

ADOPTION DE LA TECHNIQUE DE CONSOLIDATION PAR COLONNES BALLASTÉES DE L'ASSISE SOUS JACENTE AUX FONDATIONS D'OUVRAGES D'ART

Par : Omar FIKRAT / ADM

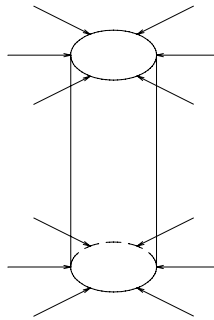
Anas BELKEZIZ / Entreprise HOUAR.

Nabil BENZAOUZ / IDAFA

I - PRESENTATION DE LA TECHNIQUE :

Les colonnes ballastées sont constituées par des fûts (diamètre de 0,60 à 1,20 m) de matériau d'apport mis en place et compacté dans le sol à l'aide d'un vibreur radial placé à la pointe d'un tube qui lui sert de support. Elles permettent d'obtenir une amélioration en place des caractéristiques globales du sol d'assise. Les colonnes ballastées reportent les charges à travers une couche de sol de qualité médiocre, sur une couche sous-jacente plus résistante.

Elles ne fonctionnent que grâce à la réaction d'étreinte latérale qui peut être fournie par la couche de qualité médiocre traversée et le mécanisme de transfert peut être assimilé à celui d'un échantillon pulvérulent placé dans l'appareil triaxial.



Les colonnes ballastées fonctionnent également comme des drains, par accélération du processus naturel de consolidation.

Le choix du fuseau granulométrique résulte de la fonction essentielle que l'on veut conférer à la colonne ballastée. Le rôle porteur étant accru par un fort pourcentage en cailloux.

Le matériau d'apport peut être un roulé ou un concassé en fonction des disponibilités locales.

Le choix des dimensions des colonnes et de la maille sont directement liés aux caractéristiques du sol, au type de technique utilisé et aux objectifs de consolidation et de drainage visés initialement par le projeteur. Généralement plus le sol est faible, plus le diamètre de la colonne ballastée est grand. Quant à la maille, elle est essentiellement ajustée et optimisée en fonction du niveau de traitement nécessaire pour pallier à la faiblesse du sol et minimiser le délai de consolidation qui conditionne le délai d'achèvement du projet.

II - PRESENTATION DES DEUX PROJETS ET CONCEPTION INITIALE :

1 - Pont sur oued NEKKOR de la rocade méditerranéenne section Ajdir Ras Afraou.

L'ouvrage sur Oued Nekkour au PK 7+340 de la rocade méditerranéenne section Ajdir Ras Afraou est un ouvrage type VIPP Comportant 6 travées de longueur 40 m ,un tablier constitué de 4 poutres (préfabriquées précontraintes, posées à la grue) sous hourdi coulé sur pré-dalles.

1.1 - Données géotechniques :

Le terrain de couverture en alluvions et sables silteux d'épaisseur variable surmontant couches de marnes beiges jaunâtres plutôt molles allant jusqu' à 35 m puis substratum en alluvions à matrice sableuse ou marneuse dotée de caractéristiques améliorées.

1.2 - Historique de l'étude d'exécution :

Les premières études d'exécution n'ont pas tenu compte de l'alea sismique, et avaient prévu des fondations profondes sur pieux au-delà de la marne molle jaunâtre.

Suite aux évènements de la ville d'Al Hoceima de 2004, les études d'exécution sont reprises pour tenir compte de l'aléa sismique. Les risques de liquéfaction de sol sont considérés et une étude est confiée au LPEE qui identifie des sols susceptibles de se liquéfier.

Le risque de liquéfaction est confirmé par des SPT montrant que la résistance au cisaillement du terrain est inférieure à la contrainte de cisaillement induite par le séisme pris en compte dans la région.

Les fondations profondes sur pieux n'étant plus concevables vu la profondeur importante des sols liquéfiables et les efforts importants induits par la liquéfaction. Le Maître d'oeuvre opte alors pour un renforcement du terrain au moyen de colonnes ballastées. Les fondations de l'ouvrage deviennent ainsi superficielles sur des semelles directement posées sur l'assise consolidée par les colonnes ballastées.

2 - Passage supérieur PS 0, point d'amorce de l'autoroute Tétouan Fnideq ;

Dans le cadre de réalisation de l'échangeur de l'autoroute Tétouan - Fnideq, en demi trèfle, en particulier les remblais d'accès des deux culées C1 et C2 du PS0, une analyse des conditions géotechniques des remblais d'accès et une évaluation des tassements et de la consolidation des sols de fondation des remblais ont été menées

Il est à noter que l'étude a été effectuée dans un premier temps pour des remblais traités par des drains verticaux mais cette technique s'est avérée inadéquate car elle n'apporte aucune amélioration à la stabilité des remblais. C'est la technique des colonnes ballastées avec son double effet d'accélérateur de consommation des tassements et de stabilisateur des remblais qui a été retenue.

Au vu des sondages réalisés sous les remblais d'accès, la stratigraphie des couches de sol de fondation se présente comme suit :

2.1 - Culée 1 :

- Une forte couche d'argile rouge graveleuse, atteignant 12 mètres et demi.
- Une couche d'éléments schisteux, considérée comme substratum.

A cet endroit le remblai atteint la hauteur de 6 mètres.

2.2 - Culée 2 :

- Une couche d'argile et marne argileuse, atteignant 5 mètres.
- Une couche de sable gravo - marneux de 7 mètres et demi.

- Une couche de sable marneux gris jaunâtre de 4 mètres et demi.
- Une couche de sable fin marneux jaunâtre de 8 mètres et demi.

Les caractéristiques mécaniques et de compressibilité de chacune de ces couches donnent des tassements variant entre 30 et 60 cm

Dans un souci d'éviter un développement excessif et redondant du présent article, dans ce qui suit, seules les données et résultats du cas de l'autoroute seront relatés. Les enseignements et les recommandations issus des deux cas étant à quelques particularités prêt très semblables.

III - EXPERIMENTATIONS ET ADAPTATIONS ENCOURS DE REALISATION :

1 - Reconnaissances complémentaires :

Des reconnaissances géotechniques complémentaires ont été menées pour mieux cerner les caractéristiques des sols et leur degré d'hétérogénéité.

2 - Réalisation des colonnes d'essai :

Des colonnes d'essai ont été exécutées pour tester d'abord le matériel proposé pour l'exécution des colonnes, observer le comportement des matériaux de comblement et analyser le déroulement des opérations de mise en œuvre. L'expérimentation a consisté essentiellement aux essais et mesures suivants :

- i. Analyse de la granulométrie et mesure de la propreté des ballasts.
- ii. Mesure de la consommation du ballast.
- iii. Vérification du diamètre de la colonne.
- iv. Vérification de la fiabilité des paramètres enregistrés par la machine relatifs aux caractéristiques de mise en œuvre : énergie, pression, ...
- v. Essais au pénétromètre dynamique.
- vi. Essais de chargement : Mesure des déplacements verticaux et horizontaux, pression sur colonnes, pression interstitielle,...

Par ailleurs une adaptation a été faite au niveau des dimensions granulaires du ballast. Prévu initialement comprises entre 20 et 40 mm, elles ont été modifiées à 20 / 80 mm. Cette modification a été largement justifiée par un essai comparatif réalisé sur chantier et consistant en l'exécution de deux fossés de 3m de profondeur comblés respectivement par des matériaux 20/40 et 20/80 mm. Puis des mesures au pénétromètre dynamique effectués sur les matériaux aussi bien desserrés que vibrés à l'aide du vibroflot ont pu montrer un gain d'au moins 50 à 60 % dans le fossé des 20/80 mm.

3 - Scénarios de mise en oeuvre :

Les scénarios proposés pour la mise en œuvre des colonnes ballastées ont été comme suit :

Scénario 1 :

Le phasage des travaux est le suivant :

- Mise en œuvre des colonnes ballastées en même temps que les fondations profondes.
- Construction du remblai
- Temps de consolidation de 1.5mois avant les travaux du corps de chaussée.

Si on procède de cette façon, le remblai engendrera une contrainte supplémentaire sur la fondation. Le tassement engendré devra être pris en compte dans les calculs des fondations profondes soit de 3.5cm et 20cm respectivement pour la culée 1 et la culée 2.

Les fondations profondes seront de type barrettes.

Scénario 2 :

Le phasage des travaux est le suivant :

- Mise en œuvre des colonnes ballastées
- Construction du remblai
- Temps de consolidation de 1.5 mois (pour que le tassement soit consommé)
- Déblaiement du remblai
- La construction des fondations profondes.

Si on procède de cette façon, les tassements étant déjà consommés le remblai n'engendrera pas de contraintes supplémentaires sur la fondation d'où la possibilité de remplacer des barrettes par les pieux.

Le scénario 2 a été retenu.

IV - SUIVI D'EXECUTION :

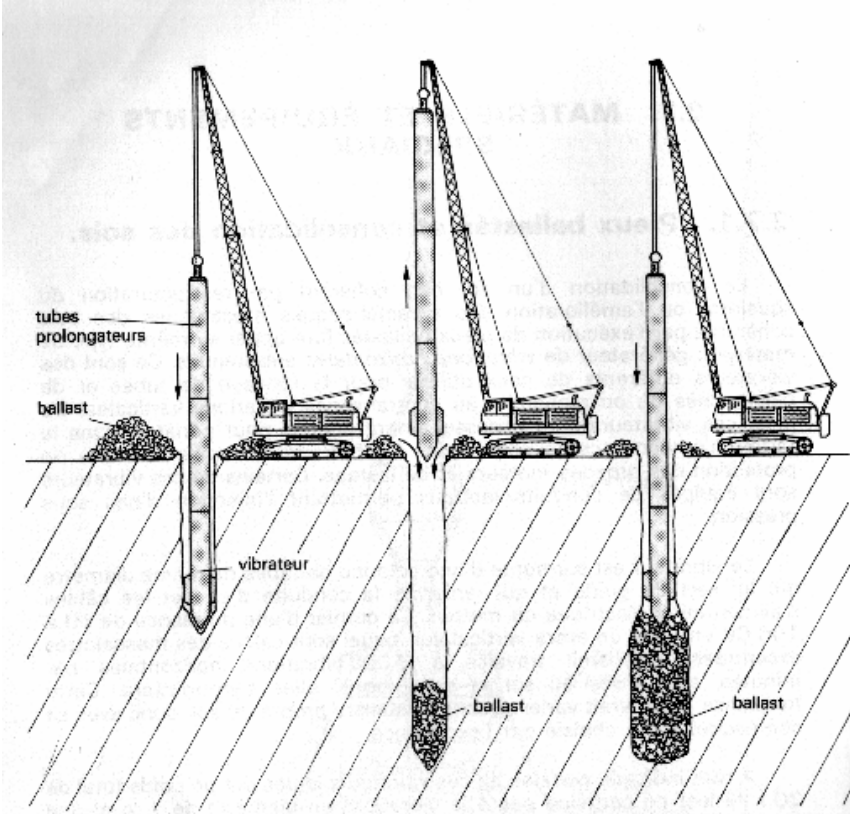
1 - Mise en oeuvre :

Le traitement consiste en un réseau de 1300 colonnes ballastées de 800 mm de diamètre réalisées au vibroflot à une profondeur de 12 m et selon un maillage triangulaire de 2 m de coté.

Le vibroflot est en fait une aiguille vibrante comportant un poids excentrique actionné, dans une enveloppe en acier tubulaire lourde. Le vibroflot étant suspendu par une grue sur chenilles. La longueur de base du vibroflot est de 8m pouvant être prolongée moyennant des tubes additionnels de 5m chacun. Le diamètre du vibroflot est de 310 mm. Il est actionné par un paquet d'énergie hydraulique diesel portatif de 130 kilowatts et produit ainsi des forces centrifuges élevées dans le plan horizontal à une fréquence de 50 cycles par seconde dans ce cas précis. Le nez du vibroflot est effilé pour faciliter la pénétration de la terre, tandis que les ailerons verticaux empêchent le vibroflot de tourner pendant la pénétration. Des jets d'eau à la pointe sont employés pour aider la pénétration du vibroflot à la profondeur exigée.

Le vibroflot, suspendu à la grue, est abaissé dans le sol et pénètre sous l'action combinée des jets d'eau à la pointe, de son propre poids et de ses vibrations. Après atteinte de la profondeur exigée, le débit des jets d'eau à la pointe est réduit jusqu'à ce qu'on observe un petit écoulement ascendant dans l'anneau autour du vibroflot. A ce moment une quantité de ballast 20/80 mm est versée dans la cavité créée et le vibroflot est légèrement soulevé et abaissé jusqu'à ce que la charge de ballast soit entièrement rendue compacte au bout du vibroflot. Cette action est répétée en retirant le vibroflot par étapes d'entre 0,3 et 0,5 m jusqu'à apparition de la colonne ainsi formée à la surface.

La durée d'exécution de chaque colonne ballastée varie entre 45 et 60 minutes.





2 - Plan de contrôle :

Contrôle ou à réaliser	Type		Type d'essai	Fréquence	Intervenants			Documents à émettre	Prescriptions à respecter
	P.C	P.A			I	E	M.O		
Indication d'origine des matériaux	X		Granulométrie LA ou MDE	Tous les 1000 m ³ de matériaux	Labo Interne	Labo Externe		Fiche de réception des matériaux	CCTP
Implantation		X	Levé topographique	Par section	Topo Interne	Topo Externe	Topo extérieur	Fiche de topo.	Plans BPE
Contrôle de la qualité des matériaux	X			Par colonne	Resp. Interne	Resp. Externe		Fiche de contrôle	CCTP
Contrôle des caractéristiques mécaniques	X		Sondages	Toutes les 30 colonnes	Resp. Interne	Resp. Externe	Resp. extérieur	Fiche de labo.	Prescriptions DTU 13.2 et CCTP
Contrôle intensité de compactage	X			Par colonne	Resp. Interne	Resp. Externe		Fiche de suivi journalier et rapport d'essai	Avis M.O
Contrôle profondeur		X	Relevé du système d'acquisition des données	Par colonne	Resp. Interne	Resp. externe	Resp. Extérieur	Listing	Avis M.O
Critères de réception		X	Essais de contrôle	Par colonne	Resp. Interne	Resp. Externe	Resp. Extérieur	Fiche de suivi journalier	CCTP

2 - Validation et réception des travaux exécutés :

Résultats des essais

Les résultats sont récapitulés dans le tableau ci après :

Paramètres	Valeurs
- Volume total incorporé/ volume théorique	$\geq 1,64 > 1,5$
- Energie max	de 117 à 126 KW
- Energie min	de 02 à 58 KW
- Pression max	de 291 à 314 Bars
- Pression min	de 5 à 145 Bars
- Ampérage max	de 213 à 229 A
- Ampérage min	de 4 à 106 A

Plus de 50% des résistances R_d obtenues à l'issue des essais au pénétromètre dynamique sont inférieurs à 15 MPA. Mais suite à une expertise géotechnique commandée par le Maître d'œuvre, il a été considéré que l'objectif essentiel de ces colonnes ballastées était de réduire le temps de consolidation, par conséquent seuls les essais relatifs à la consommation du ballast et le diamètre restent déterminants pour la validation des travaux.

Pour le test de consommation du ballast globalement le rapport entre le volume incorporé est celui théorique est supérieur à $1,64 > 1,5$ valeur exigée. Des contrôles de la consommation du ballast on été effectués au niveau de chaque 2m de la colonne ballastée. Les résultats sont largement supérieurs à 1,5 (entre 3,6 et 1,8) pour les 8 m à partir de la pointe de la colonne. Ils n'ont été que de 0,90, pour les 4 m en surface, tranche de sol où le terrain est relativement dur avec un niveau de nappe situé à la coté – 4m du terrain naturel.

V - ENSEIGNEMENTS ET RECOMMANDATIONS :

Dans les deux cas d'ouvrages précités, les avantages en délai et en coût de réalisation de l'adoption de la technique des colonnes ballastées sont indéniables.

Néanmoins cette technique très utile et de plus en plus fréquente notamment pour la région du nord exige un certain nombre de préalables et de conditions pour pouvoir aboutir à des résultats satisfaisants pour le projet et les différents intervenants participant dans son édification.

D'abord tout recours à cette technique doit être précédée notamment d'une longue réflexion sur l'opportunité, la faisabilité et l'efficacité de cette technique vis-à-vis du projet en question. Puis une fois tout ceci justifié, une confirmation et un ajustement des paramètres de mise en œuvre sont à prévoir en période de préparation et d'expérimentation sur chantier. Ensuite, un suivi rigoureux en période d'exécution est indispensable pour en vérifier la régularité et rester vigilant quant aux hétérogénéités éventuelles à rencontrer. Et enfin une veille sur la formalisation des paramètres et des enregistrements des résultats pour disposer des données de mise en œuvre et enrichir non seulement le dossier de l'ouvrage concerné mais également et surtout la base de données nationale en la matière et capitaliser ainsi l'expérience acquise.

En conclusion, nous pouvons affirmer que cette technique se fera sans doute d'autres références dans l'avenir. Ainsi d'autres témoignages verront le jour dans de futurs congrès et manifestations car le sujet est loin d'être épuisé et la réflexion continue :

Qu'en est il du comportement de la structure à colonnes vis-à-vis d'un éventuel effet important d'affouillement en milieu fluvial ?

Quelles mesures optimisantes devra on adopter pour permettre une utilisation plus large de cette technique ?

Comment faire acquérir le réflexe du recours à cette technique en tant qu'option envisageable ?