

DES FONDATIONS EXCEPTIONNELLES PAR PIEUX BATTUS DE 45 A 85 M POUR LE VIADUC DU WOMEY A COTONOU AU BENIN

EXCEPTIONAL FOUNDATIONS BY DRIVEN PILES FROM 45 TO 85 M FOR THE VIADUCT FROM WOMEY TO COTONOU IN BENIN

Stéphane CURTIL¹, Benedikt STÜTZL²

¹ GEOS Ingénieurs Conseils – Rueil-Malmaison

² GEOS Ingénieurs Conseils – Rueil-Malmaison

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

ABSTRACT – The viaduct over the Womey, near Cotonou in Benin, known as the "Alliance Bridge", facilitates the continuity of traffic between the populations of Cocotomey, Womey and its surroundings. The geotechnical studies, the design and build of the foundations respond to a delicate geotechnical context characterized by a heterogeneous geology with exceptional foundations: driven piles of more than 80 m.

1. Introduction

1.1. La lagune et la ville

Le 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, 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 après de nombreuses ruptures de l'ouvrage en remblai.



Figure 1. Vue aérienne du viaduc du Womey au Bénin

1.2. Le viaduc

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

- Deux culées (appuis d'extrémités) et 16 piles (appuis intermédiaires) fondées sur un système de 2 pieux par appui, soit 36 pieux métalliques battus,
- D'un tablier constitué de poutres échelles 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 m, celui entre les piles est de 20 m (14 m – 15 x 20 m – 14 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 reconnaissances préalables

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.

Le site du Womey se situe dans le bassin sédimentaire côtier du Dahomey et du Togo dont les études structurales ont été rares. Toutefois les travaux de Slansky (1959) et de Blivi (1993) permettent de distinguer les grands sous-ensembles et de comprendre en partie la morphologie actuelle de la zone. Le sud du Bénin est ainsi constitué de 2 principaux ensembles géographiques (figure 2.) :

- Une série de plateaux, d'altitude comprise entre 20 et 200 m et régulièrement inclinés vers le sud, séparés par les vallées des différents cours d'eau et coupés par une dépression médiane constituant un des éléments tectoniques principaux de la région,
- Une zone littorale basse dans laquelle s'inscrit le projet.

La plaine côtière basse ne dépasse pas 10 m d'altitude. Elle est souvent sablonneuse, jalonnée de lacs et de lagunes (lagune de Porto-novo, de Ouidah et de Grand-Popo). C'est un complexe de plusieurs cordons littoraux qui emprisonnent, au contact des plateaux, deux lacs qui sont : le lac Nokoué et le lac Ahémé.

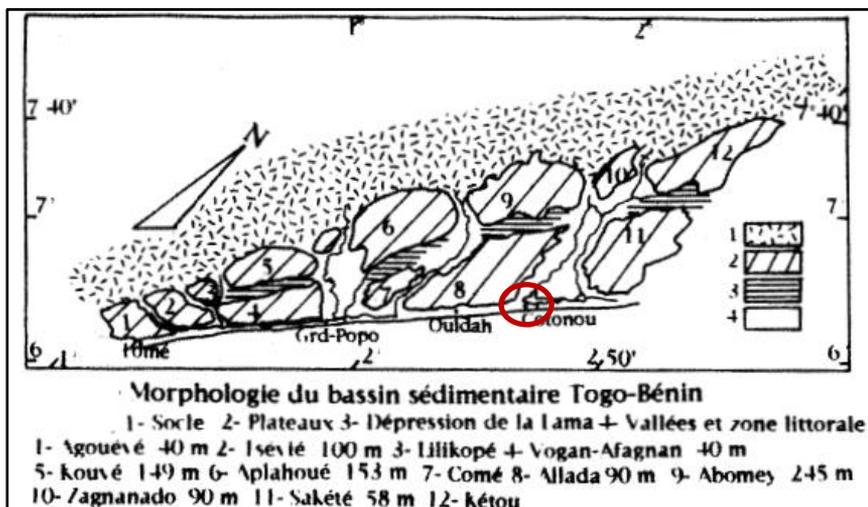


Figure 2. Les différentes unités géographiques du bassin sédimentaire côtier (extrait de Blivi, 1993) – la zone du projet est cerclée en rouge

D'après Slansky (1959), le socle ancien, constitué d'embranchés et de granite, datant du Dahomeyen, se retrouve vers -1 500 m de profondeur au niveau de la zone d'étude. Il est recouvert par une couverture sédimentaire datant du Crétacé et de l'Eocène dont les épaisseurs peuvent varier notamment du fait de l'érosion. Au maximum les reconnaissances ont montré des épaisseurs de terrains datant du Maestrichien jusqu'à 340 m, du Paléocène inférieur jusqu'à 22 m et supérieur jusqu'à 100 m, de l'Yprésien jusqu'à 45 m et du Lutétien jusqu'à 170 m. Ces différents étages présentent principalement des faciès sablo-argileux contenant parfois des niveaux marno-calcaires (figure 3.).

Ces terrains sont recouverts par la formation du Continental Terminal qui correspond à des formations continentales comprises entre l'Eocène et les dépôts récents alluvionnaires ou littoraux. Ces terrains correspondent à une alternance de faciès sableux et argileux.

Les formations les plus récentes repérées correspondent aux alluvions récentes et aux formations littorales.

Les formations littorales sont en épaisseurs variables le long de la côte. Dans le prolongement des grands cours d'eau le Continental Terminal a été largement déblayé permettant la mise en place d'une épaisseur importante d'alluvions récentes et de formations littorales.

L'ensemble des formations récentes est constituées principalement de sables et d'argiles dont l'épaisseur a priori importante n'est pas déterminée.

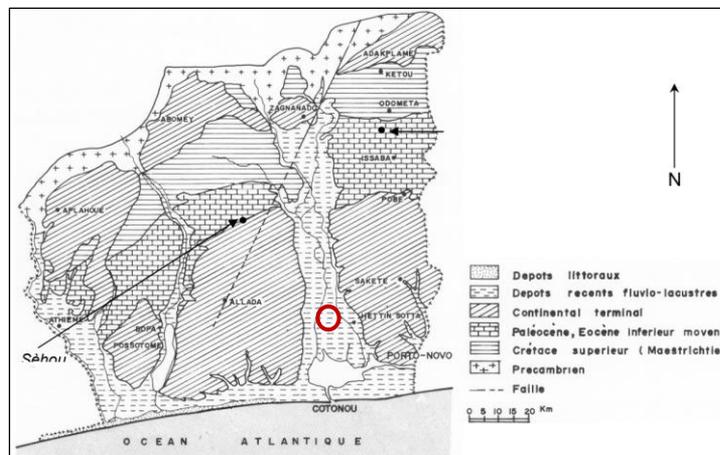


Figure 3. Bassin sédimentaire côtier du Bénin : situation géologique d'après Yalo et al. (2008)

L'analyse bibliographique montre que les terrains attendus sont des dépôts alluviaux et éventuellement des dépôts du Continental Terminal en base de sondage dans la zone d'étude. Dans tous les cas les faciès correspondront à des sables et argiles en mélanges et proportions variables sans qu'il soit identifié de substratum compact.

Localement au niveau du projet de viaduc, d'après 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. Description du contexte tectonique

Le bassin sédimentaire côtier est compartimenté par un réseau de failles et d'accidents tectoniques très peu visibles car recouverts par les formations récentes alluvionnaires. Slansky (1959) a mis en évidence deux familles de failles. Les plus importantes sont les failles de Lokassa et de Sehoué de direction NNE-SSW, de 100 m de rejet vertical, d'âge post-Lutétien et antérieures aux dépôts du Continental Terminal ; les autres d'orientation ENE-WSW, abaissent d'une quarantaine de mètres le compartiment nord. Motorolla (1977); Lang et Paradis (1977) ont identifié des failles secondaires, notamment par technique la

géophysique, qui contrôlent la structure du bassin. Ces failles encadrent les grands ensembles du bassin et sa limite méridionale. Les grands cours d'eau sont dans l'axe des failles majeures.

A priori, l'étude bibliographique ne met pas en évidence de faille d'orientation E-W dans la zone d'étude. Toutefois, la présence de failles transformantes issues de la dorsale Atlantique sont identifiées en limite du plateau continental; il n'est donc pas exclu de trouver des failles d'orientation E-W dans la zone de l'ouvrage.

Les images aériennes locales (figure 4.) permettent de distinguer des structures linéaires répétitives le long du littoral Atlantique avec des orientations W-E, NE-SW et NW-SE. Ces structures, suivies par les principaux cours d'eau de la zone, pourraient correspondre à des zones de fragilité des matériaux. Il existe donc un risque important de présence de failles dans cette zone, susceptibles d'impacter les fondations du futur viaduc et d'engendrer des écarts de comportement entre les différentes piles de l'ouvrage.



Figure 4. Vue aérienne Google Earth de la zone du projet - Alignement du système hydrographique sur les directions des failles

2.3. Une campagne de reconnaissances géotechniques exceptionnelles

Pour réaliser les sondages de reconnaissances, 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, les remblais ont poinçonné les matériaux de faibles caractéristiques mécaniques formant le fond de lagune. Les sondages ont ensuite montré que leur épaisseur atteignait 25 m.



Figure 5. Forages pour essais pressiométriques et barge pour sondage aquatique

Ces premières difficultés ont été une alerte géotechnique forte permettant d'identifier rapidement que les pieux de 25 à 30 m initialement envisagés ne seraient pas compatibles avec les conditions géotechniques locales. La campagne de reconnaissances

complémentaires a alors 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 au moyen 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 (figure 6.).

2.4. 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 à très compressibles (argiles molles, vases, tourbes, sables lâches) en surface comme en profondeur. Cette variabilité latérale a été confirmée lors du battage de pieux pour lesquels des différences de profondeur d'ancrage de plus de 20 m ont été observées entre les 2 pieux d'un même appui.

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 faibles caractéristiques mécaniques et les terrains en profondeur, présentant de meilleures caractéristiques mécaniques. Une fois les terrains de meilleures 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 pressiométriques 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 de Géos. Par ailleurs, un contrôle croisé entre les résultats des essais pressiométriques et les données des sondages au pénétromètre statique il a été effectué systématiquement en vue de 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 formée de lentilles et chenaux de dépôts 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 des études de conception géotechnique du pont du Womey de réaliser :

- Une coupe type par sondage ou ensemble de sondages 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.

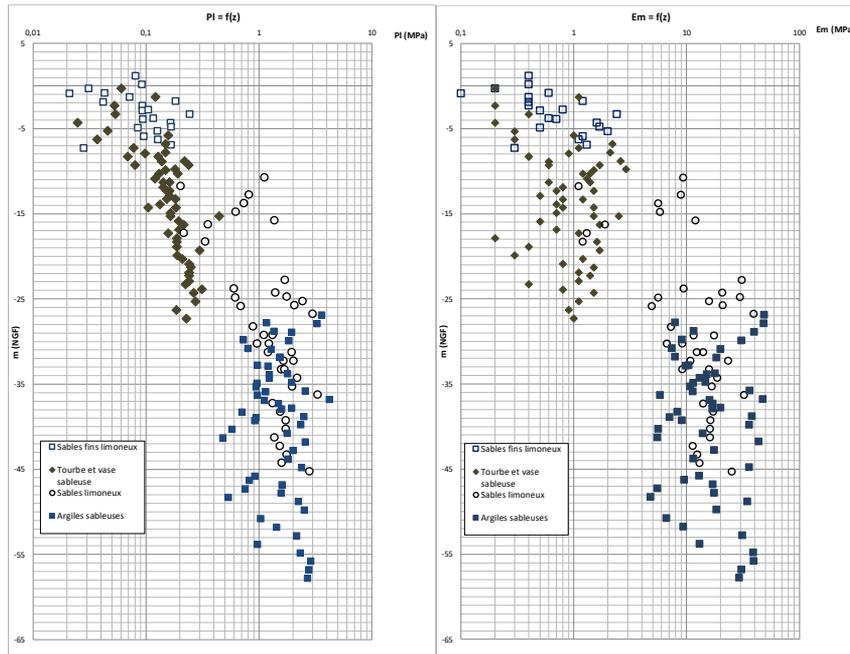


Figure 6. Pression limite (p_l^*) et module pressiométrique E_m en fonction de la profondeur.

L'analyse détaillée des sondages pressiométriques (figure 6.) 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 un modèle géotechnique robuste à partir de tous les résultats des essais in-situ disponibles. 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 de manière à valider toutes les capacités portantes.

3.2. Conception des remblais d'accès et des fondations

La construction de cet ouvrage nécessitait la mise en place d'une estacade comprenant 17 travées, 16 piles et 2 culées associées à leurs remblais d'accès.

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 pointe grâce à la formation d'un bouchon à l'intérieur du tube.

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 imposant la réalisation de deux murs de soutènement de type cantilever en béton armé. 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 sondages 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 remblais permettant de combler provisoirement la lagune. Dès le début de ces travaux, des affaissements importants par poinçonnement des matériaux superficiels de fond de lagune (dépôts organiques de décomposition de la végétation flottante), de très faibles caractéristiques mécaniques, se sont produits.



Figure 7. Vue du lanceur guide de battage depuis la piste traversant la lagune

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) (figure 7.).

4.2. 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). Toutefois, par volonté de sécurité, 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, le pieu le plus long mesure 87 m alors que la capacité portante était atteinte dès 57 m de profondeur. Cet exemple montre l'absence d'amélioration significative des paramètres mécaniques en profondeur.

L'analyse de battage, correspondant à une reconnaissance de sol en soi, montre que l'horizon d'ancrage cible (zone locale de plus forte compacité) 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 confirmé une hétérogénéité très importante à l'échelle métrique puisqu'au droit de 8 piles, 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 longueurs de pieux allant jusqu'à 22 m.

Évolution des longueurs de pieux par appui			
Appuis	Longueur prévue (m)	Longueur battue (m)	
		Amont	Aval
C0	39,0	43,4	43,2
P1	32,1	61,7	39,4
P2	41,7	50,1	55,0
P3	42,7	46,7	59,8
P4	43,9	61,9	60,2
P5	44,4	48,5	60,8
P6	49,5	62,3	48,8
P7	57,1	60,4	46,8
P8	57,1	60,6	47,8

Évolution des longueurs de pieux par appui			
Appuis	Longueur prévue (m)	Longueur battue (m)	
		Amont	Aval
P9	57,3	61,5	62,3
P10	49,5	65,0	84,3
P11	49,8	67,2	87,3
P12	49,5	62,3	63,7
P13	49,0	60,4	60,5
P14	45,8	46,8	62,8
P15	38,9	61,8	42,0
P16	27,6	45,0	41,5
C1	36,0	45,0	37,9

5. Conclusions

Les études géologiques et structurales préalables à la conception détaillée des fondations du viaduc avaient constitué des alertes fortes sur le risque de rencontre d'épaisseurs importantes de matériaux meubles compressibles au niveau de la lagune. Des pieux battus de plus de 25 m étaient envisagés. Les premiers sondages sur site ont montré qu'il était nécessaire de conduire les reconnaissances géotechniques jusqu'à plus de 60 m de profondeur sans certitude d'identifier des horizons significativement résistants. La multiplication des techniques de reconnaissances (pénétrömètre statique, carottage et pressiomètre à grande profondeur) et la mobilisation d'experts en géotechnique ainsi qu'en réalisation et interprétation d'essais pressiométriques a permis une optimisation poussée des dimensionnements des fondations par pieux battus flottants. Pour autant, lors de l'exécution, les importantes variations des cotes d'ancrage des pieux allant jusqu'à plus de 20 m à seulement 6 m de distance ont confirmé l'extrême variabilité géotechnique du site.

6. Références bibliographiques

- Blivi A., (1993) Morphology and current dynamics of the coast of Togo. *Geo-Eco-Trop*, 17: 25-40.
- Lang J., Paradis G. (1977) Un exemple d'environnement sédimentaire bio-détritique non carbonaté marin et continental, holocène, en climat intertropical : le domaine margino-littoral du Bénin méridional. *Rev. Géog. Phys. Géol.dyn.*, XIX, 3, P.295-312.
- Motorolla P. (1977) - Campagne de couverture radar. Rapport interne, BNRM – Togo. In Monciardini et al., (1986) Synthèse géologique du bassin côtier crétacé supérieur - tertiaire du Togo: recherche de tourbe, lignite, charbon et autres substances industrielles. Rapport Bur. Rech. Min. 111 p.
- Slansky M. (1959), Contribution à l'étude géologique du bassin sédimentaire côtier du Dahomery et du Togo, Thèse Sci. Nancy et Mém. Bur. Rech. Geol. Min., 11, 270p.
- N. Yalo N., Adjanohoun A., Adissin Glodji L. et Kaki C. (2008), Formations géologiques de la glauconie du bassin sédimentaire côtier du Bénin. *Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin*, Numéro 62 – Décembre.