

REMBLAIS SUR SOLS COMPRESSIBLES
DE LA ROCADE URBAINE RABAT-SALE

A. M'RHIZOU
Chef du Centre Technique
Régional de Fes
L P E E

M. MOUNIRI
Direction Régionale de l'Équipement
Nord - Ouest

RESUME

La construction des remblais sur sols mous ou compressibles pose des difficultés géotechniques majeures du point de vue stabilité et tassement. Les sols mous ou compressibles se caractérisent par une faible valeur de la cohésion non drainée à court terme et par une aptitude au tassement assez importante et assez lente dans le temps. Les risques encourus si certaines dispositions ne sont pas prises, sont la rupture pendant ou immédiatement après la construction et les déformations importantes dues au tassement qui peuvent se produire des années durant après l'achèvement de l'ouvrage.

Lors de l'étude géotechnique du tracé de la Rocade Urbaine de Rabat-Salé (étude réalisée par le L.P.E.E pour le compte de la D.R.E. du Nord-Ouest), trois types de remblais à réaliser sur les sols mous compressibles de l'estuaire de Bou-Regreg ont été étudiés. Il s'agit des remblais d'accès au nouveau pont qui est actuellement en cours de réalisation sur le Bou-Regreg, des remblais de l'échangeur et section courante sur la rive gauche de l'Oued

Les résultats de l'étude de stabilité et tassement de ces différents remblais ainsi que les données géotechniques nécessaires à ces études sont présentés dans la présente communication

I - INTRODUCTION - DONNEES GENERALES

A - Présentation

La réalisation du projet "Rocade Urbaine" constitue l'un des aménagements principaux du réseau proposé dans le plan de transport (1982-1992) de Rabat-Salé.

Le projet consiste à aménager des voies rapides existantes et à créer de nouvelles liaisons.

C'est dans ce cadre que la D.P.E. de Rabat a projeté la construction d'un tronçon autoroutier prolongeant au niveau de l'Avenue John KENNEDY (route des Zaers) la voie rapide existante et joignant, après avoir traversé la vallée du Bou Regreg, la RP 1.

L'étude géotechnique de ce tronçon a été confiée par la D.R.E. de Rabat au L.P.E.E. Cette étude a comporté deux parties: reconnaissance générale du tracé et étude de stabilité des talus et tassement.

Cet article présente les principales données et résultats de l'étude des remblais sur sols compressibles de la vallée du Bou-Regreg

B - Quelques caractéristiques du tracé

A partir de la route des Zaers, le tracé descend à l'aide de profils mixtes dans un vallon jusqu'à atteindre le plat de

remblai de hauteur variant de 1 à 2 m , il se développe en ligne droite presque parallèlement à l'oued sur la partie gauche de la vallée jusqu'à passer sous la voie ferrée. Entre cette dernière et la RPI, un échangeur est prévu. Les remblais d'accès au nouveau pont sur le Bou-Regreg (actuellement en cours de construction) présentent des hauteurs pouvant atteindre 7 à 8. Sur la rive droite , il est également prévu un échangeur à niveau et par conséquent en remblais : dont les hauteurs sont comprises entre 2 et 3 m

Ainsi trois types de remblais ont été étudiés :

- remblai courant rive gauche(début vallée-voie ferrée)
- remblais échangeur rive gauche
- remblais accès au pont et échangeur rive droite

La largeur de la plateforme de chaussée est de 35,50 en section courante et de 32,5 aux abords des ouvrages d'art et au niveau des échangeurs et carrefours.

C - Aperçu géologique

Le tracé emprunte deux zones lithologiquement distinctes :

- La lère est un vallon creusé dans les marnes, les graves et limons du quaternaire les surmontant. La nappe phréatique se situe au contact des formations quaternaires avec les marnes.

- La 2ème, et c'est celle qui sera intéressée par les remblais objet du présent article, correspond aux berges gauche et droite du Bou-Regreg avec des formations vaseuses en surface (5 à 6m environ), puis des formations à prédominance sableuses en profondeur avec passages vaseux.

La couche des graves argileuses conglomératiques coiffant les marnes sur les rives de la vallée du Bou-Regreg pourrait servir d'emprunts pour matériaux de remblais. Des sites d'emprunts exploitables ont été repérés.

D - Phase de reconnaissance /niveau d'études spécifiques

L'étude géotechnique menée a été poussée jusqu'à la phase 1 de la reconnaissance générale et jusqu'au niveau 1 en ce qui concerne les études spécifiques (voir communication sur "études géotechniques routières").

Le problème qui sera étudié dans la deuxième partie du tracé projeté est par conséquent compte tenu de la géologie et de la reconnaissance préliminaire, la stabilité et tassement des remblais sur sols mous compressibles.

II- RECONNAISSANCE GEOTECHNIQUE-COUPES DES TERRAINS-SCHEMATISATION

A - Programme de reconnaissance in-situ

Compte tenu des données géométriques du tracé, de la géologie et des moyens disponibles, le programme de reconnaissance réalisé par zone homogène est le suivant :

-Zone linéaire plate de la fin du vallon à la voie ferrée
(1 Km)

. sondage carotté de 20 m de profondeur au milieu de la zone avec réalisation d'essais scissométriques in-situ tous les mètres à partir de la surface et prélèvement d'échantillons.

. essai de pénétration statique au voisinage du sondage (pour étalonnage)

. exécution de 2 essais de pénétration de part et d'autre du sondage (pour extrapolation de la coupe) et judicieusement implanté le long du tracé.

-Echangeur et remblai d'accès rive gauche

. 1 sondage carotté de profondeur 20m implanté au milieu de l'échangeur avec essais scissométriques tous les mètres et prélèvements d'échantillons.

. idem : 1 sondage au milieu du remblai d'accès

. exécution de 4 essais de pénétration statique dont 1 au voisinage du sondage de l'échangeur et 3 autres répartis judicieusement de façon à permettre l'extrapolation de la coupe géotechnique.

- Echangeur et remblai d'accès rive droite :

. 1 sondage carotté de 20 m de profondeur au milieu de l'échangeur avec exécution d'essais scissométrique in-situ tous les mètres et prélèvements d'échantillons

. 2 essais de pénétration de part et d'autre du sondage et implantés sur le tracé au droit des hauteurs importantes de remblais projeté.

La reconnaissance a également utilisé les résultats des sondages et essais in-situ réalisés dans le cadre de l'étude de fondation du pont qui permettra le franchissement du Bou-Regreg.

B - essais de laboratoire

Ils ont consisté en :

- identification systématique des sols rencontrés : analyse granulométrique, limites d'Atterberg, équivalent de sable (sols sableux) et teneur en matières organiques (sols organiques).

- mesures des densités et teneurs en eau

- essais triaxiaux (à court et à long terme)

- essais oedométriques avec mesure du coefficient de consolidation pour les sols compressibles.

C - Synthèse de la reconnaissance géotechnique :

Dans la partie en remblais de la Rocade Urbaine qui va du douar (fin du vallon) jusqu'au croisement avec la RPl après l'oued et qui se situe sur les berges du Bou-Regreg le terrain est constitué dans l'ensemble :

- d'une couche, en surface sauf dans la zone remblayée, d'argile silteuse peu plastique correspondant dans la plupart des cas aux dépôts récents des produits fins d'origine marneuse. Cette couche fait 1,2 à 1,3 mètres. De consistance molle, elle surmonte :

- * une couche d'argile vaseuse très molle, faiblement organique. Les teneurs en matières organiques déterminées sont de 3 et 6%. Cette dernière valeur caractérise la vase du sondage S7. L'épaisseur de cette couche varie suivant les zones, elle augmente à partir du Douar jusqu'à atteindre 2m dans le sondage S4. Dans la partie remblayée entre la RPl et la voie ferrée (côté Rabat), elle fait entre 4 et 5 mètres. Dans la zone d'accès au pont sur la berge gauche, le sondage S6 donne une épaisseur de 1,50m de vase et 1,50 m sablo-vaseux. Après l'oued et dans le sondage S7, la vase est rencontrée sur 2,5 mètres.

- * cette couche d'argile vaseuse repose sur des épaisseurs variables de sables vaseux et sables fins avec passages de sables grossiers coquillés en intercallation.

Le profil géotechnique de cette partie montre que la Rocade traverse en remblais des sols mous, compressibles.

Par conséquent, les risques encourus sont de deux types :

- Ruptures du remblais pendant ou immédiatement après la construction.
- Tassements excessifs dus en grande partie à la consolidation et au fluage latéral des sols sous jacents.

III - ETUDE DE STABILITE ET TASSEMENT DES REMBLAIS

A - Remblais rive droite

.Schématisation géotechnique :

L'exploitation et analyse des résultats de reconnaissance et essais d'identification d'une part , et essais mécaniques en laboratoire d'autre part, ont permis de schématiser le sol de formation en une couche homogène de 4 mètres de sols mous caractérisés par une cohésion non drainée C_u de 1,2 T/m². Cette couche molle reposant à partir de 5m de profondeur sur des sables fins supposés stables mais moyennement compressibles , a été subdivisée dans le calcul des tassements en 2 sous-couches à compressibilité homogène . Quant au matériau de remblai il a été schématisé par un matériau type purement frottant ayant une densité de 2 T/m³ et un angle de frottement interne φ_r de 30°.

Cependant, chaque fois que l'incidence des caractéristiques du matériau du remblai sur les résultats de l'étude risquait d'être importante, elle a été étudiée en faisant varier les caractéristiques principales du matériau de remblai dans les limites tolérées par les exigences sur la qualité de ces matériaux et compte tenu des ressources locales en zones d'emprunt.

. Stabilité:

Les principales conclusions de cette étude sont :

-sans aucune disposition constructive, la hauteur sécuritaire ($F = 1,5$) est de 2,1m dans le cas d'un matériau de remblai purement frottant, et de 2,4m s'il est légèrement cohérent ($C_r / C_u = 1$)

-L'adjonction de banquettes latérales permet d'augmenter cette hauteur sécuritaire à 3,00m dans le cas d'un $\varphi_r = 30^\circ$ et à 3,5m pour un $\varphi_r = 35^\circ$; soit une augmentation de 40 à 50%.

. Tassement:

L'amplitude des tassements est estimée à 60 cm pour un remblai de 3m, à 85 cm pour 5m et à 110 cm pour un remblai de 7 m de haut .

.Construction par étapes :

L'étude de stabilité a montré que si l'adjonction de banquettes latérales augmente sensiblement la hauteur maximale sécuritaire, celle-ci ne dépasse pas 3,5 m ,voir 4m dans les conditions les plus favorables. Par conséquent, la construction du remblai de hauteur supérieure, fondé sur le sol en place ne peut se faire que par étapes. Le nombre d'étapes dépend de la hauteur finale du remblai et des degrés de consolidation à atteindre entre les chargements successifs c'est à dire du temps d'attente. Deux cycles de chargements progressifs ont été étudiés : $\Delta h \geq 1,5m$ et $\Delta h \geq 1,0 m$, pour un remblai de 7 m de haut. Le premier cycle comprend 5 étapes et le second 7, dans le cas d'un remblai à section simple. L'adjonction de banquettes latérales permettrait de diminuer ce nombre d'une à deux étapes.

.Temps de consolidation-drainage :

Les temps de consolidation sans dispositions particulières de drainage sont excessivement élevés : d'une dizaine à une quinzaines d'années pour un remblai de 7m. La réalisation d'un réseau de drains cylindriques verticaux diminue de manière très notable les temps de consolidation.

Pour estimer les temps de consolidation dans ce cas, connaissance du coefficient de consolidation radial C_r (essai oedométrique spécial à drain central ou mesure de la perméabilité horizontale) est nécessaire.

Ces essais sont généralement effectués au deuxième stade de l'étude. Cependant et afin de permettre la comparaison entre les diverses solutions envisageables les temps de consolidation ont été estimés en prenant des valeurs du rapport C_r/C_v dans l'intervalle le plus fréquemment rencontré.

C'est ainsi que pour un réseau de drains à maille serrée ($n = 5$); les temps de consolidation sont respectivement de 5 mois; 9 mois; 1 an et 9 mois, pour des rapport C_r/C_v de 10; 5 et 2 - ceci dans le cas d'un chargement progressif avec un pas moyen de 1,0 m ces temps sont légèrement supérieurs (6 mois; 1 an; 2 ans et 4 mois) dans le cas d'étapes de hauteur supérieure à 1,5 m

.Autres techniques constructives :

La substitution des sols mous par le matériau du remblai a été examinée, plus particulièrement dans le cas d'une purge par excavation mécanique. La largeur nécessaire à l'estimation des volumes et à une première approche du coût, se détermine à partir des dimensions du remblai à l'aide de méthodes graphiques simples.

Les calculs de la hauteur maximale du talus vertical découvert assurant une stabilité calculée sans coefficient de sécurité compte tenu de la faible durée des travaux (remblaiement immédiat) montrent que le talutage à la verticale sur toute l'épaisseur de la couche compressible ne peut être réalisé, même pour une courte durée, sans soutènement.

Par ailleurs, l'étude de stabilité sommaire de l'interaction remblai-paroi de l'excavation aboutit à la détermination de la valeur du coefficient de stabilité : rapport butée /poussée .

Dans le cas d'un remblai de 7 m de haut constitué d'un matériau d'angle de frottement interne de 30° , ce coefficient est de 1; c'est à dire que le remblai est à la limite de rupture par manque de butée des parois de l'excavation. Afin d'éviter cette rupture, la stabilité pourrait être assurée à l'aide de mesures spéciales(banquettes latérales, rideaux de palplanchers etc...).

L'éventualité de ces mesures n'est pas à exclure . Deux autres techniques de purge des sols mous sont signalées : l'utilisation d'explosifs et le poinçonnement. Elles ont la caractéristique d'être des techniques pointues .

B - Remblai rive gauche d'accès au pont

. Schématisation géotechnique

Le sol de fondation des remblais de la zone d'accès au pont en rive gauche, est constitué de 5 à 6 m de sols mous reposant sur des sables reconnus jusqu'à 20 m.

Les sols mous rencontrés sont : L'argile silteuse brune de surface, l'argile vaseuse noirâtre et les sables vaseux de transition. Les caractéristiques mécaniques (mesurées au scissomètre de chantier et à l'aide d'essais en laboratoire) sont très faibles. Les cohésions non drainées respectives sont de 0,9; 0,7 et 1,4 T/m² ; soit en moyenne 1 T/m². L'argile vaseuse noirâtre est très compressible $C_c = 0,344$.

Le matériau du remblai est supposé avoir les mêmes caractéristiques que précédemment.

. Stabilité

La stabilité vis à vis de la rupture par poinçonnement du sol de fondation est assurée avec un coefficient de 1,5 pour les hauteurs de remblais suivantes exprimées en mètres :

- Remblai de la bretelle

Pente des talus	: 2/1	3/1
hauteur sécuritaire(m)	: 1,9	2,0

- Remblai de la voie principale

Pente des talus	: 2/1	3/1
Hauteur sécuritaire (m)	: 2,5	2,5

La vérification de la stabilité au glissement rotationnel (ce schéma de rupture est très approximatif dans le cas de la voie principale du fait de l'importance de la largeur du remblai par rapport à l'épaisseur de la couche molle) montre qu'un remblai de hauteur égale à 2m présenterait un coefficient de sécurité de l'ordre de 1,4. Le coefficient 1,5 est obtenu pour une hauteur de 1,8m et des talus de pente 2/1.

Cette hauteur sécuritaire reste en deçà des hauteurs projet du remblai d'accès.

Sa réalisation ne peut se faire en une seule phase sans risques de rupture, avant même d'atteindre les côtes finales. Par conséquent, l'adoption de méthodes de construction élaborées est nécessaire.

L'examen de l'adjonction de surcharges latérales stabilisatrices montre que la hauteur sécuritaire ($F = 1,5$) qui peut être construite en une seule phase est de 2,1m.

Les banquettes latérales correspondantes ont une hauteur de 0,80m et une largeur de 5,5m. Or, la hauteur maximale à réaliser est égale à la hauteur projet maximale (environ 7 m) augmentée de l'amplitude des tassements et de la hauteur surcharge temporaire équivalente au corps de chaussée (de l'ordre de 0,70 à 0,9 m).

. Tassement

Les amplitudes du tassement de consolidation sont estimées à partir des caractéristiques de compressibilité mesurées à l'oedomètre. Le calcul est fait pour différents cas de figure : remblai de la bretelle avec 1,6 et 3,0m de haut, remblai de la voie principale avec des hauteurs de 2; 4; 6 et 8 m. Le tassement global (immédiat + consolidation primaire + secondaire + fluage) est estimé en considérant que le tassement de consolidation primaire intervient pour 60 à 70%. Les valeurs obtenues sont récapitulées dans le tableau suivant :

! Remblai	! Bretelle	! Voie principale	!
!Hauteur (m)	!1,6 !3,0	!2,0! 4,0! 6,0! 8,0	!
!Tassement de	! 32 ! 44	! 37! 53 ! 64 ! 75	!
!consolida-	!	!	!
!tion (cm)	!	!	!
!Tassement	! 50 ! 70	! 60! 80 ! 100! 120	!
!global (cm)	!	!	!

Un calcul approximatif permet de montrer que pour avoir une hauteur projet de 7 m, il faudrait réaliser une hauteur de 9 m (dont 130 cm de tassement et 70 cm environ de surcharge temporaire équivalente au corps de chaussée).

L'étude de stabilité a montré qu'une telle hauteur ne peut être réalisée en une seule phase, même en disposant des banquettes latérales stabilisatrices.

. Construction par étapes :

L'examen de la construction par étapes basée sur le principe de l'amélioration de la résistance au cisaillement du sol (cohésion non drainée) par la consolidation sous chargements, aboutit en utilisant la méthode graphique à la définition d'un programme de chargement progressif permettant de réaliser les hauteurs projetées. En fixant le pas du chargement à au moins 1 m le nombre d'étapes nécessaires pour réaliser une hauteur projet de 7m est d'au moins 7.

Le programme correspondant est défini ci-après par la hauteur du chargement et le degré de consolidation à atteindre ou plus significativement le temps d'attente à observer avant de procéder au chargement suivant (ou à la mise en oeuvre du corps de chaussée).

Temps de consolidation-drainage

!Etapes ! (n°)	!Hauteur du ! chargement ! (m)	!Hauteur du ! remblai ! (m)	!degré de con- !solidation à !atteindre (%)	! temps ! d'attente! ! (mois)
! (1)	! 1,8	! 1,8	! 50	! 9
! (2)	! 1,1	! 2,9	! 60	! 8,5
! (3)	! 1,1	! 4	! 60	! 5
! (4)	! 1,0	! 5	! 65	! 6
! (5)	! 1,2	! 6,2	! 65	! 4,5
! (6)	! 1,1	! 7,3	! 70	! 7
! (7)	! 1,4	! 8,7	! 95	! 44
!	!	!	! Total :	! 7 ans !

Les temps d'attente nécessaires sont importants ; le temps global nécessaire de 7 ans est incompatible avec les délais de construction usuels. L'accélération de la consolidation par la réalisation d'un réseau de drainage interne (drain verticaux) dans le sol de fondation ou l'adoption d'une autre méthode de construction telle que la substitution, le traitement des sols, mous, est alors nécessaire.

Les drains verticaux les plus couramment utilisés sont les drains cylindriques de sable ou en carton. Les tranchées drainantes lorsque la hauteur du sol compressible n'excède pas 5,5m .les drains préfabriqués connaissent à l'heure actuelle un essor particulier du fait d'une efficacité plus élevée et d'un meilleur rendement de réalisation.

Le calcul des temps de consolidation avec drains cylindriques nécessite la connaissance du coefficient radial de consolidation C_r . Ce paramètre peut être mesuré à l'aide de l'essai oedométrique spécial, avec drain central. Cependant, en considérant des valeurs de C_r telles que le rapport au coefficient de consolidation vertical (C_v) reste dans l'intervalle des valeurs les plus fréquemment rencontrées, une estimation première de l'ordre de grandeur des temps de consolidation peut être faite afin de permettre de savoir en comparant avec les délais de construction disponibles si une telle solution peut être envisagée, et de juger de l'opportunité de faire une étude détaillée dans ce sens, basée sur des investigations et essais complémentaires. Cette estimation a été faite pour les remblais de la rive droite. Compte tenu du degré de précision recherché la similitude des cas peut être admise et les résultats obtenus applicables au cas présent. Les temps de consolidation obtenus pour une maille serrée sont compris entre 5 et 21 mois (un peu moins de 2 ans) pour des rapports C_r/C_v compris entre 2 et 10.

Quant au calcul des temps de consolidation avec tranchées drainantes, la méthode utilisée suppose l'isotropie du coefficient de consolidation. Par conséquent, les temps de consolidation sont estimés à partir du coefficient de consolidation vertical (C_v). Les temps de consolidation obtenus par l'adoption de ce système de drainage interne sont très intéressants, d'autant plus que l'espacement "L" entre tranchées comme le montre le tableau suivant est réduit :

Espacement en tranchées (m)	2,5	5	10
Temps de consolidation à 95% d'un remblai de 7m	4 mois	1 an et 1 mois	2 ans et 8 mois

Cependant, plus l'espacement est réduit, plus le coût est élevé: volumes d'excavation et du matériau de remplissage plus importants . Par ailleurs, l'ouverture des tranchées peut poser des difficultés de terrassement (stabilité de la paroi) que la réalisation des drains cylindriques ne pose pas et qui ne peuvent être résolus que moyennant surplus du coût

L'adoption de l'un ou l'autre système de drainage nécessite la réalisation en surface d'une couche drainante d'épaisseur supérieure à l'amplitude des tassements. L'utilisation des géotextiles contre la contamination des matériaux drainants a été recommandée.

.Autres techniques constructives

La substitution des sols mous par le matériau de remblai a été examinée en envisageant les techniques suivantes :

- déplacement des sols mous par poinçonnement : technique peu coûteuse mais aux résultats souvent imparfaits et incontrôlables.

- déplacement à l'aide d'explosifs : technique dont la réussite est étroitement conditionnée par la maîtrise technologique des procédés d'exécution et contrôle. L'évolution de la stabilité est incertaine.

- Excavation mécanique : technique aux résultats plus sûrs mais dont la réalisation n'est pas sans poser des difficultés dues au terrassement dans un milieu inhabituel. Ces difficultés peuvent être résolues par la définition des paramètres et procédés d'exécution dans le cadre d'une étude spécifique. Cependant et afin de permettre une estimation première du coût en vue de procéder à la comparaison économique des différentes méthodes de construction, les éléments suivants sont précisés :

- . Largeur de l'excavation peut être estimée à l'aide de méthodes graphiques simples à partir de certaines caractéristiques de largeur de la route .

- . La hauteur maximale du talus vertical découvert stable sans coefficient de sécurité compte tenu de la faible durée des travaux est de 1,5 m suivant la formule de Soklovskij et de 2 m en considérant la notion de hauteur critique; dans les 2 cas , elle reste très inférieure à l'épaisseur de la couche des sols mous.

- . Le coefficient de stabilité caractérisant l'interaction poussée-butée entre le remblai et les parois de l'excavation est inférieur à 1 pour des hauteurs du remblai supérieures à 7m . Ce qui se traduit par l'adoption de mesures spéciales (rideaux de palplanches etc...) pour assurer la stabilité .Pour des hauteurs inférieures à 7 m , la pente des parois de l'excavation est déterminée par le calcul de leur stabilité propre ; pour une première estimation , les méthodes graphiques signalées ci-dessus sont suffisantes.

La dernière catégorie des méthodes de construction envisageables examinée est le traitement du sol de fondation par des colonnes ballastées ou les pieux-drains mélange de chaux et de sable. La réalisation de ces techniques peut se révéler économique mais elle exige un savoir faire en la matière. Le dimensionnement des colonnes ballastées nécessite la connaissance du matériau du remplissage, le ballast, la pression de fluage du sol mesurée au pressiomètre et la consultation d'une entreprise spécialisée pouvant définir la section des colonnes qu'il serait possible de réaliser compte tenu de la nature des sols. Les résultats de ces techniques sont souvent jugés satisfaisants. Leur réalisation permet d'assurer un drainage interne du sol de fondation et d'améliorer sa résistance globale au cisaillement.

C - Echangeur rive gauche

La particularité de cette zone réside dans l'existence préalable d'un remblai étendu sur toute la superficie, se trouvant aux côtes projet ou légèrement supérieur, mais aux qualités médiocres tant du point de vue état que constitution..

Le sol de fondation sous-jacent présente à peu de choses près, la même constitution que celle des zones étudiées auparavant.

La coupe géotechnique du terrain peut être schématisée ainsi:

- 3,5 à 5,00 m d'un tout-venant de remblaiement

- 5,5 à 7,00 m de sols mous compressibles comprenant en superposition : argiles silto-vaseuses, puis vaseuses faiblement organiques sur des vases sableuses devenant progressivement des sablo-vaseux de transition .

- A partir de 10 à 12 m de profondeur, des sables à passages très vaseux sur les 5 à 6 premiers mètres et légèrement vaseux par la suite, sont rencontrés.

La consolidation du sol de fondation se caractérise par :

- . une disparité mise en évidence par les profils pénétrométriques suivant que le remblaiement est ancien ou récent.

- . une évolution très lente compte tenu des faibles valeurs du coefficient de consolidation vertical des argiles vaseuses.

Par ailleurs, le remblai existant présente un état de compacité insuffisant et une constitution inadéquate :

- . de sa partie inférieure pour assurer un drainage suffisant et favoriser l'accélération de la consolidation.

- . de sa partie supérieure pour servir d'assise au corps de chaussée.

Les méthodes de construction envisagées sont de deux ordres :

- 1) Excavation du tout-venant existant et réalisation des remblais prévus par le projet, conformément aux normes et avec des matériaux répondant aux recommandations des remblais sur sols compressibles. L'accélération de la consolidation du sol de fondation est obtenue alors par la réalisation de drains verticaux. L'utilisation d'une surcharge temporaire pourrait améliorer efficacement l'accélération de la consolidation.

- 2) Adoption de techniques spéciales permettant d'améliorer la compacité du remblai existant et d'accélérer la consolidation du sol de fondation. Deux catégories sont envisageables :

2.1 "Substitution ponctuelle" par incorporation à travers le tout-venant et les sols mous ou lâches sous-jacents, de matériaux pulvérulents vibrés (graviers) ou traités (sables). Cette incorporation de matériaux et d'énergie se fait aux noeuds d'un maillage défini suivant la technique adoptée, les moyens disponibles, les caractéristiques du terrain et les exigences du projet. La technique la plus éprouvée dans ce domaine est celle des colonnes ballastées.

Les profondeurs de traitement préconisées sont d'une douzaine de mètres dans l'ancien remblaiement et d'une dizaine dans le récent. Cependant et compte tenu de la présence de passage à faibles caractéristiques mécaniques, non encore consolidées, dans les 5 à 6 mètres supérieurs des sables en profondeur, les profondeurs de traitement en certains points du réseau dans la partie à remblaiement récent, seront d'une quinzaine de mètres.

2.2 Pilonnage intensif de Ménard: sous réserve de s'affranchir de l'effet dalle que pourrait induire la couche du tout-venant une fois compactée, cette technique par son aspect de compactage intensif et de consolidation dynamique pourrait être la mieux appropriée dans le cas présent.

La définition des paramètres d'exécution des techniques envisagées ci-dessus nécessite la consultation d'entreprises spécialisées, et la réalisation d'investigations géotechniques complémentaires orientées suivant la technique retenue.

D- Remblai section courante rive gauche

. Schématisation géotechnique:

Dans la partie centrale de la zone étudiée, le sol de fondation peut être schématisé par la coupe géotechnique suivante:

-3,2m d'argiles molles : silteuses sur 1,2m et vaseuses peu plastiques faiblement organiques sur 2m

-9m de sables peu à moyennement argilo-vaseux lâches à très lâches.

-11m de sables fins argilo-vaseux, moyennement denses.

Vers la voie ferrée, la même coupe peut être extrapolée mais avec les épaisseurs suivantes :

- 4 m d'argiles molles

-12 m de sables lâches avec passage moins lâches.

-16 m de sables moyennement denses avec passages lâches.

Vers le Douar et compte tenu de l'allure différente de pénétromètre réalisé dans cette partie, l'extrapolation devient moins justifiée. Cependant, on peut avancer que les sols à faibles caractéristiques mécaniques (probablement argiles molles sur sables lâches plus ou moins à très argilo-vaseux) sont rencontrés sur une vingtaine de mètres.

Les sols compressibles rencontrés sont les argiles molles et les sables lâches.

Les essais mécaniques en laboratoire et scissométriques in-situ montrent que les argiles molles présentent une cohésion non drainée moyenne (ou équivalente) de $1,1 \text{ T/m}^2$. Le coefficient de consolidation vertical apparent (calculé à partir des coefficients mesurés) est de $12.10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$

. Stabilité

Le calcul de stabilité avec des talus de pente 2/1 montre que le coefficient de sécurité est compris suivant le profil :

- entre 2,6 et 3,3 en rupture par poinçonnement,
- et entre 1,4 et 1,9 en glissement rotationnel suivant cercle tangent à la base de la couche molle.

Le remblai de hauteur inférieure à 2 m peut être construit en une seule phase. Il présente vis à vis de la rupture de la couche des argiles molles un coefficient de sécurité de 1,5. L'adoucissement de la pente à 3/1 n'apporte pas d'amélioration très sensible du coefficient de sécurité.

. Tassement

L'amplitude des tassements de consolidation des argiles molles est de 8,5 cm pour une hauteur de remblai de 1,5 m et de 10 cm pour 2 m

A priori, l'amplitude des tassements de consolidation des sables vaseux en profondeur n'est pas négligeable.

. Temps de consolidation:

Les temps nécessaires pour obtenir 90% de la consolidation de la couche des argiles calculés sont compatibles avec les délais de construction usuels.

En permettant un drainage par la surface (matériau du remblai drainant, réalisation d'une couche drainante à la base du remblai, etc...), le temps nécessaires est estimé à 6 mois pour un remblai de 2 m

L'utilisation de géotextiles à la base du remblai a été recommandée: pour leur rôle anti-contaminant, d'amélioration du drainage et de stabilisation du remblai.