La profondeur en fonction du temps (vitesse de pénétration).

Par ailleurs, les enregistrements indiquent le numéro de chaque colonne, la date de réalisation et l'heure de début et fin de fonçage avec le temps global de durée d'exécution.

Un listing récapitulant la production réalisée est également édité en fin de journée.

5.2- Essai de chargement :

L'essai de chargement que représente la photo ci-dessous a pour objectif d'observer le tassement en grandeur nature d'une colonne ballastée afin de mettre en évidence son comportement en matière de déformation sous une charge verticale pour valider les hypothèses de dimensionnement.



Le dispositif de mise en charge est constitué par un vérin hydraulique double effet dont la force et le déplacement doivent être compatibles avec la charge finale de l'essai et l'enfoncement maximal prévisible de la colonne. Il est intercalé entre le système de réaction (grue) et une plaque de répartition circulaire d'un diamètre proche de celui de la colonne ballastée (environ 80 cm) et d'épaisseur 10 cm.

Les tassements sont mesurés en 4 points de la plaque à l'aide de comparateurs (indicateurs de précision au 100^{ème} de millimètre) dont la course est compatible avec les tassements à mesurer, disposés entre la plaque et des poutrelles métalliques indépendants servant de référence « zéro » qui reposent sur le sol par l'intermédiaire de cales à bonne distance de la colonne chargée.

Chaque palier de chargement est contrôlé au moyen d'un manomètre à pression d'huile. Grâce à une pompe hydraulique reliée directement au manomètre, on assure une charge constante pour chaque palier.

5.2-Essais pénétrométriques :

Les essais réalisés aux droits des colonnes ballastées (pénétromètre statique et dynamique) ont donné refus à des faibles profondeurs.

Pour s'assurer de la fiabilité du traitement, qui est la vibro-flottation avec substitution par du ballast (colonnes ballastées), vis-à-vis du phénomène de liquéfaction du sol, des essais SPT ont été réalisés entre colonnes jusqu'à 25m de profondeur.



Pénétromètre statique



Pénétromètre dynamique



Standard Pénétration Test

Les résultats obtenus ont montré que le cisaillement induit par le séisme, et majoré de 1.3, reste toujours inférieur à la résistance du sol après traitement ; et ce, pour toutes les profondeurs traitées.

Pour tenir compte de la présence des culées, Priebe propose de prendre :

$$\left(\frac{z}{\sigma'_v} \right)_c = \frac{1}{n_0} \left(\frac{2}{3} \frac{a_{\max}}{g} \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} r_d \right) \text{ avec } n_0 = 1 + a \left(\frac{1}{K_{ac}(1+a)} - 1 \right)$$

Avec,

$a_{\max}$: accélération au niveau du site (0.18g au niveau de Nekor et 0.2g au niveau de Ghiss) ;

σ_v : contrainte totale après mise en place de l'ouvrage ;

σ'_v : contrainte effective après mise en place de l'ouvrage.

a : coefficient d'incorporation $0.12 \left(\frac{AC}{A} \right)$

K : coefficient de poussée 0.22 ($\varphi=40^\circ$)

CONCLUSION :

La solution qui consiste à renforcer le sol par des colonnes ballastées a permis de :

- ❖ Supprimer le risque de liquéfaction de sol ;
- ❖ Garantir une contrainte admissible ELS de 0,3 Mpa sous les massifs de gros béton ;
- ❖ Garantir des tassements admissibles ;
- ❖ Economiser un montant d'environ 1.240.000,00 Dhs ;
- ❖ Réduire le délai d'exécution des deux Ouvrages d'Art de 5 mois;