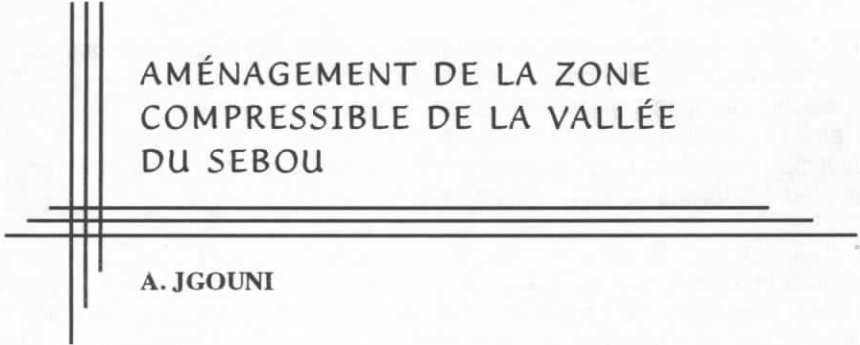


AMÉNAGEMENT DE LA ZONE
COMPRESSIBLE DE LA VALLÉE
DU SEBOU



A. JGOUNI

RESUME

A la suite d'une urbanisation croissante, on est amené à bâtir sur des sites de plus en plus difficiles, qui nécessitent la maîtrise de techniques de construction passant par l'amélioration des sols et nécessitant une optimisation entre le coût de l'investissement et celui de la maintenance.

Le choix du tracé de l'Autoroute Rabat-Tanger a imposé la construction du remblai d'accès en rive droite du pont sur l'oued Sebou, sur un terrain compressible susceptible de générer des tassements dépassant un mètre d'ampleur, préjudiciables à la tenue de la chaussée et aux fondations des culées du pont.

Les diverses investigations ont conduit à précharger la zone compressible par un remblai de 9 mètres de hauteur et à suivre son comportement par des mesures de tassement et de déformation latérale.

Le tracé d'Autoroute Rabat-Tanger franchit la vallée du Sébou en remblai de 2 à 5 mètres de hauteur sur une longueur de 7,6 kilomètres. Il traverse une zone de terrain compressible qui régit de part et d'autre du pont sur le Sébou. Le chargement de ces terrains par le remblai devait générer des tassements importants qui étaient susceptibles d'engendrer des désordres dans la chaussée de l'autoroute, d'une part et dans les fondations du pont, d'autre part.

Pour maîtriser ces tassements, la zone compressible a fait l'objet d'une étude géotechnique spécifique, à l'issue de laquelle a été adoptée une stratégie de réalisation progressive du remblai assurant un compromis raisonnable entre les coûts de construction et d'entretien, d'une part et les contraintes d'exécution du chantier, d'autre part.

I - CARACTERISATION DE LA ZONE COMPRESSIBLE

Pour caractériser la zone compressible, une reconnaissance géotechnique poussée a été réalisée. Elle a consisté en la réalisation de 11 sondages répartis sur un linéaire de 1300 mètres:

- en rive gauche de l'oued Sebou : 2 forages à 10 mètres de profondeur couvrant une longueur de tracé de 400 m.

- en rive droite de l'oued Sebou : 7 forages à 10 mètres de profondeur, 1 forage à 60 mètres de profondeur et un forage à 34,5 mètres de profondeur.

Cette campagne de reconnaissance a été complétée en rive droite du point de franchissement de l'Oued Sebou par deux sondages, l'un destiné à l'essai pressiométrique et le l'autre à l'essai pénétrométrique, pour évaluer la portance du sol de fondation.

La campagne de sondage a permis de distinguer trois tronçons suivant l'importance de la couche compressible, en l'occurrence la vase.

Le tronçon n° 1, situé sur la rive gauche, est constitué en profondeur par des couches:

- d'argile, d'une puissance de 3,00 mètres,
- de marnes, d'une puissance de 1,20 mètre,
- de sable ou marne sableuse, à partir d'une profondeur de 5 à 9,00 mètres.

Ce tronçon à dominance marneuse ne présente pas de risque de tassement.

Le tronçon n° 2, situé juste sur la rive droite (du PK 5+130 au PK 5+410), d'une longueur de 300 mètres linéaires, est constitué en profondeur:

- d'une couverture de limon, marne ou d'argile, plus ou moins sableux d'une épaisseur de 3,5 à 4,70 mètres;
- de vase grise d'une épaisseur variant entre 2,8 et 5,4 mètres;
- de sable légèrement vaseux à partir d'une profondeur de 6 à 11 mètres jusqu'à environ 12 à 14 mètres;
- de vase grise d'une puissance d'environ 24 mètres à partir d'une profondeur de 12 à 14 mètres, jusqu'à une profondeur de 33 à 34 mètres;
- en dessous, le sol est formé d'une alternance de sable fin, moyen et grossier de couleur grise, ocre.

Le tronçon n° 3, situé au delà du PK 5+410, est constitué:

- de marne jusqu'à une profondeur de 4,70 mètres environ;
- de vase sur une épaisseur de 1,2 mètre, localisée à partir d'une profondeur de 6,60 mètres au niveau du PK 6+120.

Les résultats du programme des essais de laboratoire pratiqué sur neuf échantillons prélevés dans la vase et le sable vaseux sont résumés dans le tableau ci-après :

NATURE	IDENTIFICATION LPC	ESSAI DE COMPRESSIBILITE	ESSAI TRIAXIAL	ESSAI MINI-PENETROMETRE	CARACTERISTIQUES ADOPTÉES
vase	Ap/At	$0,114 < I_c < 0,29$ $0,016 < I_g < 0,058$ $0,34 \cdot 10^{-3} < C_v < 4,17 \cdot 10^{-3}$ (1 bar) $0,172 \cdot 10^{-3} < C_v < 2,1 \cdot 10^{-3}$ (2 bars)	$C_u = 0,33$ $F_u = 0$	$0,15 < C_u < 0,3$	$I_c = 0,29$ $C_v = 2 \cdot 10^{-3}$ $e_0 = 0,54$
sable vaseux	Sa/SI	$0,130 < I_c < 0,212$ $0,008 < I_g < 0,018$ $10^{-3} < C_v < 3,39 \cdot 10^{-3}$	$C_u = 0,15$	$0,1 < C_u < 0,6$	formation ayant une consolidation instantanée ne présentant pas de risque de compressibilité

I_c : indice de compressibilité - **I_g** : indice de gonflement - **C_v** : coefficient de consolidation en cm²/s - **F_u** : angle de frottement interne consolidé non drainé en degré - **e₀** : module oedométrique

Les caractéristiques retenues pour la vase (Ap/At) sont les suivantes:

- indice de compressibilité (I_c) = 0,29
- coefficient de consolidation (C_v): $2 \cdot 10^{-3}$ cm²/s

- module oedométrique (e_0) = 0,54

Les calculs de stabilité menés dans l'hypothèse où la couche supérieure du sous-sol joue le rôle d'une banquette, ont fait apparaître un coefficient de sécurité, obtenu à partir des abaques de Pilot-Moreau, de 1,5 montrant que le remblai d'accès au niveau de la rive droite de l'Oued Sebou, de 5 mètres de hauteur, est stable au glissement.

La détermination des tassements prévisibles a été effectuée pour les tronçons n° 2 et 3:

- **pour le tronçon n° 2** : après avoir subdivisé la couche de vase inférieure en trois sous-couches, les calculs de tassement ont permis de conclure que le tassement global est de 1 mètre et que 90 % de cette valeur est atteinte entre 8 et 9 ans).

- **pour le tronçon n° 3** : les calculs menés sur la couche marneuse ont montré que les tassements sont négligeables et ne dépassent guère les 10 cm. Par conséquent ce tronçon ne présente pas de risque de compressibilité notable, étant donné que ce tassement de 10 cm sera absorbé au cours des travaux.

Les valeurs du temps de consolidation de 8 à 9 ans obtenues sur le tronçon n° 2 ne sont pas acceptables en raison des dépenses d'entretien lourd que nécessiteraient le rechargement périodique des remblais et la reprise de la chaussée. D'où la nécessité de rechercher les solutions de traitement adaptées pour accélérer le tassement.

II - LE CHOIX DE LA SOLUTION DE TRAITEMENT

Le choix de la solution de traitement doit tenir compte des contraintes de la programmation des travaux et de sa faisabilité avec les moyens disponibles sur le chantier. L'achèvement des travaux est prévu pour fin avril 1996 et ceux de l'ouvrage sur le Sebou pour le mois de décembre 1995. Le traitement doit permettre d'obtenir la consolidation des sols au droit de la culée de la rive droite avant que sa construction ne soit entreprise, c'est à dire au plus tard en novembre 1994.

D'autre part, le traitement ne doit pas conduire à l'utilisation de méthodes théoriquement acceptables mais pratiquement inadaptées au site et à l'environnement local.

Le choix est à orienter vers l'utilisation de matériel courant de terrassement disponible sur le chantier.

Pour des raisons économiques, la solution doit converger vers l'utilisation de matériaux locaux tout en évitant le recours à des entreprises hautement qualifiées et en écartant des procédés de traitement sophistiqués.

Plusieurs solutions de traitement ont été débattues, on cite les principales :

a) L'allègement du remblai

Les problèmes de tassement et de stabilité sont évités ou réduits si on allège le remblai par l'utilisation de matériaux légers, tels que les matériaux d'origine volcanique (pouzzolane) ou les matériaux industriels comme le polystyrène expansé.

Les matériaux d'origine volcanique auraient pu présenter un quelconque intérêt s'ils avaient pu être produits localement.

L'avantage du polystyrène expansé, dont la première application a vu le jour en 1972 en Norvège, réside dans son faible poids volumique (0,2 à 0,3 KN/m³) et à sa rapidité d'exécution.

Cette dernière technique a été écartée à cause de son coût élevé et de la méconnaissance de son comportement à long terme ainsi que de sa vulnérabilité aux produits hydrocarburés, au feu et aux attaques animales, notamment les rats qui peuvent y loger.

b) Le préchargement

Il s'agit d'améliorer les caractéristiques mécaniques du sol en augmentant son degré de consolidation. Cette amélioration est obtenue en:

- augmentant la contrainte totale du sol;

- facilitant la dissipation des pressions interstitielles.

Plusieurs solutions sont envisageables, les plus usuelles sont les suivantes :

b1 - Le préchargement avec diminution de la pression interstitielle

Il s'agit de raccourcir le chemin de drainage de la couche à consolider par la réalisation de drains verticaux ou tranchées drainantes remplis de sable dont l'efficacité dépend de leur nombre et de la granulométrie du sable. L'exhaure est assurée par une couche drainante de 0,5 à 1 mètre d'épaisseur au niveau du contact du remblai avec le terrain naturel.

Dans notre cas, les résultats à escompter de cette solution ne sont garantis que si l'on draine la couche inférieure de vase par des drains allant jusqu'à 20 mètres de profondeur. En pratique, le coût de cette solution reste dissuasif.

b2 - La préconsolidation

Il s'agit de réaliser le remblai avec une surcharge qui sera enlevée dès que les tassements obtenus sont jugés satisfaisants. D'une réalisation facile, la surcharge peut être exécutée avec des matériaux quelconques qui sont susceptibles d'être réutilisés ou mis en dépôt à la fin de la préconsolidation, d'où l'intérêt économique de cette. Elle n'est cependant applicable que si elle ne provoque pas de rupture du sol, ce qui a été vérifié.

III - LA METHODE DE TRAITEMENT ADOPTEE

L'analyse comparative des divers scénarios de préchargement (fig. n° 6) avec diminution des pressions interstitielles par le biais des drains de diamètre 25 cm, espacés de 2,5 mètres et de 20 mètres de profondeur a permis de tirer les conclusions suivantes:

- pour un préchargement de 7 mètres (5 m de remblai + 2 m de surcharge) et un drainage on obtient 85 % de consolidation du remblai de 5 mètres, en 2 ans. Au delà de 2 ans, on constate que l'effet de préchargement continue alors que celui du drainage diminue.

- il y a équivalence entre le traitement avec une précharge de 7 mètres accompagnée d'un drainage et une précharge de 9 mètres (5 m de remblai + 4 m de surcharge) sur 2 ans .

A la lumière de ces conclusions c'est la dernière méthode de traitement par "préconsolidation" qui a été retenue après examen de deux solutions de surcharge de 2 et 4 mètres.

Dans le cas de la surcharge de 2 mètres, on obtient 80 % de la consolidation d'un remblai de 5 m de hauteur en une année et demie et 90% de cette consolidation en 2 années et demi.

Pour une surcharge de 4 mètres, on obtient 80 % de consolidation en une année, 90 % en 17 mois et 100 % en 2 ans.

Les études de stabilité sommaire ont montré que le remblai est stable pour une surcharge de 2 mètres avec un coefficient de sécurité de 1,3 et qu'il est instable pour une surcharge de 4 mètres avec un coefficient de 1.

Afin de lever le doute, il a été procédé à des investigations complémentaires plus approfondies au niveau de la stabilité du remblai et de la détection de l'existence éventuelle d'autres couches vaseuses.

Ces investigations ont permis d'aboutir aux conclusions suivantes:

- **pour la stabilité du remblai** : Les essais scissométriques exécutés sur la zone compressible de 300 mètres ont montré que la cohésion non drainée (cu) est supérieure à 0, 3 bar. Ils ont connu un refus aux environs de 10 mètres de profondeur. Sur la base de ces données, les calculs ont fait apparaître que les coefficients de sécurité au glissement les plus faibles sont aux alentours de 1,7 et que la hauteur de remblai supportable par les couches de sous-sol pour éviter l'instabilité au poinçonnement est de 12 mètres, pour un coefficient de sécurité 1,5.

- **pour l'étendue des couches vaseuses** : Six sondages pénétrométriques de confirmation repartis à raison d'un sondage sur le tronçon n°2 (zone compressible) et de 5 sondages au delà de la zone compressible de 300 mètres, ont confirmé les résultats de la reconnaissance géotechnique initiale.

C'est la solution de surcharge de 4,00 mètres qui a été retenue étant donné son court délai de consolidation qui répond au mieux au programme des travaux. Le risque de désordre du remblai reste minime vu que les hypothèses de calcul sont

défavorables ($c_u = 0,3$ bars) et que la cohésion non drainée du sol dont dépend la stabilité, a tendance à s'améliorer au fur et mesure de l'avancement des travaux.

IV - LA CONSTRUCTION DU REMBLAI

Lors de la construction des piles et culées de l'ouvrage de franchissement de l'oued Sebou sur la rive gauche, on a été amené à réaliser un épi qui a provoqué le déplacement des courants hydrauliques vers la rive droite. Il en est résulté un approfondissement de l'Oued par érosion du fond au niveau de cette rive et un raidissement du talus de la berge susceptible de mettre en danger par glissement, la stabilité longitudinale du remblai à construire.

Pour y pallier, il a été nécessaire de commencer les travaux par la réalisation d'un épi de 15 mètres destiné à la construction de la future infrastructure de la culée de la rive droite du pont de l'Oued Sebou qui assura en même temps la butée de la berge et du remblai

Le sol en place de nature tireuse a fait l'objet d'un décapage de 30 cm. Les matériaux ont été déposés en cordon de part et d'autre de la plateforme afin de compenser par leur poids les fluages transversaux éventuels pouvant apparaître sous l'effet du tassement. Les zones décapées ont été remblayées dans les plus brefs délais afin d'éviter "l'effet de baignoire" en période de pluvieuse.

Le remblai constitué de sable grésifié approvisionné à partir de la carrière Oulad Zilar située à environ 11 kilomètres, a été monté par couches successives compactées conformément aux exigences jusqu'à une arase surélevée d'un mètre par rapport à la côte finale pour compenser le tassement d'un mètre escompté.

La surcharge a été réalisée avec les mêmes matériaux constituant le remblai, leur mise en oeuvre s'effectuant sans compactage.

Des banquettes stabilisatrices de 4,00 mètres et de pente 2/1 ont été réalisées par précaution de part et d'autre du remblai afin d'éviter des refoulements latéraux.

La durée de réalisation de la précharge a été de 114 jours en raison des interruptions répétées dues aux pluies et à l'urgence du remblaiement de zones décapées très sensibles à l'eau.

La montée du remblai a été suivie par des relevés topographiques qui ont concerné la couche d'arase, la couche d'arase surélevée d'un mètre et la côte du remblai surchargé.

Ces relevés topographiques ont pris en compte des tassements enregistrés au cours de l'exécution du remblai.

V - LE SUIVI DE L'EVOLUTION DE LA CONSOLIDATION

Comme les calculs des tassements restent théoriques, il a été procédé à un suivi du comportement du sol par une instrumentation adéquate permettant de se prononcer sur l'état de sa consolidation .

A cet effet, un dispositif de mesure de l'évolution des déplacements verticaux du remblai a été mis en place sur le sol à l'emplacement du futur remblai.

Bien que cette instrumentation est coûteuse, elle présente l'avantage d'obtenir des résultats fiables ne gênant pas l'avancement des travaux.

Le suivi des tassements au niveau de la vallée du Sebou a été réalisé à l'aide de 8 cellules sphériques reliées à 3 points fixes représentant trois profils distants d'environ 118 mètres.

L'évolution des tassements a été suivie par des mesures régulières exécutées par un technicien du laboratoire (LPEE) qui en même temps appréciait visuellement, en collaboration avec l'équipe du Maître d'Ouvrage, l'état du sol aux alentours de la précharge pour déceler d'éventuelles fissurations ou déformations.

Durant les mesures, il a été impératif de cesser toutes activités sur la précharge afin de permettre au niveau d'eau dans l'éprouvette du lecteur de se stabiliser et d'effectuer une bonne lecture de la valeur du tassement.

La fréquence de mesure durant l'exécution de la précharge était d'une mesure tous les 2 jours.

A la date de rédaction de ce rapport (fin mai 94), les tassements cumulés enregistrés sont les suivants:

. **au profil n° 1**

- cellule n° 1 : 84,30 cm (*)
- cellule n° 2 : 86,10 cm (*)
- cellule n° 3 : 84,70 cm (*)

(*) valeurs du mois de décembre 1994

. **au profil n° 2**

- cellule n° 4 : 64,40 cm
- cellule n° 5 : 87,00 cm
- cellule n° 6 : 75,60 cm

. **au profil n° 3**

- cellule n° 7 : 52,60 cm
- cellule n° 8 : 64,10 cm

On a constaté que pendant la montée du remblai les tassements ont été de 1 à 3 cm par 2 jours. Ils ont atteint des valeurs de 13 cm au 2^{ème} jour après l'achèvement de la précharge. On a aussi remarqué que le trafic des engins sur la piste d'accès avait un impact direct sur les tassements.

L'analyse des courbes présentées en annexe fait apparaître la stabilité des mesures enregistrées à partir du mois de juin 1994, ce qui a amené le Maître d'Ouvrage à autoriser l'entreprise:

- à exécuter les fondations de la culée du pont en contact avec la zone compressible du remblai d'accès à partir du mois d'août 1994;
- à enlever la précharge pour sa réutilisation en remblai à partir du mois d'octobre 1994.

Par la suite, la fréquence des mesures de tassement a été réduite pour devenir mensuelle.

VI - CONCLUSION

La zone compressible sur laquelle est construit le remblai d'accès de l'ouvrage de franchissement de l'oued Sebou est le premier site marocain soumis à un pareil suivi. Ce suivi traduit le souci de Maître d'Ouvrage de déceler les désordres éventuels, en temps opportun, pour pouvoir traiter et apprécier l'impact des mouvements du remblai sur les aménagements avoisinants et sur la chaussée.

Si le suivi du comportement du remblai et du sous sol est très minutieux au cours des travaux, il ne faut pas perdre de vue que le suivi à long terme (après achèvement des travaux) est aussi intéressant pour mieux définir la stratégie des travaux de maintenance à réaliser dans le futur et enrichir l'expérience Marocaine en ce domaine.