

Titre

Des fondations exceptionnelles par pieux battus de 45 à 85 m pour le viaduc du Womey à Cotonou au Bénin

Auteurs :

Benedikt STÜTZL, Ingénieur, GEOS

Stéphane CURTIL, Directeur Général, GEOS

Eric BARAIZE, Directeur Technique, SOGEA SATOM

Sosthène BOKO, Directeur Travaux, SOGEA SATOM

Chapô :

Le viaduc sur le Womey, situé à proximité de Cotonou au Bénin, baptisé « Pont de l'Alliance », facilite la continuité des circulations et des échanges entre les populations de Cocotomey, Womey et ses environs. Les reconnaissances géotechniques, la conception et la réalisation du viaduc et de ses fondations répondent à un contexte géotechnique délicat caractérisé par une géologie hétérogène avec des fondations exceptionnelles : des pieux battus de plus de 80 m.

Texte :

1 Le viaduc du Womey : un ouvrage attendu pour désenclaver des quartiers

1.1 La lagune et la ville

Le projet du viaduc de Womey s'inscrit dans un schéma de développement porté par le Gouvernement du Bénin, destiné à moderniser le réseau routier périphérique de Cotonou en aménageant un nouvel ouvrage reliant les quartiers de part et d'autre de la lagune. Ce projet facilitera ainsi le transit et la mobilité dans cette zone périphérique de cette grande agglomération du Bénin.

Le viaduc de Womey se situe au Nord-Est de la ville de Cotonou au Sud du Bénin à moins de 10 km de la côte atlantique. Le projet s'inscrit dans la commune d'Abomey Calavi au niveau de la lagune de Djonou. Avant la construction de l'ouvrage, le franchissement de la lagune se faisait par une piste en remblai de faible largeur utilisée uniquement par des motos et faisant l'objet d'un « péage » prélevé par les habitants des quartiers. En partie centrale, cette piste était posée sur un système composite de buses carrées en béton et d'ouvrages en bois posés sur un matelas végétal et tourbeux et non pas sur un terrain naturel stable. Au niveau du tracé du pont, une amorce de début de piste avait été réalisée par le génie militaire puis, abandonnée compte tenu de difficultés de réalisation.

1.2 Le viaduc

Le viaduc a une longueur de 328 m avec ses voies d'accès de 161 m côté sud et de 121 m côté Nord (figure 1). Cet ouvrage, constitué de 17 travées, se décompose comme suit :

- 2 culées (appuis d'extrémité) et 16 piles (Appuis intermédiaires) fondés sur un système de 2 pieux par appui, soit 36 pieux métalliques battus,
- D'un tablier constitué de poutres échelle en acier réalisé en poutres reconstituées soudées (PRS) reposant sur les points d'appuis des piles et des culées et de dalles préfabriquées posées et solidarisées aux charpentes par le biais de connecteurs ou goujons.

L'espacement entre la culée et la pile la plus proche est de 14,0 m et l'espacement entre les piles est de 20 m (14,0 m – 15 x 20,0 m – 14,0 m). D'une largeur totale de 11,44 m, le viaduc accueille une voie de 3,5 m et un trottoir de 1,75 m par sens de circulation.

2 Contexte géologique et campagne de reconnaissance préalable

2.1 Description du contexte géologique

Le projet s'inscrit à la frontière entre le plateau d'Allada et le littoral qui constitue un cordon sableux marquant le contact avec la mer et isolant un système de lagunes parallèles à la côte. Selon, les données géomorphologiques et les sondages anciens disponibles au démarrage du projet, la zone du viaduc est très marécageuse avec une forte végétation herbeuse. Les terrains identifiés sont des dépôts tourbeux, des vases, des sables et argiles en mélanges et proportions très variables avec une forte hétérogénéité.

2.2 Une campagne de reconnaissances géotechniques exceptionnelles

Pour réaliser les sondages de reconnaissance, prenant en compte la faible profondeur de la lagune, il a été envisagé dans un premier temps la réalisation d'une plateforme de travail en remblais pour l'accès aux points de sondage et aux futurs appuis de l'ouvrage. Lors de l'exécution de cet ouvrage provisoire de faible largeur, il est apparu un affaissement lié au poinçonnement des matériaux superficiels, en fond de lagune, de faibles caractéristiques mécaniques, sous le poids du remblai de la plateforme.

Suite à ces difficultés la campagne de reconnaissance complémentaire a dû être complètement repensée afin d'obtenir des données géotechniques de haute qualité permettant de faire face aux enjeux techniques et économiques du dimensionnement des fondations de l'ouvrage. Pour cela, la campagne redéfinie s'articulait selon les grands principes suivants :

- Reconnaissance de l'épaisseur des terrains de faibles caractéristiques mécaniques à l'aide de sondage au pénétromètre statique (CPT) au droit de chaque appui,
- Poursuite des sondages au-delà des terrains de faibles caractéristiques mécaniques à l'aide des sondages pressiométriques au droit d'un appui sur deux,
- Réalisation d'un triplet de sondage carotté, sondage pressiométrique et sondage au pénétromètre statique au droit de chaque culée de manière à pouvoir établir des corrélations entre les différents types de sondages,
- Mise en place d'un suivi renforcé sur place de la campagne de reconnaissances par deux experts de GEOS, spécialisés en sondage pressiométrique et en sondage au pénétromètre statique pour faire face aux difficultés liées à l'hétérogénéité et aux très faibles caractéristiques des terrain à caractériser.

Ces adaptations ont été associées à la mobilisation de moyens nautiques pour pouvoir réaliser la majeure partie des sondages situés dans la lagune (figures 2, 3 et 4).

2.3 Interprétation et expertise des données géotechniques

Les reconnaissances menées dans la zone de l'ouvrage, que ce soit au niveau des culées ou des piles en zone marécageuse, ont mis en évidence une hétérogénéité et une variabilité latérale très importante des sols et des caractéristiques mécaniques ainsi que la présence d'horizons compressibles (argiles molles, vases, tourbes, sables lâches) en surface comme en profondeur.

Pour l'ensemble des piles, les sondages au pénétromètre statique ont permis de distinguer l'interface entre les terrains de surface pouvant être qualifiés de très peu compacts à faible caractéristiques mécaniques et les terrains en profondeur présentant de meilleures caractéristiques mécaniques. Une fois les terrains de meilleurs caractéristiques rencontrés, les reconnaissances ont été poursuivies au moyen des essais pressiométriques de manière à ne pas être limité en profondeur par de faux refus au pénétromètre statique.

Pour fiabiliser les données d'entrée pour les études et afin d'exclure toute erreur d'interprétation tous les essais pressiométrique et sondages au pénétromètre statique ont été analysés par l'Entreprise en charge de leur exécution puis réinterprétés de manière systématique par un expert géotechnicien. Par ailleurs, il a été effectué systématiquement un contrôle croisé entre les résultats des essais pressiométriques et les données des sondages au pénétromètre statique pour valider le frottement latéral unitaire à retenir pour le dimensionnement des fondations.

3 Conception de l'ouvrage et de ses fondations

3.1 Le modèle géotechnique et ses aléas résiduels

Les sondages et essais réalisés dans la zone d'étude ont révélé une hétérogénéité latérale des sols conforme à ce qui peut être attendu dans le contexte géologique et structural de la zone du viaduc avec des changements de faciès très significatifs sur des distances inférieures à 2 m. Le projet est donc bien implanté dans une zone de sédimentation lacustre et lagunaire formé de lentilles et chenaux de dépôt entrecroisés. Dans ce contexte, la réalisation d'un profil en long à partir de l'ensemble des sondages effectués n'était pas adaptée puisque la fiabilité de l'interpolation et de l'extrapolation latérale des sondages n'était pas assurée. Il a donc été retenu dans le cadre du pont du Womey de réaliser :

- Une coupe type par sondage ou ensemble de sondage au droit des culées et le long des remblais d'accès,
- Une coupe géotechnique type par appui du pont basée sur une analyse statistique qui visait à intégrer l'hétérogénéité latérale et verticale des caractéristiques mécaniques au droit de chaque appui.

L'analyse détaillée des sondages pressiométriques a révélé non seulement une importante hétérogénéité verticale au sein d'un même sondage, déjà mis en évidence par les sondages au pénétromètre statique, mais aussi une hétérogénéité latérale importante entre les essais de deux sondages adjacents. De manière à prendre en considération cette hétérogénéité, il a été réalisé une analyse statistique basée sur la méthode de l'Eurocode 7 à partir de laquelle des valeurs caractéristiques ont été retenues, de manière à couvrir l'hétérogénéité mise en évidence par les sondages.

Cette approche a permis de construire, sur la base des résultats des essais in-situ disponibles, un modèle géotechnique robuste. Toutefois, du fait de l'importante hétérogénéité latérale et verticale des caractéristiques de sols au droit des ouvrages, il a été décidé dès la phase d'étude de mettre en place un suivi strict et renforcé du battage des pieux avec une instrumentation spécifique, de manière à valider la capacité portante de chaque pieu.

3.2 Conception des remblais d'accès et des fondations

La solution retenue pour la construction de cet ouvrage est une estacade comprenant 17 travées avec 2 culées et 16 piles.

Appuis du pont :

La culée et les piles de l'ouvrage sont fondées systématiquement sur deux pieux battus en acier, ouverts à leur base, de diamètre 1,03 m. Le dimensionnement a été réalisé selon la norme française d'application de l'Eurocode 7 NF P 94-262. La longueur des pieux a été déterminée de façon à pouvoir prendre en compte la résistance de point grâce à la formation d'un bouchon à l'intérieur du tube (figure 5).

Remblais d'accès :

La culée C0 est située à l'extrémité de la rampe d'accès d'un linéaire de 161 m implantée dans un contexte d'emprise très contraint. Ainsi, pour en limiter son emprise latérale, le remblai d'accès à l'ouvrage est soutenu latéralement par deux murs de soutènement de type cantilever en béton armé sur une longueur d'environ 110 m depuis son extrémité sud. Les 50 m restants ont été réalisé en talus avec une pente de 3H/2V, protégé contre l'érosion par un dispositif efficace en perrés maçonnés.

La rampe d'accès du côté de la culée C1 a été réalisé sur l'ensemble du linéaire avec des talus en remblai. La présence de terrains à très faibles caractéristiques mécaniques a nécessité localement la réalisation d'une purge sur 4 m de profondeur pour assurer la stabilité du remblai.

3.3 Conception du pont

Le viaduc est un ouvrage mixte en béton-acier. Le tablier du pont repose sur des poutres en acier PRS. Ces poutres sont posées sur les piles par l'intermédiaire d'appareils d'appuis en néoprène fretté. Les travées sont continues et forment un ensemble monolithique. En ce qui concerne les piles, elles

sont constituées de pieux battus et de chevêtres coulés sur place au moyen d'un coffrage perdu en béton armé (coque de chevêtre).

4 Réalisation des travaux

4.1 Travaux géotechniques : les remblais

Afin de pouvoir accéder aux points de sondage de la campagne de reconnaissance complémentaire et aux futurs appuis de l'ouvrage pour la construction du viaduc, il était initialement prévu de réaliser une piste d'accès provisoire par apport de matériaux de remblai. Ces matériaux ont été mis en place à l'avancement pour former une digue traversant la lagune. Au cours de ces travaux, des affaissements importants s'apparentant à des ruptures se sont produits et ont conduit à l'arrêt des travaux.

Ces affaissements correspondent vraisemblablement à un poinçonnement des matériaux superficiels de fond de lagune (dépôts organiques de décomposition de la végétation flottante), de très faibles caractéristiques mécaniques, sous le poids du remblai de la plateforme. Les observations du comportement à court terme de l'ouvrage provisoire en remblai traversant partiellement la lagune à remis en question la pérennité et la sécurité de l'ouvrage qui devait être maintenu durant toute la construction du viaduc dans les conditions prévues. Une adaptation de la méthodologie de construction de l'ouvrage au contexte géologique s'est alors imposée. La solution retenue était un pont type estacade réalisé à l'aide d'un lanceur-guide de battage (LGBT).

Les deux rampes d'accès nord et sud traversent par endroit des agglomérations et ont donc nécessité la réalisation des murs de soutènement pour contenir leur remblai, et de protection en perrés maçonnés. Le revêtement a été assuré par des pavés triefs de 11 cm d'épaisseur avec des aménagements pour assurer le drainage des eaux de la chaussée. Pour stabiliser, la couche superficielle de sol, elle a été traitée au liant hydraulique sol-ciment (figure 6).

4.2 Travaux de génie civil : Construction du viaduc

Les travaux exécutés depuis le LGBT ont suivi le phasage des travaux suivant :

- Implantation et positionnement des tubes, puis battage des 2 pieux,
- Recépage et mise en place des tubes bouchonnés par une tôle de 4 mm,
- Pose d'armature et bétonnage des têtes de pieux,
- Pose de coque de chevêtres, mise en place du ferrailage et bétonnage,
- Pose et réglage des appuis néoprènes, puis mise en place de la charpente,
- Poussage partiel de la plate-forme et changement de position des vérins,
- Pose des dalles à l'arrière de la plate-forme,
- Changement de la position de la grue et bridage de la plate-forme,
- Clavage des dalles et lancement de la plate-forme ?
- Réalisation du revêtement.

Les opérations ci-dessus énumérées ont été reprises dans le même ordre appui pour tous les appuis. Il est à noter que la durée d'un cycle était en moyenne d'une semaine (figures 7 à 12).

4.3 Préfabrication des éléments en béton armé

Au nombre de 129 pour les courantes et de 2 pour celles d'about, les dalles du tablier ont été préfabriquées et clavetées sur place après leur pose. D'un poids total de 16 t, leur déstockage et rangement était assuré par une grue mobile A600 TEREX et leur acheminement au moyen d'un camion plateau. Le camion plateau avait la capacité d'acheminer sur le chantier deux unités de dalles par voyage.

Au nombre de 220 unités, les corniches étaient coulées sur 2 bancs de fabrication ayant une capacité de 4 unités de corniche chacune. Beaucoup plus léger, leur poids était d'environ 2 t et le camion HIAB suffisait pour leur manutention jusqu'à la pose en passant par le stockage temporaire.

Au nombre de 16 unités, les coques des chevêtres ont été conçus pour servir de coffrage perdu pour les chevêtres. D'un poids total de 16 t, le déstockage et le rangement de ces coques était assuré par une grue mobile A600 TEREX et leur acheminement au moyen d'un camion plateau. Le camion plateau avait la capacité d'acheminer une unité de coque par voyage.

4.4 Adaptation des fondations au contexte géotechnique en cours de projet

Du fait de l'importante hétérogénéité des caractéristiques de sols au droit de l'ouvrage, il a été nécessaire de réaliser un suivi strict et renforcé de battage des pieux avec instrumentation spécifique lors de leur mise en place. La majeure partie des pieux a été battue jusqu'à l'obtention de la capacité portante déterminée grâce aux données de suivi de battage (PDA : pile driving analyser). Environ 20 % des pieux a été battu jusqu'au refus du marteau sur instructions du client. Sur les appuis concernés, la capacité requise a donc été largement dépassée (figure 13), le pieu le plus long mesure 87 m alors qu'il était prévu 57 m maximum.

L'analyse de battage, correspondant à une reconnaissance de sol en soi, montre que l'horizon d'ancrage cible n'était pas toujours présent à la cote supposée ou n'était pas d'une épaisseur suffisante pour respecter le critère de fin de battage de telle sorte que certains tubes ont dû être allongés. Par ailleurs, elle a permis de mettre en évidence une hétérogénéité très importante à l'échelle d'un appui. Par exemple, au droit des appuis P1, P5 à P8, P10, P11 et P15 des écarts très significatifs de capacité portante ont été observés entre les deux pieux voisins distants de moins de 6 m avec des différences de longueur de pieux allant jusqu'à 22 m.

Résumé

La construction du viaduc du Womey, au Bénin, s'inscrit dans un contexte géotechnique très hétérogène de la lagune de Djonou à Abomey Calavi. Vu les affaissements successifs du remblai provisoire d'accès pour la construction de l'ouvrage, une adaptation de la conception et de la méthodologie de construction du viaduc s'est imposée afin de s'adapter au contexte géologique et géotechnique singulier de la zone : un pont estacade réalisé à l'aide d'un lanceur-guide de battage. Ensuite, pour pallier les incertitudes géotechniques résiduelles, qui ne pouvaient être levées par des sondages géotechniques complémentaires, il a été mis en place un suivi de battage renforcé pour garantir les capacités portantes des fondations.

Encadré des principales quantités :

Caractéristiques du viaduc :

Longueur totale de 328,0 m avec des portées 14,0 m – 15 x 20,0 m – 14,0 m
2 culées et 16 piles

Caractéristiques des fondations :

2 pieux battus en acier par appui
Diamètre : 1032 mm – Epaisseur 16 mm
Linéaire estimé (Etude EXE) : 1621,5 m
Linéaire battu (Interprétation battage) : 2013,7 m

Encadré des principaux intervenants :

Maitre d'ouvrage : République du Bénin, Ministère de l'Economie et des Finances
Maitre d'œuvre : République du Bénin, Ministère des Infrastructures et des Transports, Direction Générale des Infrastructures
Mission de contrôle : TR Engineering – Inros Lackner
Entreprise : SOGEA SATOM
Études géotechniques : GEOS Ingénieurs Conseils
Études de la charpente métallique : MATIERE

Études béton armé : IOA