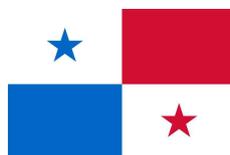


TUTEUR : Delphine CHALLANT – PROFESSEUR RÉFÉRANT : Damien SERRE

M E T R O de P A N A M A
LIGNE 1

pour en savoir plus...
eivp-paris.fr

Ecole des Ingénieurs de la Ville de Paris
15, rue Fénelon
75010 Paris



Résumé

Dans le cadre de ses études à l'Ecole des Ingénieurs de la Ville de Paris, Carolina Martinez-Mateo élève en troisième année de la promotion 50, a effectué son Travail de Fin d'Études à Paris au sein de l'entreprise Française Systra – leader mondial de la conception et planification d'ouvrages de Transport.

Elle a contribué pendant la phase d'études du métro de Panama City, (Amérique Centrale) en étudiant des solutions techniques valables pour la conception structurale des Stations aériennes. Ce rapport présente la complexité d'un ouvrage en ville, avec les contraintes dues au séisme, la démarche à suivre pour les ingénieurs d'études techniques, la prise de décisions, les solutions développées ainsi que son expérience dans le Génie Civil et Ouvrages d'Art en France.

Thésaurus

AASHTO, Pile, Viaduc, Chevêtre, Béton Armé, Acier, Sollicitations, Ferrailage, Résistance, Appel d'Offre

Abstract

For her studies at the Engineering School of The City of Paris, Carolina Martinez-Mateo, student in her third year of the 50th promotion, made her Final Studies Report in Paris, in the office of technical studies in Systra, a French leader company in the design and planning of Transport works.

She has taken part of the implementation phase of the Subway in Panama City (Central America) studying the technical solutions for the Elevated stations. This report outlines the rules to take into account during the construction of a civil project in town, the approach to be followed by engineer's techniques, decision making, developed solutions and her experience in Civil Engineering in France.

Keywords

AASHTO, Pier, Viaduct, Pier cap, Reinforced Concrete, Steel, Solicitations, Reinforcement, Resistance, Tender

Resumen

Dentro del marco de sus estudios en la Escuela de Ingeniería de la Ciudad de Paris, Carolina Martinez-Mateo, estudiante en quinto año (3ºFrancia) de la promoción 50, realizó su Proyecto Final de Carrera, en el departamento de estudios técnicos de Ingeniería Civil, de Systra, Empresa Francesa líder en la concepción y planificación de obras de Transporte.

Ella ha contribuido en la fase de ejecución del metro de Panama City (America Central) estudiando las soluciones técnicas viables para la concepción estructural de las Estaciones Aéreas. Esta memoria presenta la normativa a tener en cuenta, las dificultades debido a la presencia de Seismos, el procedimiento a seguir por los ingenieros de estructuras, la toma de decisiones, las soluciones desarrolladas así como su experiencia en la Ingeniería Civil en Francia.

Palabras Clave

AASHTO, Pila, Viaducto, Capitel, Hormigon Armado, Acero, Solicitaciones, Armaduras, Resistencia, Licitacion

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier Hervé CUDENNEC Directeur du Projet de Metro à Panama, Delphine CHALLANT Responsable des Stations et Bruno SARRET Responsable du Pôle Architecture de m'avoir fait confiance en m'intégrant dans son équipe de travail.

Prisca FLATTOT, Responsable Structures Stations Aériennes, pour la considération dont elle a fait preuve à mon égard, dans toutes les tâches assignées et la responsabilité qui pesée sur moi.

Mathieu MULS, Ingénieur Structures d'Ouvrage d'Art pour son profil didactique et le suivi de mes calculs des stations aériennes.

Les membres du Bureau de Dessin, avec un spécial remerciement à Thierry CARON pour notre travail fourni lors des plans de la méthode de construction.

Un grand merci également aux Ingénieurs Structures membres du Bureau pour son temps passé à m'orienter dans les différentes solutions techniques, ainsi que les Architectes des Stations pour son expertise et la qualité des projets.

En fin, je souhaite remercier à Damien SERRE, Responsable du Pôle Construction de l'École des Ingénieurs de la Ville de Paris, pour son suivi et ses conseils au long de mon Travail de Fin d'Études.

Sans oublier, les vrais responsables de faire une réalité mon Travail Fin d'Études, mes parents Miguel-Andrés et Maria-Luisa, pour son solide soutien et pour m'avoir encouragé à devenir Ingénieur en France.

TABLE DE MATIÈRES

I.	ORGANISME D'ACCUEIL.....	7
I.1.	SYSTRA.....	7
I.1.1.	<i>Pôle Génie Civil-Ouvrages d'Art.....</i>	8
II.	APPROCHE DU PROJET D'ÉTUDE.....	9
II.1.	La Ville de Panama.....	9
II.1.1.	<i>La ligne 1 du Metro au Panama.....</i>	10
II.2.	La complexité d'un projet de transport urbain.....	11
II.2.1.	<i>Les différents intervenants au long du projet de la première ligne du métro à Panama.....</i>	12
II.2.2.	<i>Les Risques et les Opportunités d'un tel projet.....</i>	12
III.	LA MISSION.....	14
III.1.	Mon rôle.....	14
III.1.1.	<i>Les intérêts et les enjeux du stage.....</i>	15
IV.	ETUDE TECHNIQUE DES STATIONS AÉRIENNES.....	16
IV.1.	Solutions envisagées.....	16
IV.1.1.	<i>Solution 1 : le viaduc ne traverse pas la station.....</i>	16
IV.1.2.	<i>Solution 2 : le viaduc est séparé de la station et introduit dans la station sur des supports indépendants</i>	17
IV.1.3.	<i>Solution 3 : structure portante du viaduc et de la station commune.....</i>	19
III.2.	Etude comparatif des solutions présentées.....	20
III.2.1.	<i>Indications.....</i>	21
III.3.	Conséquences sur l'architecture des stations aériennes.....	22
III.4.	Structure indépendante station-viaduc.....	24
III.4.1.	<i>Réponses techniques.....</i>	24
	<i>Solution A : viaduc séparé de la station et supporté par piles indépendantes.....</i>	25
	<i>Solution B: structure porteuse du viaduc et de station commune.....</i>	26
	<i>Solution Choisie :.....</i>	27
III.4.2.	<i>Solution Définitive.....</i>	28
III.5.	Etude détaillée du quai.....	30
III.5.1.	<i>Géométrie de la poutre de 15 m de portée.....</i>	30
	<i>Charges appliquées.....</i>	30
	<i>Charges permanentes (Death loads DL).....</i>	31
	<i>Surcharges permanents (Superimposed dead loads SIDL).....</i>	31
	<i>Charges d'exploitation (Live Loads LL).....</i>	31
	<i>Vérification à l'Etat Limite Ultime (ELU).....</i>	31
	<i>Sollicitations.....</i>	31
	<i>Vérification du moment fléchissant en appui $x = 15m$.....</i>	32
	<i>Vérification du moment fléchissant en travée $x = 84,12m$.....</i>	33
	<i>Vérification à l'Etat Limite de Service ELS.....</i>	34
	<i>Vérification de l'armature minimale longitudinale.....</i>	34
	<i>Vérification de l'armature minimale transversale (Av).....</i>	34
	<i>Vérification des contraintes à ELS :.....</i>	35
V.	MÉTHODE DE CONSTRUCTION.....	36
VI.	CONCLUSION.....	42
VII.	ANNEXES.....	43
	Annexe n°1 : Toiture de la Station Aérienne.....	43
	<i>Solutions toiture.....</i>	43
	<i>Aspect architectural.....</i>	45
	<i>Montage de la station.....</i>	45
	Annexe n°2: Logiciel de Calcul Sofistik®.....	46
	<i>Géométrie :.....</i>	46
	<i>Matériaux :.....</i>	47
	<i>Descente des Charges :.....</i>	47
	<i>Sollicitations :.....</i>	48
	<i>Déformations :.....</i>	48
	<i>Modélisation de l'ensemble de la station aérienne.....</i>	49
	Annexe n°3: Viaduc – élément U Systra.....	50
VIII.	RÉFÉRENCIEMENT.....	51
IX.	GLOSSAIRE.....	51
X.	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	51
	<i>Articles.....</i>	52
	<i>Page de garde.....</i>	52
	<i>Pages Web visitées.....</i>	52
	<i>TABLE DES FIGURES.....</i>	53
	<i>TABLE DES TABLEAUX.....</i>	53
XI.	GANTT.....	54

INTRODUCTION

Le Travail de Fin d'Études, signifie une étape très importante dans mon cursus d'Ingénieurs en France.

Attirée dès le début par le domaine de la Construction et l'Architecture, ce travail m'a permis de renforcer mes connaissances techniques et de participer dans la phase de conception architecturale du projet de Métro à Panama City.

C'est la raison pour laquelle j'ai orienté mes recherches de stages vers des bureaux d'études techniques d'ouvrage d'art et génie civil. L'entreprise Française Systra, m'a donné l'opportunité d'intégrer une équipe de travail dans le département d'ouvrages d'art, sur le projet d'études préliminaires et détaillées des stations aériennes de la ligne 1 du métro de Panama.

Ce stage m'a permis d'apprendre d'un point de vue théorique, technique et pratique. Réaliser ce stage est la continuité de mon évolution au sein de l'École des Ingénieurs de la Ville de Paris, et correspond à ma double formation d'ingénieur-architecte.

Dans ce rapport technique, je m'efforcerai d'être la plus claire et concise possible. Même si quelques bases en résistance des matériaux sont nécessaires, tous les termes complexes seront expliqués en annexe ou directement dans le corps du rapport. De plus, le but de ce rapport n'est pas de décrire en détail toutes les tâches qui m'ont été affectées mais plutôt de se concentrer sur ma mission principale et d'évoquer les points clés des tâches annexes. Je tenterai d'être le plus critique possible d'un point de vue organisationnel et des choix techniques.

I. Organisme d'accueil

I.1. SYSTRA

Avec de nombreuses filiales en Asie, Amérique, Moyen-Orient et en Afrique, SYSTRA constitue l'un des premiers groupes internationaux d'ingénierie des transports. Ses activités, qui s'exercent sur les principaux marchés internationaux de l'ingénierie, couvrent toutes les compétences du domaine des transports urbain et ferroviaire (www.systra.com).

Le groupe SYSTRA s'organise autour de :

- ▶ **Quatre grandes régions**, qui intègrent les filiales du groupe. Elles constituent chacune un pôle décentralisé à l'écoute de nos clients ;
- ▶ **Une direction de l'ingénierie**, qui comprend les départements management de projet, génie civil et ouvrages d'art, infrastructures de transport, systèmes de transport, matériel roulant et ateliers. Les équipes, multidisciplinaires, sont composées des meilleurs spécialistes du transport urbain et ferroviaire et maîtrisent toutes les interfaces d'un projet ;
- ▶ **Une direction conseil** : SYSTRA Conseil propose une vision intégrée de la mobilité, des modes doux à la grande vitesse, et s'appuie sur une équipe pluridisciplinaire organisée en cinq départements : économie des transports, mobilité et territoires, nouvelles technologies, exploitation et politique de maintenance, le cinquième pôle étant dédié aux prestations de conseil, formation et assistance à maîtrise d'ouvrage ;
- ▶ **Des fonctions support** : direction financière et juridique, direction des ressources humaines, services management et développement durable, communication...

SYSTRA est née de la fusion des filiales d'ingénierie créées, d'une part, par la SNCF en 1957 (SOFRETRAIL, Société d'Etudes et de Réalisations Ferroviaires) et de l'autre, par la RATP en 1961 (SOFRETU, Société d'Etudes et de Réalisations de Transports Urbains).

Conçues l'une et l'autre pour diffuser le savoir-faire de leurs maisons-mères sur les marchés extérieurs et apporter une assistance technique aux réseaux étrangers qui le souhaitent, soit pour la modernisation ou la réhabilitation de lignes existantes, soit pour la création de lignes nouvelles utilisant des technologies de pointe, elles ont rapidement acquis une reconnaissance internationale, grâce notamment à leur double expérience de concepteur et d'exploitant.

C'est la complémentarité de leurs techniques et de leurs ressources humaines, autant que la nécessité pour chacune d'acquérir une dimension internationale suffisante par le volume de leur chiffre d'affaires pour rejoindre la classe des grandes ingénieries, qui a amené les deux sociétés à ce rapprochement, mettant ainsi fin à une concurrence néfaste tout en conservant la spécificité des cultures techniques respectives :

- a. pôle ingénierie des transports urbains,
- b. ingénierie ferroviaire et interurbaine.

Dates clés :

- I. **Mars 1990** : création d'un GIE
- II. **Décembre 1991** : création de la holding FINANCIERE SYSTRA
- III. **Juin 1992** : création de la holding SYSTRA S.A. , société à conseil de surveillance et à directoire, détenue à 72% par la RATP et la SNCF et à 28% par un groupe de banques, dont SOFRETU et SOFRERAIL deviennent filiales.
- IV. **Avril 1995** : la holding SYSTRA S.A. contrôlant les 2 sociétés et leurs filiales respectives aux États-Unis, au Canada, en Angleterre et en Espagne prend le nom de GROUPE SYSTRA.
- V. **Novembre 1995** : fusion juridique de SOFRETU et de SOFRERAIL sous le nom de SYSTRA-SOFRETU-SOFRERAIL.
- VI. **Juin 1997** : SYSTRA-SOFRETU-SOFRERAIL s'appelle désormais SYSTRA

Des projets dans 150 pays et 350 villes depuis 1957

SYSTRA est classée première ingénierie internationale du transport urbain et ferroviaire par le magazine américain de référence Engineering News Record (ENR)

I.1.1. Pôle Génie Civil-Ouvrages d'Art

Le Département Génie Civil et Ouvrage d'art est constitué d'une équipe de 120 personnes au siège (Paris-quartier Saint Lazare 9-ème arrondissement), comprenant des experts en ouvrage d'art, en ouvrage en terre, en ouvrage souterrains et en architecture fonctionnelle.

Les missions du Département Génie Civil et Ouvrage d'art sont les suivantes :

- Identifier les solutions optimales pour les projets : procédés de construction et de maintenance, méthodes de construction. Fournir des ouvrages d'art de la meilleure qualité dans le respect des coûts et des délais de construction, de l'intégration dans l'environnement, des exigences de maintenance et de sécurité.
- Réaliser les études afférentes.
- Sélectionner, former et mettre à disposition du personnel spécialisé pour réaliser les projets.
- Vérifier la qualité des études et des travaux.
- Assister les Maîtres d'ouvrage pour la préparation des dossiers d'appel d'offres et l'évaluation des offres.
- Assister les constructeurs pour les appels d'offres : rechercher et développer des variantes optimales et compétitives.
- Développer et maintenir une collaboration approfondie avec la SNCF et la RATP, ainsi qu'avec le monde de l'ingénierie, afin de connaître les dernières avancées de l'état de l'art à travers le monde puisqu'une des missions de SYSTRA est de réaliser des lignes à grande vitesse à travers le monde.

II. Approche du projet d'étude

II.1. La Ville de Panama

La Ville de Panamá [1] (Panamá en espagnol et Panama City en anglais) est la capitale et la ville la plus peuplée du pays homonyme. Centre politique et administratif du pays, est située à l'entrée du canal dans l'isthme.

Elle connaît un climat équatorial avec une saison humide qui s'étend de mai à décembre, et une saison sèche de janvier à avril. Etant située sur la côte Pacifique du Panamá, les températures annuelles se situent entre 21 °C et 35 °C.

Administrativement, la ville se trouve dans la province de Panamá et dans le district de Panamá, ce dernier étant d'une superficie de 2 011,9 km². La ville est bâtie avec des rues perpendiculaires tel un damier.



Figure 1 : Vue aérienne Ville de Panama
Source : Systra

En 1997, la vieille ville est inscrite au patrimoine mondial de l'UNESCO. Dans les années 2000, la ville de Panamá reste un centre financier majeur.

De 100 habitants en 1519, la ville compte désormais 813 097 habitants d'après le recensement de 2005. La population croît plus vite que les attentes ce qui pose des problèmes comme la surpopulation de certains quartiers, l'approvisionnement en eau courante, des embouteillages routiers et une pollution de l'air.

La population est d'ailleurs mal répartie à cause de la forme de la ville, limitée au sud par l'océan et au nord par des zones forestières protégées.

L'économie du Panamá est axée sur les activités de service et sur le canal. Elle représente environ 55 % du produit intérieur brut du pays. 79 établissements bancaires sont recensés dans la ville. La capitale est le principal centre d'attraction du pays grâce à sa main-d'œuvre plus qualifiée que le reste du pays et ses d'infrastructures plus développées.

Les ruines de la vieille ville incendiée par les pirates est une attraction touristique populaire. Depuis 1997, elles font partie du bien dénommé « site archéologique de Panamá Viejo et district historique de Panamá » inscrit au Patrimoine mondial de l'UNESCO.

II. 1. 1. La ligne 1 du Metro au Panama

La ligne N°1 du métro au Panama de 13.7 Km, est insérée dans un couloir à forte demande pour les transports publics. Elle comprend 11 stations liant Albrook, la gare routière et los Andes, le centre commercial. Le tracé est nord-Sud et débute sur l'avenue Transismique et continue sur Avenida Fernandez de Cordoba à Avenida l'Espagne, de là, vers le début de l'Avenida Justo Arosemena, à travers lequel s'étend jusqu'à un endroit près de la Plaza 5 de Mai et continue vers le domaine d'Albrook Bus Terminal.

Elle est née de la conception d'un projet d'ingénierie, qui relie les ouvrages d'art, le génie civil et l'architecture. Les stations de la ligne (aériennes et souterraines), les installations auxiliaires, ainsi que l'installation d'un système intégré qui comprend du matériel roulant ferroviaire sont l'ensemble d'un défi de transport.

Un tel projet est le résultat d'une étude de faisabilité par nombreux experts de l'ingénierie urbaine. Après avoir examiné plusieurs options pour les régimes de routes, l'optimisation était primordiale, pour cette première phase de métro. La réduction des coûts du projet, et d'accroître la sécurité des travaux est une mission complexe.



Figure 2 et 3 : ligne 1 du métro à Panama City
 Source : <http://www.elmetrodepanama.com/>

La ligne 1 du métro de Panama permet :

- 13 stations, dont 5 aériennes, 5 souterraines et 2 semi-enterrées,
- 2 stations terminaux (1 permanent et 1 temporaire),
- 2 stations de transfert avec d'autres moyens de transport et des interchanges avec des futures lignes,
- Une installation de « patios » et des ateliers à la fin de la ligne dans le domaine d'Albrook, développé dans une zone d'environ 10 hectares. Dans cette même région est prévu de construire l'Operations Control Center (OCC).
- Mode de fonctionnement, fortement automatisée, de préférence sans un système de pilote. La détection et le suivi sera grâce à la technologie, la fréquence des trains sera comprise entre 90s et 75 secondes la plus effective.

II. 2. La complexité d'un projet de transport urbain

Le métro est un réseau de transport de masse par voie ferrée où les passagers peuvent se déplacer efficacement et en toute sécurité à la gare la plus proche de leur destination finale.

Il est un projet né dans le gouvernement du président Ricardo Martinelli. Le but était de rendre une solution au transport public qui est un des principaux problèmes de la nationalité panaméenne.

La Réflexion sur le développement et le respect de la vie, offre un service sûr et fiable pour transmettre aux générations futures avec une meilleure ville. Le métro de Panama est conçu comme: *Un système de transport en commun*

- Capacité de moyen à lourd
- Metro trains conventionnels des roues en acier de type, composée d'un maximum de 6 voitures pour une longueur d'environ 100 mètres
- Estimation de la capacité maximale de transporter jusqu'à 40.000 passagers par heure-sens.
- Ces voitures sont estimés jauge moyenne d'environ 2,7 mètres de large et 18 mètres de long et sa formation par des trains de permettre la libre circulation entre les voitures.
- Un fonctionnement automatisé, de détection et de suivi grâce à la technologie à des intervalles entre les trains aussi bas que 1minute 30s.



Figure 4 et 5 : Station Aérienne « Los Andes » et perspective viaduc dans la ville

Source : <http://www.elmetrodepanama.com/>

Pour permettre la connaissance de l'état d'avancement de l'ouvrage public, la Secretaria del Metro de Panama a mis à disposition un site web : <http://www.elmetrodepanama.com/> . Dans le site web toute l'information relative au métro est présentée par thèmes :



Figure 6: Portail d'accueil site web

Source : <http://www.elmetrodepanama.com/>

La Concertation est fondamentale pour la réussite d'un projet public.



Le rôle qui joue les citoyens dans le métro de Panama est possible grâce aux réunions « participacion ciudadana »

II. 2. 1. Les différents intervenants au long du projet de la première ligne du métro à Panama

- La Maîtrise d’Ouvrage MOA est assurée par : La secretaria du métro à Panama et l’AMO
- Le Maître d’œuvre MOE est représenté par : le groupement constructeurs de l’entreprise Espagnole FCC (Fomento, Construcciones y Contratas) et la Brésilienne Odebrecht.
- Systra : se trouve dans un contrat signé avec le MOE concernant les études de Génie Civil de stations aériennes.
- Sener : Entreprise Espagnole au même rang que Systra, pour garantir les études de Génie Civil des stations souterraines.
 - Groupement E&M pour assurer les trains et la technologie ferroviaire.

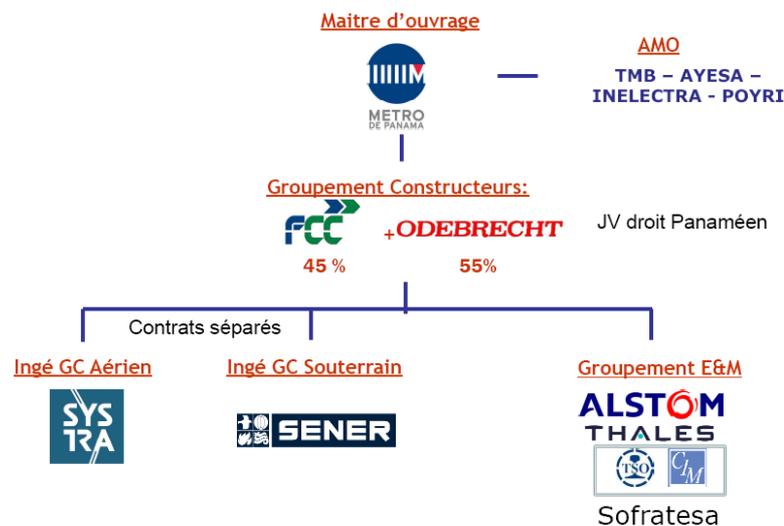


Figure 7: Schéma des intervenants dans le projet
Source : Systra

II. 2. 2. Les Risques et les Opportunités d’un tel projet

Les principaux **risques** identifiés à ce jour sont les suivants :

- Manque d’expérience et de préparation de la SMP → Risque de reprise de design suite à des changements de critère de design.
- Délais courts + AMO pour approbation des plans et documents → Pression sur les délais de remise des documents.
- Projet complexe + Absence d’intégrateur chez CLU → problématique des interfaces GC/EM vs ALSTOM et SENER, problématique Exploitation & Maintenance vs SMP.
- Sous-traitant Etudes détaillées Atelier à trouver, risque d’implication directe auprès des constructeurs locaux contractés par la SMP.
- Langue de travail : Espagnol.

A noter également des **Opportunités** :

- Extension Nord (2,5 km de viaduc et 2 stations),
- activités d’intégration SYSTRA/SENER/ALSTOM,
- interconnexions avec les lignes 2 et 3.

Le Contrat de Systra avec le client (CLU) est basé sur un modèle FIDIC « White book » 2006.

Les clauses spécifiques principales du contrat entre CLU et SYSTRA sont les suivantes :

- Loi : Panama,
- Langue : Espagnol,
- Value Engineering : bénéfice de 10 à 25% des économies de GC suivant les cas considérés,
- Durée de responsabilité : 4 ans après la finalisation des Services,
- Plafond de responsabilité : 50% du montant du Contrat,

- Assurance TRC de la SMP (volet erreur de conception) comprenant 250 KUSD utilisée en premier recours avant exercice de notre police d'assurance professionnelle,
- Arbitrage : CECAP Panama,
- Caution de bonne fin : 5%.

Intitulé	Risque	Commentaires
Environnement Extérieur		
Connaissance Pays		Brochure mission économique Ambassade rassurante
Situation Politico-Economique		Pays stable en plein boom économique depuis 99
Connaissance Client Final		Premier projet avec la SMP et le CLU
Environnement Fiscal		Taxes Panama exclues dont retenue à la source sur IS
Implantation Systra		Aucune
Risque de Change		Non (monnaie compte et paiement Euro)
Analyse technique et contractuelle		
Niveau engagements contractuels		Modèle FIDIC, caution bonne fin 5%, responsabilité 50%
Délais de réalisation		Projet seulement 38 mois pour métro automatique
Complexité Technique		Projet complet, nombreuses interfaces
Domaine d'activité		Cœur de métier SYSTRA
Limites de Prestations		Clair dans le projet de contrat (matrices)
Concurrence et Stratégie		
Adéquation avec stratégie commerciale Systra		Oui
Concurrence et Stratégie		SENER
Intérêt de la référence		Marché brésilien via ODEBRECHT
Analyse économique et financière		
Financement de l'affaire		Part importante financée sur fonds propres
Coût préparation de l'offre		Réalisé sur budget projet A860
Profit Espéré		Très forte pression sur les prix
Ressources		
Ressources nécessaires		Personnel hispanophone à trouver
Disponibilité ressources		Nécessité d'anticiper certaines activités
Part de sous-traitance		Sous-traitante Atelier et charpentes métalliques stations
Fiabilité de sous-traitance		À qualifier
Propriété intellectuelle		
Transfert de savoir-faire stratégique		Risque limité sur viaduc petit U
Maîtrise propriété intellectuelle		Exigences normales
Responsabilité Civile et Professionnelle		
Niveau couverture requis		Assurance prise par Client Final. Franchise 250 KUSD
Nature et étendue garanties requises		RAS
Conformité Réglementation Environnementale		
Connaissance réglementation environnementale		Non mais EIA (Environmental Impact Assessment) hors scope EIA en cours d'analyse
Impact exigences environnementales		EIA en cours d'analyse

RISQUE

	Haut
	Bas
	Moyen

Tableau 1 : Récapitulatif des risques pour Systra dans ce projet
Source : Département Management du projet chez Systra

III. La Mission

Systra a pour mission de réaliser les études techniques et la conception architecturale du tronçon aérien. Il s'agit de calculer la structure des stations pour permettre d'émettre les plans d'armatures pour le chantier en phase d'Exécution et de produire des plans d'architecture pour la construction des Stations Aériennes.

Ma participation chez Systra, sur le projet du Métro à Panama City, a commencé au mois de Février 2011, un mois après avoir gagné l'Appel d'Offre (Phase connue en Amérique comme *Tender*).

A ce stade, notre client (Groupement d'entreprises Odebrecht + FCC) demandait des modifications relatives à la conception du viaduc dans les stations aériennes, dont la structure a dû être complètement reprise pour aboutir à un viaduc indépendant des structures stations à proprement parlé.

La nouvelle demande du client impliquait de :

- produire des nouvelles notes de calculs pour vérifier la faisabilité d'une structure indépendante
- redéfinir les plans des stations
- réfléchir à une nouvelle méthode de construction.

Cette nouvelle phase est préliminaire à la phase d'Exécution, elle est connue comme le *Preliminary Design*.

III.1. Mon rôle

Dans le premier mois, j'ai eu un poste dans l'équipe d'architectes chargés de redéfinir les stations aériennes conformes à la demande du client. Cela m'a permis de connaître la méthode de travail de la cellule architecture dédiée à l'infrastructure du transport des grands projets. J'ai pu identifier les besoins auxquels les architectes doivent donner réponse : les chemins d'évacuation pour la sécurité incendie, l'implantation du bâtiment dans le tissu urbain, le respect de l'environnement et la création d'un espace agréable pour les Panaméens.

Pendant cette période, mon rôle a été de comprendre les besoins techniques des ingénieurs et l'adaptation dans la conception architecturale des stations aériennes. Cette dualité m'a permis d'établir un dialogue entre les architectes et les ingénieurs.

Dans ce cadre j'ai assisté aux réunions avec le Directeur de Projet M. Hervé Cudennec, et la Responsable des Stations, Mme Delphine Challant et d'Architecture des stations M. Jean Cornil. J'ai participé à la rédaction des notes justificatives des solutions techniques ainsi que l'adaptation à la langue espagnole pour respecter les exigences du client.

Dans un deuxième temps, à partir du mois de Mars 2011, le client a validé notre solution proposée pour une structure indépendante entre le viaduc et les stations. A partir de ce moment-là, j'ai intégré le Département Génie Civil Ouvrages d'Art pour assister le Responsable Structure des Stations, à établir le document « Design Basis » qui recueille les paramètres de calculs.

Cela m'a permis une approche des normes américaines : AASHTO [2] (American Association of State Highway and Transportation) et du REP 2004 du Panama. L'importance d'un projet international est l'opportunité de travailler avec différentes langues et différents codes de la construction. En tant que stagiaire qui arrive à un projet nouveau c'était un défi très intéressant pour moi de connaître la façon de rédiger des notes de calculs avec une terminologie américaine.

Une fois le Design Basis fini, une nouvelle tâche m'a été assignée, elle s'agissait de réfléchir à une méthode de construction pour définir un phasage optimisé. Le but était de créer les plans techniques, qui montrent l'évolution de la structure depuis les fondations jusqu'à l'implantation de la toiture.

Pour cette mission, j'étais conseillée par M. Thierry Duclos, expert en structures. Une fois les différentes phases validées, mon but était de vérifier l'état d'avancement des plans avec le projeteur M. Thierry Caron. Les résultats étaient favorables et les plans furent acceptés et validés pour le client.

La suivante tâche commandée était d'évaluer la faisabilité des deux typologies des escaliers en station. La problématique concernait le poids des escaliers sur les bras des chevêtres, et par conséquent le dimensionnement des piles et les pieux de fondation. Le choix de l'escalier le plus léger et le plus sécuritaire était notre but principal. Dans ce cadre, j'ai pu connaître les besoins esthétiques des architectes et les besoins techniques des ingénieurs.

La justification de la substitution des escaliers préfabriqués en béton armé par les escaliers métalliques était ma mission. J'ai rédigé une note descriptive de chaque solution pour présenter les deux typologies et pour faciliter le choix à notre client. Le résultat obtenu était favorable à nos attentes, le client a validé l'option d'installation des escaliers métalliques au lieu des escaliers préfabriqués en béton.

Une fois les différents éléments architecturaux des stations validés, le but principal de mon équipe d'Ouvrages d'Art, était de créer les notes de calculs pour envoyer au client. Ma mission était de dimensionner les différents éléments structuraux de la plateforme de quai des stations aériennes.

J'ai fait une estimation des charges appliquées concernant le poids propre (DL = Death Loads), les surcharges permanents (SIDL = Super imposed Death Loads) et les charges d'exploitation (LL = Live Loads).

Une fois le bilan de charges effectué et validé par le Responsable de Structure, Mlle Prisca Flattot, j'ai commencé le dimensionnement des poutres d'extrémité du quai et de la dalle supérieure.

Ce calcul, doit respecter la norme AASHTO, et doit être vérifié à l'Etat Limite Ultime (ELU) et Etat Limite de Service (ELS). Pour mener à bien ma mission, j'avais à ma disposition des fiches excel, et des logiciels de calcul aux ELS, tel qu'Oasys et Sofistik.

III. 1. 1. Les intérêts et les enjeux du stage

Le Département Génie Civil et Ouvrages d'Art, me semblait être un lieu adéquat pour continuer ma formation dans le domaine de la construction et pouvoir réaliser mon Travail de Fin d'Etudes. La possibilité d'occuper un poste en lien avec l'interface Architecture-Ingénierie était très motivante pour moi.

Grâce à mon parcours international dans les différentes écoles européennes, j'ai développé un esprit d'initiative pour les affaires et les projets internationaux. Les problématiques rencontrées pendant la Phase d'Etudes d'un tel projet en Amérique, et la façon de présenter des solutions, m'ont permis d'élargir mes connaissances du monde de la construction pour comprendre la globalité d'un projet à l'international. Le fait d'avoir à travailler sur une nouvelle phase d'étude ainsi qu'avec une nouvelle norme de calcul, différente de l'Eurocode était d'un grand intérêt pour moi.

J'aimerais mettre en valeur, le fait que d'avoir apporté au projet mes connaissances techniques et ma langue maternelle. En tant qu'élève en dernière année d'études, j'ai pu conclure mes études dans une grande entreprise française qui m'a donnée l'opportunité de participer au bon déroulement d'un projet international pour la Ville de Panama.

IV. Etude Technique des stations aériennes

Je me place dans le Pôle Génie Civil-Ouvrages d'Art où j'arrive suite à la signature du contrat pour les études de Génie Civil des stations aériennes (début février 2011).

Notre Client (groupement constructeurs : FCC + Odebrecht) a demandé à Systra de réfléchir à un autre concept structural différent à celui développé dans la phase d'Appel d'offre.

Le nouveau concept proposait des stations « autour » du viaduc en privilégiant l'indépendance entre les deux. Cette idée est née pour des raisons de planning de construction. Les travaux de voie d'Alstom étant planifiés de manière linéaire, le Client veut éviter tout risque de ralentissement du groupement E&M.

Contrainte à résoudre : mettre à disposition au plus tôt l'ensemble du linéaire pour la pose de voie, sans interruption au niveau des stations.

IV. 1. Solutions envisagées

Pour répondre aux besoins et aux exigences du client, les solutions techniques ont évoluées dès son concept initial de l'appel d'offre. L'intérêt principal est d'arriver à un design satisfaisant et capable de répondre au maximum aux exigences du client.

IV. 1. 1. Solution 1 : le viaduc ne traverse pas la station

Lors de la phase de l'offre, le concept de station qui avait été retenu consistait en un bâtiment indépendant, que le viaduc ne traversait pas. La plateforme supportant les voies était transversalement supportée par des appareils d'appui sur les poteaux centraux et encastree sur les poteaux latéraux afin de limiter son déplacement transversal sous séisme.

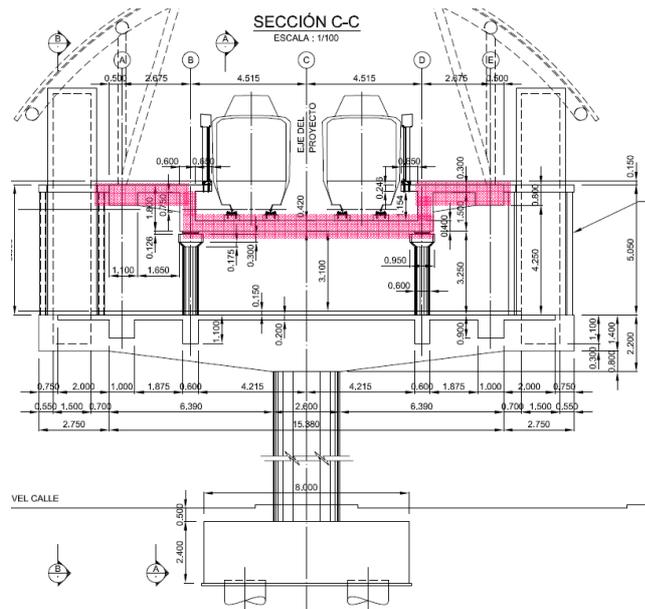


Figure 8: Coupe transversale de la Station -Solution Appel d'Offre

Cette solution permettait à la fois:

- d'assurer une continuité entre le nez de quai et la rame du métro
- de pouvoir installer facilement des portes-palières
- de rendre quasi-indépendante la construction de ce bâtiment station de la construction du viaduc.

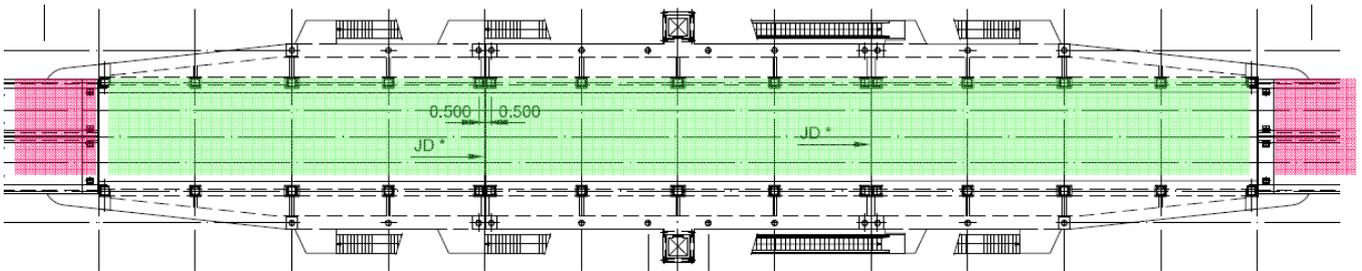


Figure 9: Vue en Plan de la Solution Appel d'Offre

D'un autre côté, ce concept avait pour conséquence de présenter une rupture longitudinale dans la continuité du viaduc.

Etat : Solution de l'offre rejetée par le client une fois le contrat signé (janvier 2011)

Pour répondre à la demande du client, ci-après d'autres solutions ont été envisagées, afin d'assurer la continuité du viaduc le long du tracé aérien.

Tout d'abord, il faut rappeler que ce projet de métro au Panama présente des spécificités sismiques particulières, notamment un niveau élevé de séisme, avec une accélération de 0.21g. Une des clauses de l'offre requiert un redémarrage de l'exploitation de la ligne immédiatement après un tel séisme, ce qui oblige à dimensionner les structures en conséquence. La limitation des déplacements devient alors une contrainte dimensionnante pour ce projet.

III. 1. 2. Solution 2 : le viaduc est séparé de la station et introduit dans la station sur des supports indépendants

Dans ce cas, la station est totalement construite autour du viaduc, de manière indépendante. Le travelage typique à appliquer dans les zones de station serait de 25 m de portée pour les viaducs. Les poteaux additionnelles, supportant la structure de la station seraient insérés entre les piles de viaduc et distants de 12.50m.

D'un point de vue séquence de construction, les poteaux et le chevêtre supportant le viaduc seraient dans un premier temps réalisés et les superstructures posées sur leurs appuis. La structure des stations est réalisée dans un deuxième temps.

Le nivellement devra rester constant sur un linéaire suffisamment important pour y implanter la station. La répartition des travées du viaduc devra aussi offrir un pas constant (de l'ordre de 25m) dans cette zone.

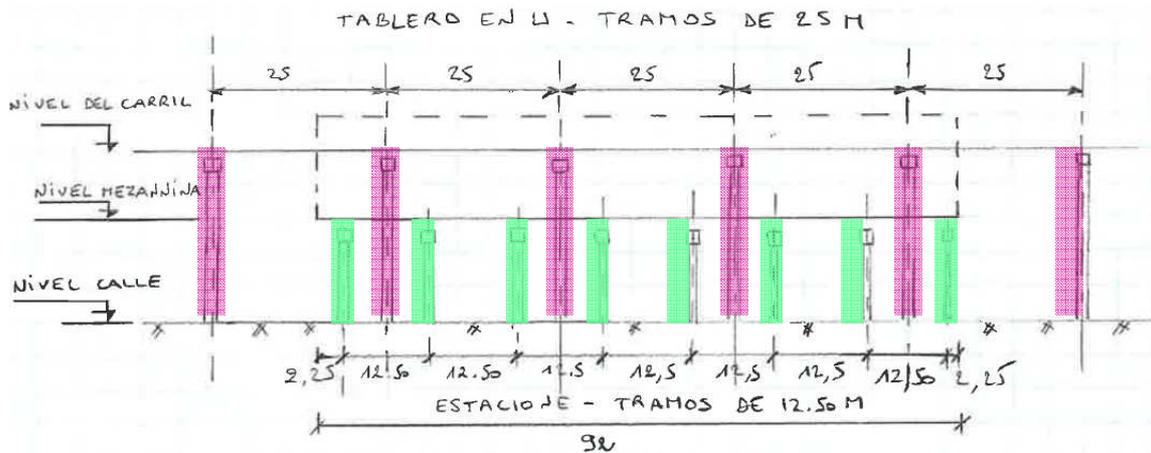


Figure 10 : Schéma de la disposition des piles Solution 2

Cette solution présente l'avantage d'assurer les travaux de réalisation de la voie d'Alstom en construisant en premier lieu les viaducs.

Cette solution présente les spécificités suivantes :

1. Chaque élément de station peut répondre à sa manière, les masses ne sont pas réparties de façon homogène. Le phasage des mouvements entre les éléments n'est pas certain et les déplacements peuvent se cumuler. Ainsi, dans ce principe de structure séparée, les déplacements relatifs entre le viaduc et la station peuvent donc conduire à introduire des lacunes ou des espaces entre structure pour éviter les chocs. Ces lacunes ont différentes conséquences suivant le type de conception retenues,
2. Les déplacements transversaux des tabliers seraient de l'ordre de 10 à 12 cm (ELU extrême),
3. Cela triple le nombre de poteaux sur le terreplein central. Les fondations de ces poteaux combleront complètement la zone centrale et le positionnement des water tank prévus aujourd'hui entre les semelles de fondations des poteaux des stations devra être modifié pour tenir compte de cette nouvelle densité de fondations. Il est également probable qu'il y ait des conflits au niveau des semelles de fondations,
4. Les déplacements longitudinaux et transversaux des stations seraient aussi de l'ordre de 10 cm,
5. Cette solution nécessite d'augmenter le niveau du rail, du fait de l'obstruction que présente le chevêtre du viaduc au niveau mezzanine.

Deux conceptions sont donc possibles pour cette solution. Nous avons la possibilité de positionner le viaduc en forme de U sous le nez de quai (métro de la Mecque en Arabie Saoudite) ou placer le viaduc au même niveau du quai. (ligne n°1 de métro à Mumbai (Inde)).

Compte tenu des déplacements listés ci-dessus, et de la lacune sécuritaire de 50mm maxi entre la caisse du train et le nez de quai, cette conception n'est pas satisfaisante car lors d'un séisme les caisses des trains vont entrer en collision avec les quais causant des dommages importants.

Cette solution entraîne l'abandon définitif de la possibilité d'installer des portes palières automatiques car elles ne peuvent pas encaisser les rotations et les flèches imposées par le viaduc sous les charges classiques. Il faudrait alors concevoir un viaduc spécial continu pour palier à cette contrainte. D'autre part, la solution n'est pas satisfaisante non plus car lors d'un séisme, le déplacement de la semelle

supérieure du viaduc va engendrer une lacune importante entre le quai et le tablier. Ce gap constitue un risque potentiel important d'accident grave pour les voyageurs.

La limitation de cette lacune entre des structures indépendantes pendant le séisme ne peut se faire que par une forte liaison des structures avec une augmentation significative des quantités.

Ce changement majeur de concept doit être évalué dans toute son ampleur, en intégrant des modèles complets stations et viaducs, et une reprise des concepts en intégrant une gestion de ces mouvements différentiels. Une analyse de risque vis-à-vis du système serait à intégrer pour prendre en compte d'autres paramètres éventuels.

Etat : Solution rejetée fin février 2011

III. 1. 3. Solution 3 : structure portante du viaduc et de la station commune

Dans cette solution, les appuis sont communs à la station et au viaduc et cela permet de supporter les déplacements différentiels entre les 2 structures. Le viaduc est traversant. Le phasage de construction permet de mettre à disposition le viaduc avant la fin de la construction de la station pour le groupement E&M et l'installation de voie.

La distance entre poteaux supportant le viaduc en U serait de 25 m. Un poteau intermédiaire sera nécessaire pour supporter la mezzanine. Le nivellement devra rester constant sur un linéaire suffisamment important pour y implanter la station. La répartition des travées du viaduc devra aussi offrir un pas constant (de l'ordre de 25m) dans cette zone.

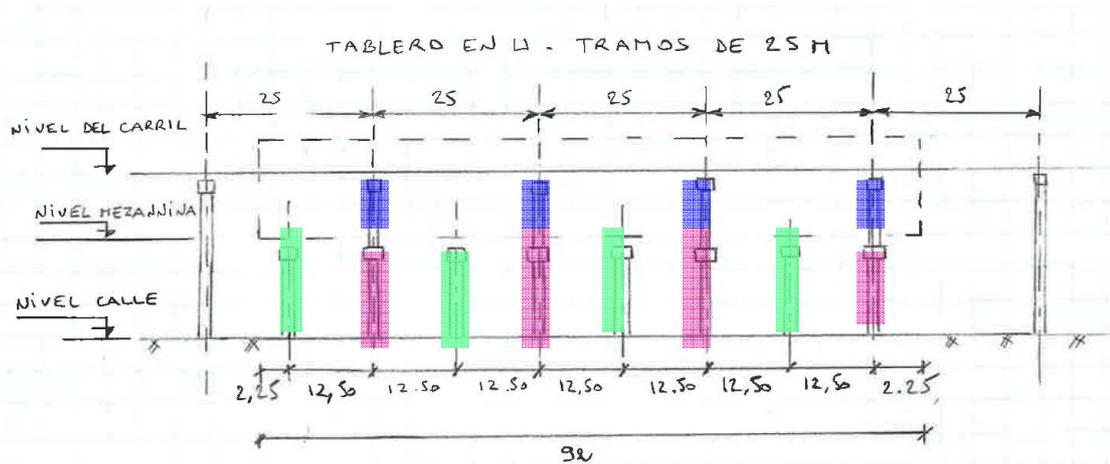


Figure 11 : Schéma de la disposition des piles Solution 3

La méthode de construction sera la suivante :

1. Réalisation des pieux, de la semelle et du poteau central, jusqu'au niveau mezzanine
2. Réalisation d'une amorce de chevêtre avec des aciers en attente, (ce chevêtre constituera le support du niveau mezzanine)
3. Réalisation d'un poteau entre le niveau mezzanine et le chevêtre sous le viaduc,
4. Pose du tablier en double U, et mise à disposition pour l'installation de la voie
5. Dans un second temps sera réalisé le prolongement du chevêtre au niveau mezzanine et la réalisation des quais.

Etat : Solution retenue fin février 2011, avec une évolution du concept (voir point III.3)

III. 2. Etude comparatif des solutions présentées

Pour mieux comprendre les opportunités de chaque solution, le suivant tableau montre les huit points relatifs à la solution 2 :

1. Simplifie l'étude de la station → AVANTAGE
a) le chevêtre d'appui de la mezzanine sera sans doute plus élance car moins de charge lui seront appliquées.
b) le viaduc conserve son comportement courant même en station donc moins de difficultés au niveau des mouvements différentiels
c) la disposition des joints de dilatation est plus facile
2. Augmentation du délai de design → INCONVENIENT
3. Contraintes de gabarits dues aux chevêtres des viaducs : rehausse du niveau de la ligne, impact sur tous les éléments d'accès au niveau supérieur → INCONVENIENT
a) Complique l'analyse d'interaction sous séisme (amortisseurs)
b) Battement transversal entre viaduc et quai de la station
c) Risques de fonctionnement groupés entre semelles du fait de leur proximité. Eventuels conflits
d) les supports caténaires doivent être conservés sur les viaducs en station pour assurer le fonctionnement même en cas de séisme.
e) fonctionnement de l'étanchéité longitudinale quai vers viaduc
f) espace de réservation important entre la mezzanine et les piles du viaduc pour réserver les mouvements sismiques et les déformations imposées de la structure.
4. Construction
a) Réalisation du viaduc indépendamment de la station
b) Interception des réseaux concessionnaires
c) plus d'excavations
d) toute la station est plus ou moins réalisée en place
5. Architecture
a) Moins de poteaux importants au niveau de la mezzanine
b) Piles très proches les unes des autres et nombreuses. Possible différence de forme
c) chevêtres des viaducs dans le volume de la mezzanine
d) contraintes importantes sur les réseaux et gaines techniques du fait de la présence des chevêtres du viaduc
6. Environnement
a) occupation du sol du fait des réservoirs à repositionner
7. Exploitation
a) Impossibilité d'installer des portes automatiques
b) coût supplémentaire de maintenance avec l'augmentation du linéaire de joints
c) Flèche du viaduc en charge : désaffleurement des niveaux entre quai et plateforme.
8. Risques
a) du fait des fonctionnements séparés du viaduc et de la station augmentation des risques au niveau de l'exploitation de la ligne sous séisme
b) fonctionnement des fondations

Tableau 2 : Récapitulatif de la Solution 2

Avantages et inconvénients de la solution 3 :

Item	Avantages	Inconvénients
Design	- Simplifie l'étude de la station	-augmentation du délai de design
	- plus de problèmes d'interaction plus facile à maîtriser	-Contraintes de gabarits dues aux chevêtres des viaducs : réhausse du niveau de la ligne, impact sur tous les éléments d'accès au niveau supérieur.
	- le chevêtre d'appui de la mezzanine sera sans doute plus élance car moins de charge lui seront appliquées.	-Intégrer les amorces de réalisation des chevêtres des mezzanines et renforcer les fondations sur les zones susceptibles d'accueillir les stations.
	- quasiment autant d'appui que dans la solution du tender si on se cale sur des longueurs courantes de 30m	-battement transversal entre viaduc et quai de la station largement diminué
		-possible augmentation des quantités de fondation. - fonctionnement de l'étanchéité longitudinale quai vers viaduc
Construction	-Réalisation du viaduc indépendamment de la station	- moins de risques d'Interception des réseaux concessionnaires
	-autant d'excavations que dans le tender	- impossibilité de préfabriquer les chevêtres du niveau mezzanine - étaielement de construction nécessaire et impact sur la circulation
		- nombreux manchons à prévoir sur les reprises pour réaliser les stations
Architecture	Moins de poteaux au niveau du médian, proche du tender.	-chevêtres des viaducs dans le volume de la mezzanine
		-phasages plus compliqués
		- pour l'exploitation automatique si le viaduc est sous le quai il est nécessaire de définir un coffrage spécifique du viaduc.
		- contraintes importantes sur les réseaux et gaines techniques du fait de la présence des chevêtres du viaduc

Tableau 3 : Récapitulatif de la Solution 3**III. 2. 1. Indications**

Une fois les considérations faites dans les paragraphes ci avant, il est possible de tirer les conclusions suivantes:

- la solution de construction viaduc séparé est a priori faisable mais elle n'apporte pas de vrai avantage en terme de gestion de retard sur la définition et donc sur les design et construction des stations,
- les surcoûts en termes de structures du viaduc (hauteur des piles) + 20% de béton par rapport à la solution tender,
- les délais en termes de design ont un impact sur le planning général.

III. 3. Conséquences sur l'architecture des stations aériennes

La conception architecturale qui avait été traitée jusqu'au changement du concept entre la station-viaduc de ce projet était structurée par quatre axes longitudinaux. Le système de colonnes au long des axes permettait la distribution de l'espace intérieur des stations aériennes. La séparation entre les deux axes centraux laissait un d'espace suffisant pour permettre le fonctionnement des locaux techniques et se déplacer dans les espaces publics.

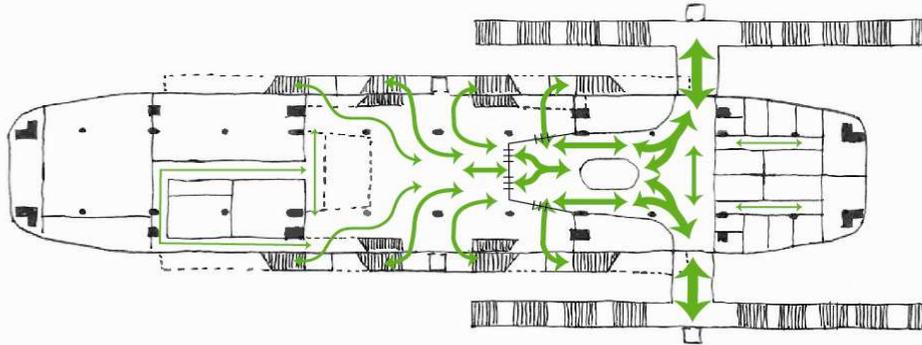


Figure 12 : Schéma vue en plan de la mezzanine avec la configuration actuelle

La mise en œuvre d'une structure indépendante pour le viaduc exige d'ajouter une rangée de piles supplémentaires situées dans l'axe central de la station. Cela implique la perturbation du système de circulation initial dans lequel les flux importants sont effectués dans le centre de la station.

Les principales conséquences de cette intervention sont les suivants:

1. La création des obstacles qui perturbent les flux dans le domaine public.
2. Perturbation du local de ventes des tickets, qui est complètement soumis à une colonne.
3. Altération de certains locaux d'exploitation de la ligne du métro.
4. Obstruction complète de la circulation dans les locaux techniques.

Pour compenser l'impact créé par l'implantation des piles était nécessaire d'agrandir la station. La largeur nécessaire pour rediriger les circulations et de récupérer les pertes dans les locaux techniques est de 96m.

Le schéma suivant illustre l'ensemble de ces points.

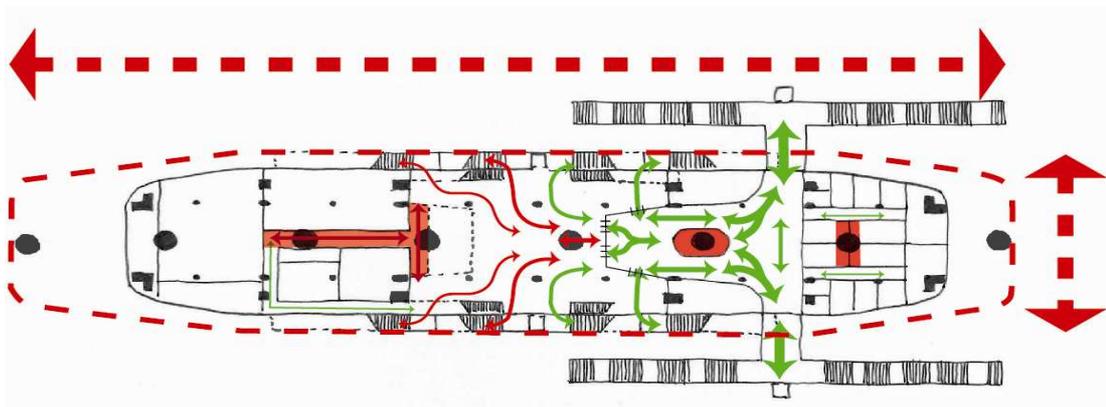


Figure 13 : Aperçu de la mezzanine avec l'inclusion de colonnes distinctes pour le viaduc.

L'insertion des chevêtres au-dessous des quais réduit la hauteur disponible entre la mezzanine et les plates-formes. Cela interdit la libre circulation des machines à installer dans les domaines techniques de la zone centrale de la station.

Pour compenser cette intervention, le niveau de la plateforme devrait être porté de manière à permettre un minimum de 3,5 m de hauteur sur la mezzanine. La conséquence la plus importante est le changement du niveau du rail (augmentation).

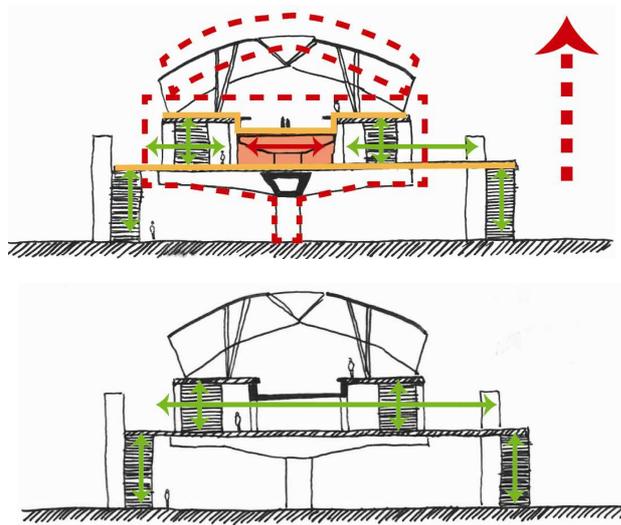


Figure 14 : Schéma de la coupe transversale de la station

Comme on le voit dans les schémas ci-dessous, la question de la hauteur est se pose plus vraiment dans les locaux techniques que dans les espaces publics, mais cela implique une augmentation du niveau de l'ensemble.

En outre, l'implantation des colonnes si grandes et si proches l'une à l'autre réduit l'espace disponible dans le sous-sol entre la fondation pour réaliser des réservoirs d'eau ou d'autres locaux de vivre en dehors de la station. Ces locaux devraient être déplacées et situés sur un terrain adjacent à la station.

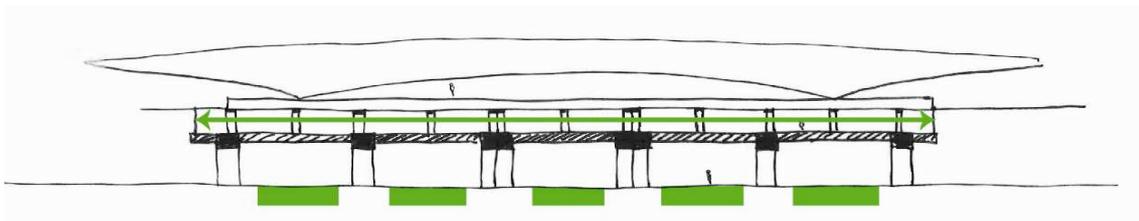


Figure 15: Schéma de la coupe longitudinale de la station avec la configuration initiale

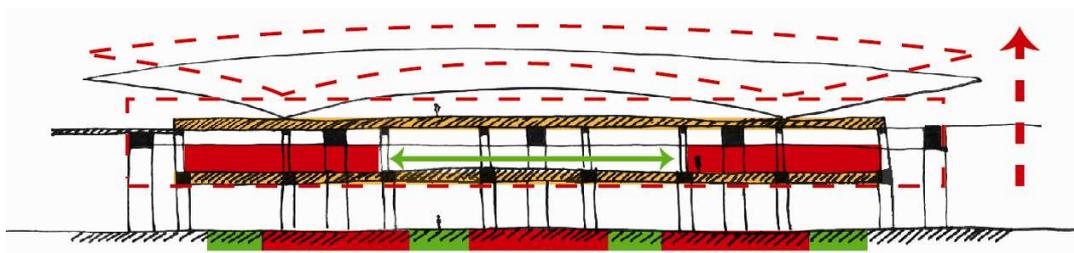


Figure 16: Schéma en coupe longitudinale de la station avec l'inclusion de colonnes indépendantes du viaduc.

III. 4 Structure indépendante station-viaduc

Notre client (FCC + ODEBRECHT) donne priorité à une solution qui garantit le temps nécessaire à la construction du viaduc de façon continue. Pour répondre à sa demande nous avons examiné deux solutions possibles. Ces deux options permettent de construire le plus rapidement possible les piles et les chevêtres au niveau du viaduc, et plus tard de compléter les structures de la station indépendamment des autres activités de la ligne (mise en place des voies, et caténaires, etc).

Les deux solutions sont:

- Un viaduc séparé de la station et supporté par des piles indépendantes
- Une structure porteuse du viaduc et de station partagée

En fait les deux solutions induisent une augmentation du niveau du rail en raison d'une augmentation des quantités par rapport à la solution de base due aux changements de fonctionnement de la structure:

- **1ère solution:** augmenter la portée des supports de la dalle de la mezzanine de 16 à 30 mètres et utiliser du béton précontraint pour la dalle structurelle en béton, ce qui implique une augmentation du niveau de la mezzanine de 1, 25 m. Ce qui implique une augmentation du niveau du rail de 1.25 m.
- **2ème solution:** Le niveau mezzanine augmente d'environ 15cm, car le poids de la dalle préfabriquée, est plus élevée que la solution initiale et induit une augmentation d'épaisseur du chevêtre.

Pour continuer, je vais présenter la justification du dimensionnement structurel, et les impacts en termes de géométrie, quantités, ainsi que les inconvénients des deux solutions constructives proposées.

III. 4. 1. Réponses techniques

En premier lieu, le cahier des charges de l'appel d'offre donne des particularités sismiques spécifiques, avec un haut niveau de séisme et une accélération de 0.21g en « expected earthquake » et de 0.33g en « Maximum considered earthquake (AASHTO MCEER) [3].

Une des attentes du MOA est la mise en activité de la ligne une fois après le séisme a eu lieu. Cette attente, requiert que les structures soient dimensionnées en conséquence.

Solution A : viaduc séparé de la station et supporté par piles indépendantes

Dans ce cas, la station est entièrement construite autour du viaduc, de façon indépendante. La portée du viaduc est limitée à 30 m. Le tablier de la mezzanine est limité à 30 m de portée du viaduc afin de maintenir la longueur des viaducs typiques. Les poteaux pour garantir un soutien supplémentaire de la structure de la station sont insérés à 15m entre les piles du viaduc. La mezzanine et les quais sont composés de poutres en "I" préfabriqués et précontraintes. Ces poutres sont continues sur les appuis et encastres aux poteaux. En service, pour restreindre le mouvement et la dilatation thermique, les piles d'extrémités du niveau quai et mezzanine sont sur des appuis glissants. Dans toutes les typologies les viaducs reposent sur néoprènes.

Pour la méthode de construction, les poteaux et le chevêtre du viaduc sont réalisés puis la structure des stations est réalisée dans un deuxième temps.

Pour le séisme transversal nous avons besoin de limiter les déplacements relatifs entre les viaducs et le quai, pour cette raison trois solutions ont été étudiées :

1. Bielles avec deux rotules entre le viaduc et le quai: les bielles permettent le déplacement relatif entre le viaduc et les quais dans le sens longitudinal et aussi d'établir une connexion totale dans le sens transversal. Les butées sur les viaducs sont conservées.
2. Amortisseurs entre les quais et le viaduc: les amortisseurs permettent les déplacements relatifs entre le viaduc et le quai dans le sens longitudinal et d'établir une connexion avec un amortissement dans le sens transversal. Les butées sur les viaducs sont conservées.
3. Néoprènes verticaux entre le viaduc et les quais : les néoprènes permettent les déplacements relatifs entre le viaduc et les quais dans le sens longitudinal et transversal en limitant les efforts de choc dans le sens transversal. Les butées sur les viaducs sont conservées.

Cette solution a les caractéristiques suivantes :

- a. Chaque élément de la station peut répondre à sa manière, les masses ne sont pas réparties de façon uniforme.
- b. Le déphasage des mouvements entre les éléments n'est pas sûr et les déplacements peuvent être cumulatifs. Par conséquent, dans ce principe de structure séparée, les mouvements relatifs au viaduc et la station peuvent introduire lacunes ou espaces vides pour éviter les chocs. Ces lacunes ont différents effets dépendant du type et du design retenu.
- c. Cette solution nécessite d'augmenter le niveau du rail de 2,5 m en raison de l'obstruction présentée par le chevêtre du viaduc au niveau de la mezzanine

La méthode de construction serait la suivante :

- Réalisation des pieux, des semelles et de la pile central jusqu'à niveau de la mezzanine
- Réalisation d'une partie du chevêtre avec les aciers en attente (ce chevêtre constitue le support au niveau de la mezzanine)
- Réalisation d'une pile centrale entre le niveau de la mezzanine et le chevêtre sous le viaduc
- L'installation des U et son adéquation pour la mise en place des voies.

Dans un deuxième temps, serait réalisé le prolongement des bras du chevêtre au niveau de la mezzanine et la réalisation des quais.

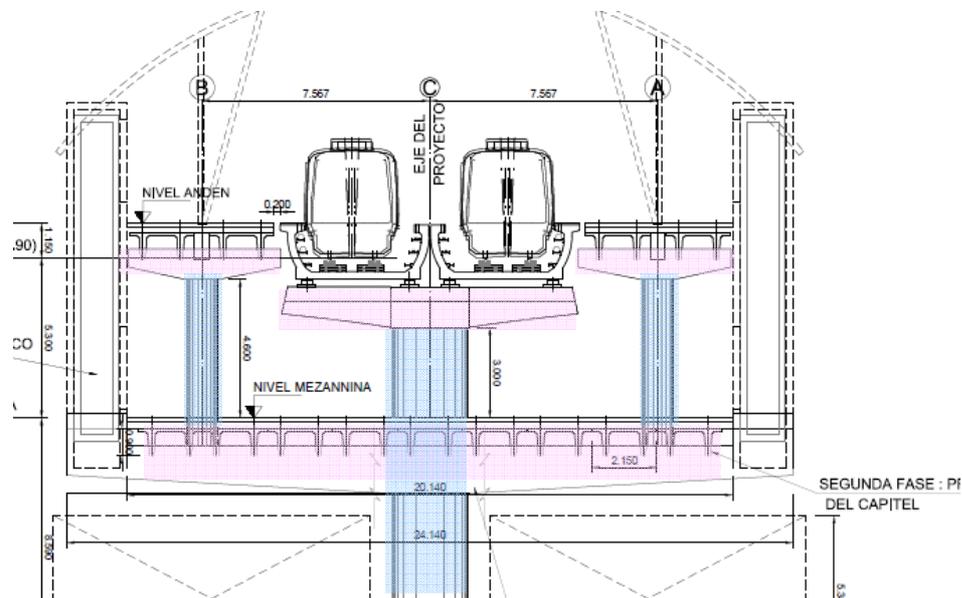


Figure 21: Schéma de la structure de la Solution B

Solution Choisie :

Nota : La solution choisie est une solution intermédiaire que permet de construire le viaduc de façon indépendante. Structuellement le viaduc et la station partagent des piles chaque 30 m (au long de la station).

Le modèle a été dimensionné au séisme transversal car il est le plus contraignant.

III. 4. 2. Solution Définitive

La solution définitive acceptée par le client pour la construction des stations aériennes, est une typologie de station qui respecte l'indépendance entre la structure du viaduc et de la station. Cette typologie présente des piles de viaduc chaque 30 m et des piles de station chaque 15m.

Une particularité de la structure est la pile du viaduc (cf schéma) qui supporte aussi la mezzanine, de tel façon que le premier niveau présente des chevêtres d'appui chaque 15m.

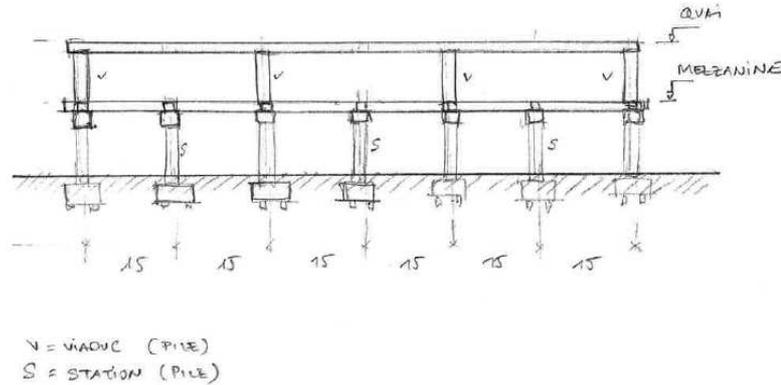


Figure 22 : Schéma de disposition des Piles de la Solution Définitive

La solution définitive permet d'Optimiser les quantités de la Phase Tender (Appel d'offre), et le Preliminary Design. Cela s'explique avec la réduction d'épaisseur du chevêtre du niveau du concours, et par conséquent une diminution d'hauteur de 8.40m à 8.32m.

La nouvelle configuration de la station aérienne présente :

- Un gabarit routier de 5.50 m
- Les diamètres des piles de 2.8m (inf) et 2.10m (sup)
- Le chevêtre de la mezzanine a une épaisseur centrale de 1.5m, et le chevêtre du viaduc de 1.35m.
- La longueur des bras des chevêtres de la mezzanine est de 10.67 m et des bras des chevêtres du viaduc est de 6.28m.

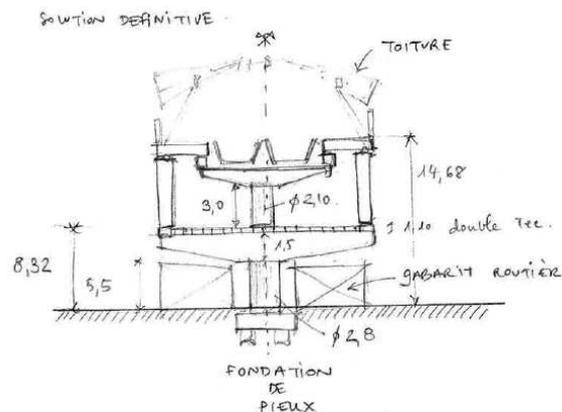


Figure 23: Schéma de la Structure de la Solution Définitive

Des nouvelles solutions techniques se sont mises en place, la poutre de la plateforme de quai avec 30 m de portée s’appuie sur de néoprènes. La connexion entre le quai de la station et le viaduc est libre. La suppression des amortisseurs au –dessous du viaduc permet le libre mouvement des composants de la structure.

La complexité était de connaître l’état des amortisseurs du fait qu’ils sont cachés par le faux plafond, pour cette raison cette idée a été rejetée.

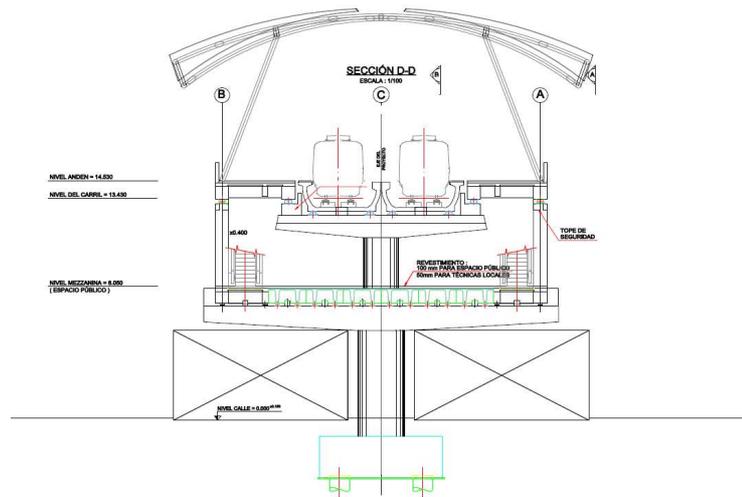


Figure 24 : Coupe transversale de la Solution Définitive

La mezzanine de la station est crée par des poutres double Tee préfabriquées et précontraintes, de 1.10m. Ces poutres sont continues sur les appuis et encastrées dans le chevêtre.

Les phases de construction permettent de libérer le viaduc pour ALSTOM et l’installation des voies avant de finaliser la station. Le viaduc traverse la station de façon individuelle et indépendante à l’état d’avancement des stations.

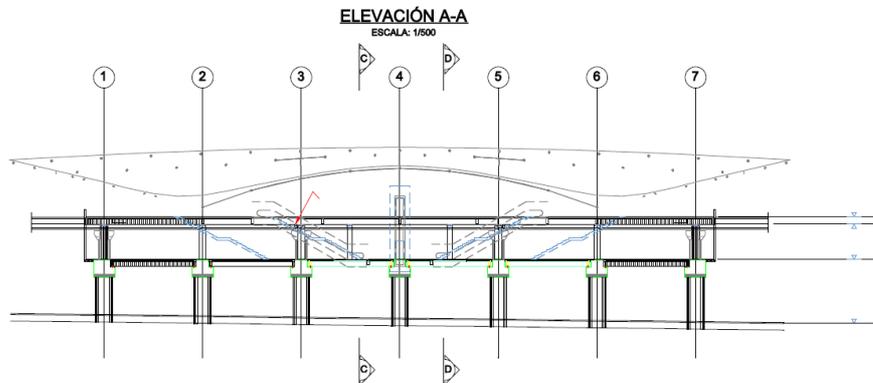


Figure 25 : Coupe longitudinale de la Solution Définitive

III. 5 Etude détaillée du quai

Le quai des stations aériennes, présente des appuis chaque 15m (extrême extérieur) et des appuis à 30m (extrême intérieur).

La stabilité est assurée par la présence de diaphragmes transversaux. La plateforme du quai a les dimensions suivantes : 5 m de largeur pour 96m de longueur et 0,2 m d'épaisseur de la dalle.

La conception des structures et des contrôles sont effectués en conformité avec les documents suivants:

- AASHTO LRFD Bridge Design specifications (4th edition, 2007)
- Design Basis Report for station
- REP 2004

La démarche à suivre pour concevoir un ouvrage d'art est la suivante :

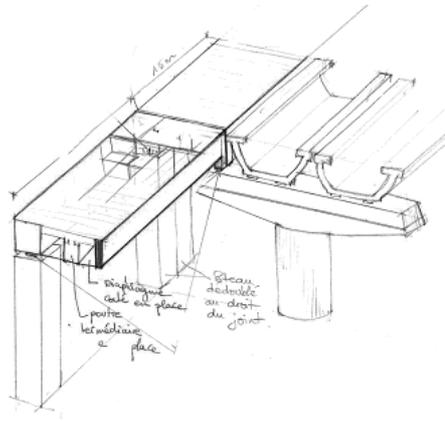


Figure 26: Perspective des éléments structurels de la plateforme des stations aériennes

III. 5. 1. Géométrie de la poutre de 15 m de portée

La poutre en périphérie du quai, a une portée de 15 mètres. Elle est appuyée sur néoprènes.

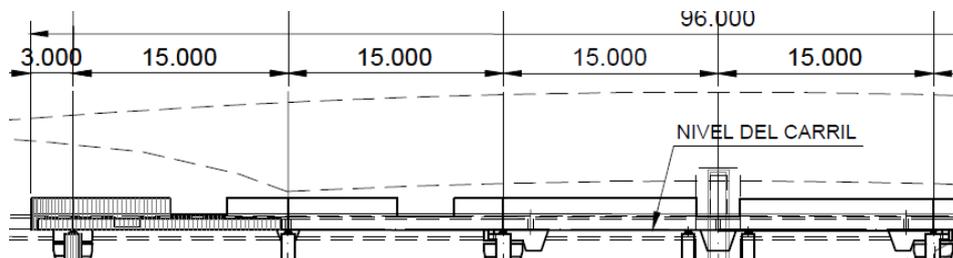


Figure 27: Schéma structural de la poutre de 15m de portée

Charges appliquées

Peso Propio (DL): 25 KN/m³

Sobrecargas muertas (SIDL) : 7.25 KN/m²

Cargas vivas (LL): 6 KN/m²

Charges permanentes (Death loads DL)

Para calcular el peso propio de la estructura y otras cargas muertas, se utilizan las siguientes densidades de materiales:

concreto reforzado, agregados de peso normal = 25 KN/m^3

Peso propio de la losa = $0.20\text{m} \times 25 \text{ KN/m}^3 = 5 \text{ KN/m}^2 \times 2.5$ (influencia) = 12.5 KN/m

Peso propio de la viga = $0.8\text{m} \times 0.8\text{m} \times 25 \text{ KN/m}^3 = 16 \text{ KN/m}$

Peso propio de la nervatura = $0.35\text{m} \times 0.6\text{m} \times 25 \text{ KN/m}^3 = 5.25 \text{ KN/m} / 2$ lados = 2.62 KN/m

Total de cargas permanentes = 31.12 KN/m

Surcharges permanents (Superimposed dead loads SIDL)

Las sobrecargas muertas, son:

$6.25 \text{ KN/m}^2 \times 2.5 \text{ m}$ (influencia) = 15.625 KN/m

Charges d'exploitation (Live Loads LL)

Consideramos $6 \text{ KN/m}^2 \times 2.5\text{m}$ (influencia) = 15 KN/m

Vérification à l'Etat Limite Ultime (ELU)

La combinaison utilisée est la suivante:

$$P_u = 1.25 G + 1.5 SIDL + 1.75 LL$$

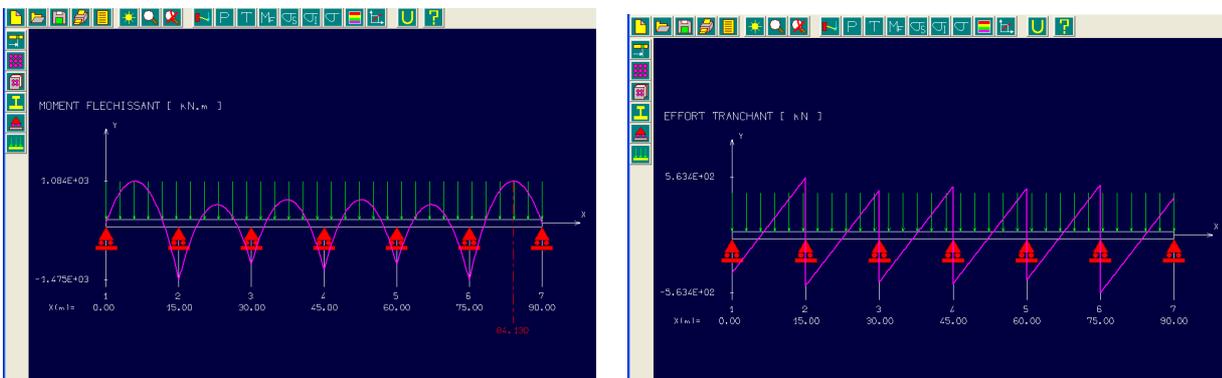
D'où :

$$P_u = 1.25 (32 \text{ KN/m}) + 1.5 (15.625 \text{ KN/m}) + 1.75 (15 \text{ KN/m})$$

$$P_u = \underline{89.6875 \text{ KN/m}}$$

Sollicitations

Les sollicitations sont obtenues grâce au logiciel RDM6 :



- Moment flechissant = 2, 15MN.m
- Momento flechissant = 1.6 MN.m
- Effort tranchant = 820 KN, soit $V_u = 0.82 \text{ MN}$

Vérification du moment fléchissant en appui x = 15m

La vérification aux Etats Limites Ultimes est faite par une feuille de calcul excel qui respecte le la norme américaine AASHTO :

CODE USED : AASHTO LRFD 2007 edition - Bonded tendons			
INPUT			
MATERIAL PROPERTIES			
Symbol	Value	Unit	Description
fpu	1860	MPa	specified tensile strength of prestressing steel
fpy	1674	MPa	yield strength of prestressing steel
fs	420	MPa	stress in the mild steel tension reinforcement at nominal flexural resistance
fs	420	MPa	stress in the mild steel compression reinforcement at nominal flexural resistance
fc	40	MPa	specified compressive strength of concrete for use in design
GEOMETRICAL PROPERTIES			
Aps	0	m ²	area of prestressing steel
As	0,013	m ²	area of mild steel tension reinforcement
A's	0,00655	m ²	area of compression reinforcement
b	0,8	m	width of compression flange
bw	0	m	total width of 2 webs
hf	0,8	m	depth of compression flange
dp	0,10	m	distance from extreme compression fiber to the centroid of the prestressing tendons
ds	0,7057	m	distance from extreme compression fiber to the centroid of the nonprestressed tensile reinforcement
d's	0,0778	m	distance from extreme compression fiber to the centroid of compression reinforcement
Remark			You are considering a RECTANGULAR section
φ	0,9	no dim	resistance factor
OUTPUT			
betaL	0,800	no dim	rectangular stress distribution ratio
k	0,280	no dim	5.7.3.1.1-2 AASHTO LRFD
c	0,124 m		distance between the neutral axis and the compressive face
behaviour	Rectangular		section's behaviour i.e rectangular, flanged
c/ds	0,176	no dim	OK (isn't superior to 0,6)
c/d's	1,600	no dim	The mild compression steel doesn't yield !!!
a	0,100	m	depth of the equivalent stress block
fps	1211,63	MPa	the average stress in the prestressing steel
Mn	3,50 MN.m		the nominal flexural resistance
Mr	3,15 MN.m		the factored flexural resistance
Mu (max)	0,16 MN.m		flexural moment at the section
fr	6,135	MPa	concrete modulus of rupture
Sc	3,819	m ³	section modulus for the extreme fiber of the composite section
fcpe	4,93931	MPa	compressive stress in concrete due to effective prestress
1.2Mcr	52 MN.m		1.2*cracking moment
1.33Mmax	0,21 MN.m		1.33 factored moment from the strength load combinations
Passed?	OK		min.reinforcement condition; Mr>min(1.2Mcr,1.33Mmax)

A's	8 #10	0.0065 m ²
As	16 #10	0.013 m ²

$$Mr = Mn * \phi$$

$$Mn = 3,50 \text{ MN.m}$$

$$\phi = 0,9$$

$$Mr = 3,15 \text{ MN.m}$$

$$Mu = 2,15 \text{ MN.m}$$

$$Mr > Mu \rightarrow \text{OK!}$$

Vérification du moment fléchissant en travée x = 84,12m

CODE USED : AASHTO LRFD 2007 edition - Bonded tendons			
INPUT			
MATERIAL PROPERTIES			
Symbol	Value	Unit	Description
fpu	1860	MPa	specified tensile strength of prestressing steel
fpy	1674	MPa	yield strength of prestressing steel
fs	420	MPa	stress in the mild steel tension reinforcement at nominal flexural resistance
fs	420	MPa	stress in the mild steel compression reinforcement at nominal flexural resistance
fc	40	MPa	specified compressive strength of concrete for use in design
GEOMETRICAL PROPERTIES			
Aps	0	m ²	area of prestressing steel
As	0,013	m ²	area of mild steel tension reinforcement
A's	0,0065	m ²	area of compression reinforcement
b	0,8	m	width of compression flange
bw	0	m	total width of 2 webs
hf	0,8	m	depth of compression flange
dp	0,10	m	distance from extreme compression fiber to the centroid of the prestressing tendons
ds	0,7062	m	distance from extreme compression fiber to the centroid of the nonprestressed tensile reinforcement
d's	0,0779	m	distance from extreme compression fiber to the centroid of compression reinforcement
Remark: You are considering a RECTANGULAR section			
φ	0,9	no dim	resistance factor
OUTPUT			
betaL	0,800	no dim	rectangular stress distribution ratio
k	0,280	no dim	5.7.3.1.1-2 AASHTO LRFD
c	0,125 m		distance between the neutral axis and the compressive face
behaviour	Rectangular		section's behaviour i.e rectangular, flanged
c/ds	0,178	no dim	OK (isn't superior to 0,6)
c/d's	1,611	no dim	The mild compression steel doesn't yield !!!
a	0,100	m	depth of the equivalent stress block
fps	1206,61	MPa	the average stress in the prestressing steel
Mn	3,51 MN.m		the nominal flexural resistance
Mr	3,16 MN.m		the factored flexural resistance
Mu (max)	0,16 MN.m		flexural moment at the section
fr	6,135	MPa	concrete modulus of rupture
Sc	3,819	m ³	section modulus for the extreme fiber of the composite section
fcpe	4,93931	MPa	compressive stress in concrete due to effective prestress
1.2Mcr	52 MN.m		1.2*cracking moment
1.33Mmax	0,21 MN.m		1.33 factored moment from the strength load combinations
Passed?	OK		min.reinforcement condition; Mr>min(1.2Mcr,1.33Mmax)

A's	8 #10	0.0065 m ²
As	16 #10	0.013 m ²

$$Mr = Mn * \phi$$

$$Mn = 3,50 \text{ MN.m}$$

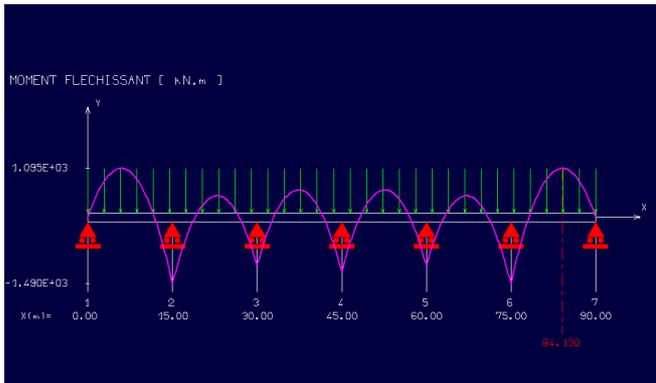
$$\phi = 0,9$$

$$Mr = 3,16 \text{ MN.m}$$

$$Mu = 1,6 \text{ MN.m}$$

$$Mr > Mu \rightarrow \text{OK!}$$

Vérification à l'Etat Limite de Service ELS



$$f_{ss} \max = (123\,000 \times \Phi) / \beta_s (s + 2d_c)$$

$$\beta_s = 1 + d_c / h - d_c = 1.19$$

$$\Phi = 0.57 \rightarrow \text{pour } w=0.25 \text{ fissures des éléments qui ne sont pas en contact avec le sol.}$$

$$d_c = 9.43 \text{ cm}$$

$$s = 6 \text{ cm} \rightarrow 60 \text{ mm}$$

$$f_{ss} \max = \underline{245.27 \text{ MPa}}$$

$$F_s = n \times M_{sls} \times X_{comp} / I = \underline{182.53 \text{ MPa}} <$$

$$F_{ss} \rightarrow \text{OK}$$

Vérification de l'armature minimale longitudinale

Le ferrailage minimum pour le béton doit être comme suit:

$A_s \geq 0.75bh / (2 * (b+h) * f_y)$ concernant le point §5.10.8 (AASHTO LRFD 2007)

$A_s \geq 0.75bh / (2 * (b+h) * f_y) = 0.75 \times 800 \times 800 / (2 * (800 + 800) * 420) = \underline{0.357 \text{ mm}^2 / \text{mm}}$

A_s section de renforcement pour chaque face et direction (mm^2 / mm)

b = dimension minimale de la section (mm)

h = hauteur (mm)

No debe ser espaciado más de $3h$ o 450 mm

Vérification de l'armature minimale transversale (A_v)

Le ferrailage transversal minimum pour le béton doit être comme suit:

$$A_v = 0.083 \sqrt{f'_c} \frac{b_v s}{f_y} \quad \text{§5.8.2.5 (AASHTO LRFD 2007)}$$

L'espaceur maximal du renforcement transversal depend de :

$$\underline{0.125 f'_c = 0.125 \times 40 = 5}$$

si $V_u < 0.125 f'_c$, pues : $s \leq 0.8d_v \leq 600 \text{ mm}$ concernant la référence §5.7.3.3.1 (AASHTO LRFD 2007)

si $V_u \geq 0.125 f'_c$, pues

$$s \leq 0.4 d_v \leq 300 \text{ mm}$$

$$0.8d_v = 0.8 \times 600 \text{ mm} = 480 \text{ mm}$$

$$\underline{S = 400 \text{ mm}}$$

$$A_v = 0.083 \sqrt{f'_c} \frac{b_v s}{f_y} = 0.083 \times \sqrt{40} \times 800 \times 400 / 420 = \underline{4 \text{ cm}^2}$$

Vérification des contraintes à ELS :

$$f_{ss \max} = (123\,000 \times \Phi) / \beta_s (s+2d_c)$$

$$\beta_s = 1 + d_c / h - d_c = 1.19$$

$\Phi = 0.57 \rightarrow$ pour $w=0.25$ fissures des éléments qui ne sont pas en contact avec le sol.

$$d_c = 9.43\text{cm}$$

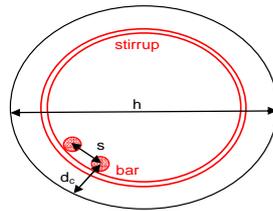
$$s = 6\text{ cm} \rightarrow 60\text{ mm}$$

$$f_{ss \max} = 245.27\text{MPa}$$

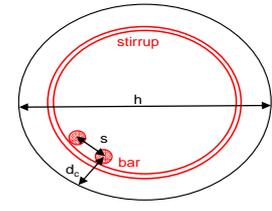
$$M_{sls} = 1.08\text{ MN.m}$$

$$F_s = n \times M_{sls} \times X_{comp} / I = 134.10\text{ MPa} < F_{ss} \rightarrow \text{OK dans en travée } x = 84.12\text{ m}$$

Characteristics	
f_y	420 Mpa
crack max	0,25 mm
h section	800 mm
Diameter of bar	
Diameter of stirrup	12 mm
Control of cracking	
Concrete cover	50 mm
Concrete cover to the flexural reinforcement	94 mm
Exposure factor	0,58
β_s	1,19
Spacing of reinforcement	60 mm
Tensile stress in steel reinforcement at the service limit state	241,69 Mpa

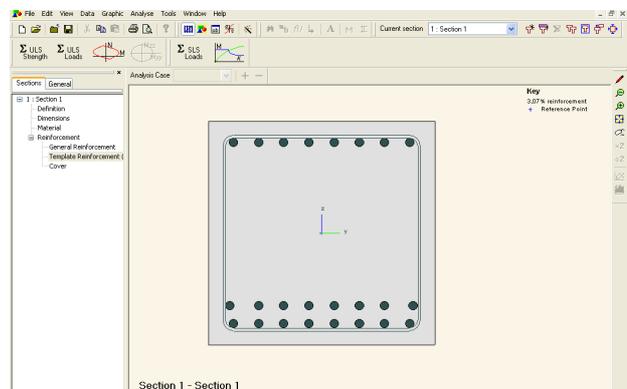
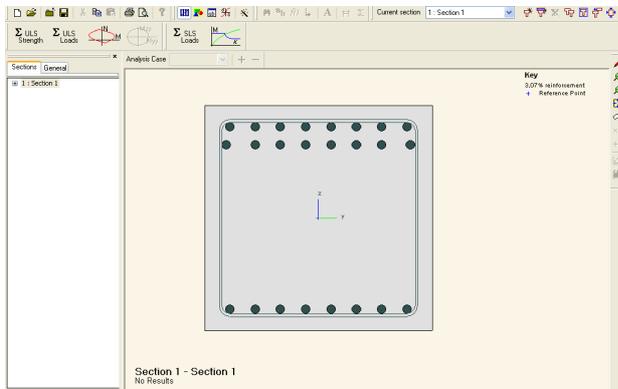


Characteristics	
f_y	420 Mpa
crack max	0,25 mm
h section	800 mm
Diameter of bar	
Diameter of stirrup	12 mm
Control of cracking	
Concrete cover	50 mm
Concrete cover to the flexural reinforcement	94 mm
Exposure factor	0,58
β_s	1,19
Spacing of reinforcement	60 mm
Tensile stress in steel reinforcement at the service limit state	241,69 Mpa



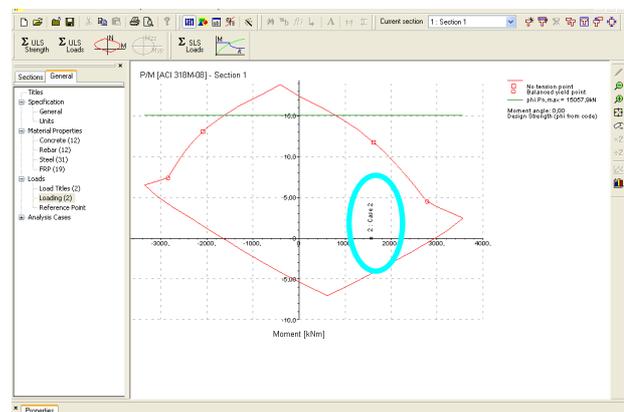
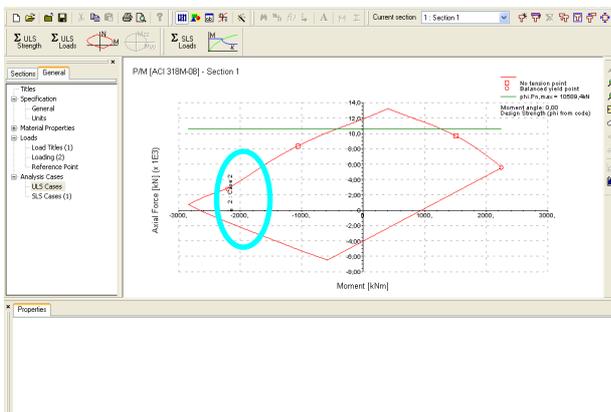
Etat Limite de Service , Appui x = 15m

Etat Limite de Service , Travée x = 84.12m



Etat Limite de Service , Appui x = 15m

Etat Limite de Service , Travée x = 84.12m



Etat Limite de Service , Appui x = 15m

Etat Limite de Service , Travée x = 84.12m

V. Méthode de Construction

Le Viaduc qui relie les stations aériennes du métro de Panama comprend une série de piles qui soutiennent un tablier sur lequel se trouve la ligne de chemin de fer.

Le tablier est substitué par le célèbre élément en « U » précontraint en pré-tension et préfabriqué de 30 m de portée. Création original de Systra, ces éléments en U seront la base sur laquelle les rails sont fixés.

La Semelle de fondation est la pièce en béton souterraine qui soutient la pile. Elle accueille les pieux des fondations profondes, nous attendons 4 pieux par semelle. Les Piles soutiennent le pont, et sont fabriquées sur place en béton armé. La méthode de construction des piles est faite par parties en utilisant la technique de coffrage. Nous avons l'option d'installer un échafaudage grimpant pour permettre aux ouvriers d'effectuer le bétonnage, ou l'option des étais.

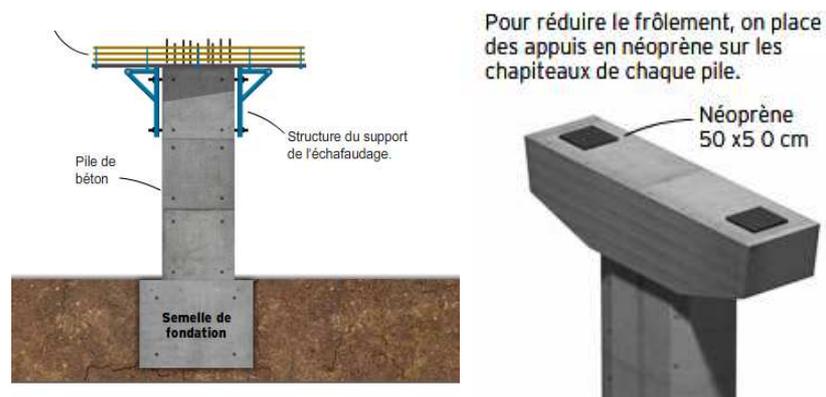


Figure 28: Construction d'une pile du viaduc

L'embrasure est l'espace libre entre les piles et la lumière est la distance entre les deux piles. Le Tirant d'air est la distance entre la partie inférieure de la superstructure et le sol. Pour les piles des stations, le coffrage est rempli par une pompe à travers une longue tuyauterie :

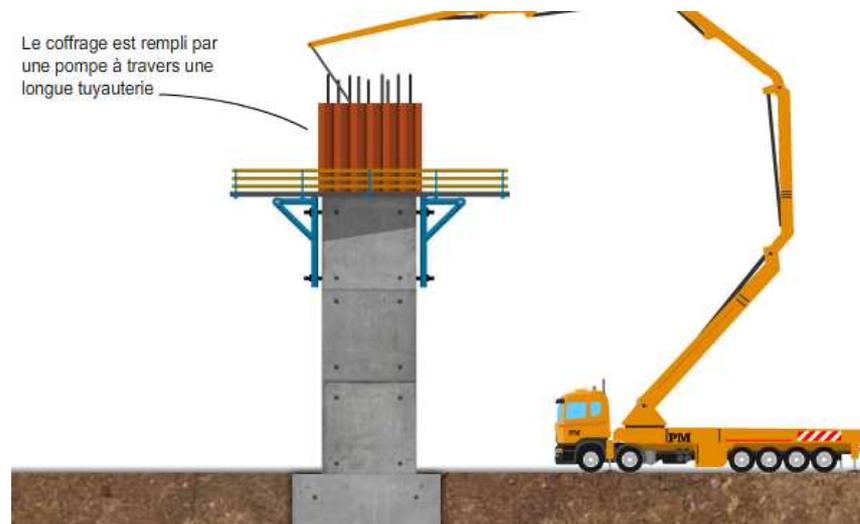
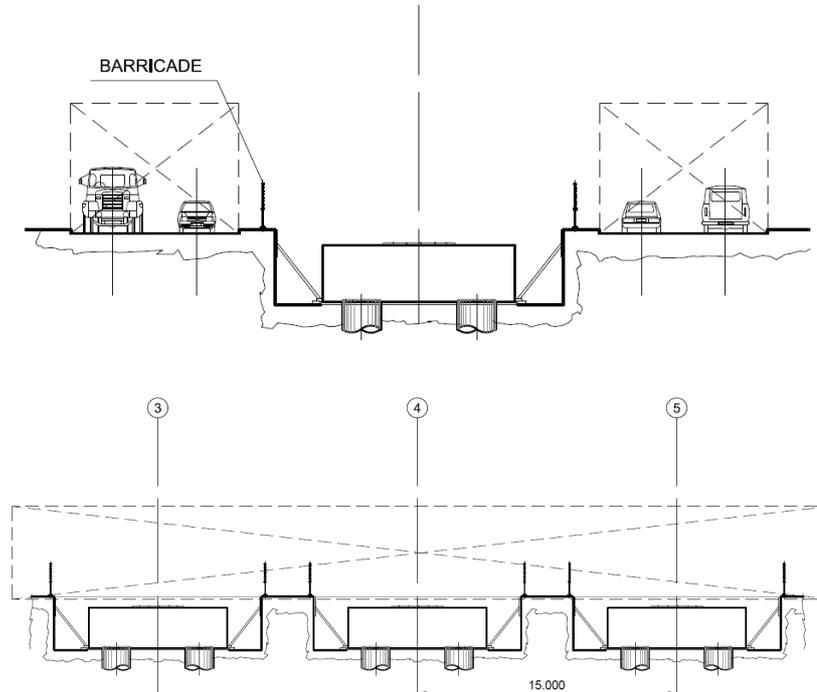


Figure 29: Méthode de construction : bétonnage

Phase 1

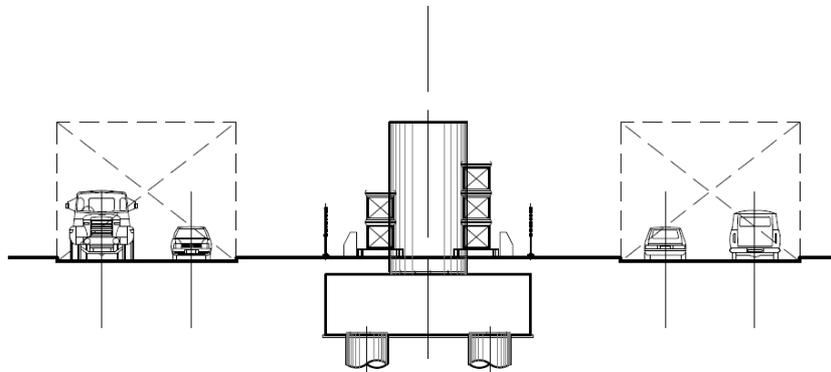
Construction sur place des pieux

Construction sur place de la semelle de la station et viaduc



Phase 2

Construction de la pile inferieure du viaduc

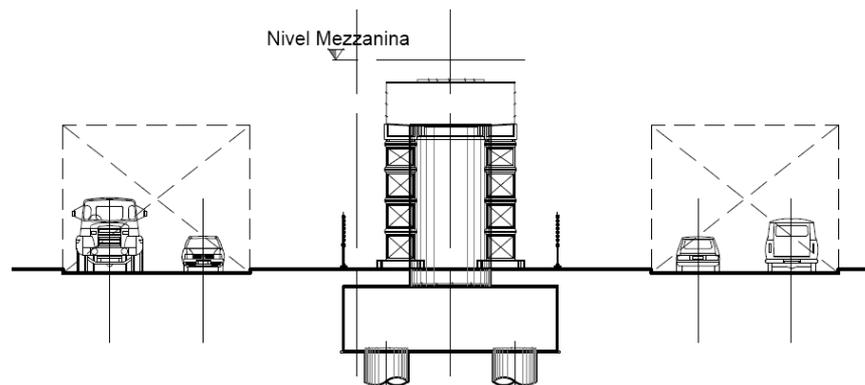


Phase 3

Construction sur place de la tête de la pile du viaduc

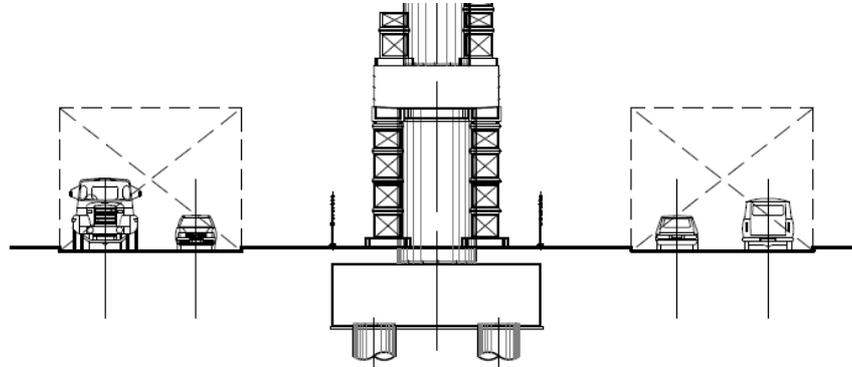
Aciers en attente pour les bras du chevêtre de mezzanine

Aciers en attente pour la pile supérieure que maintien le viaduc



Phase 4

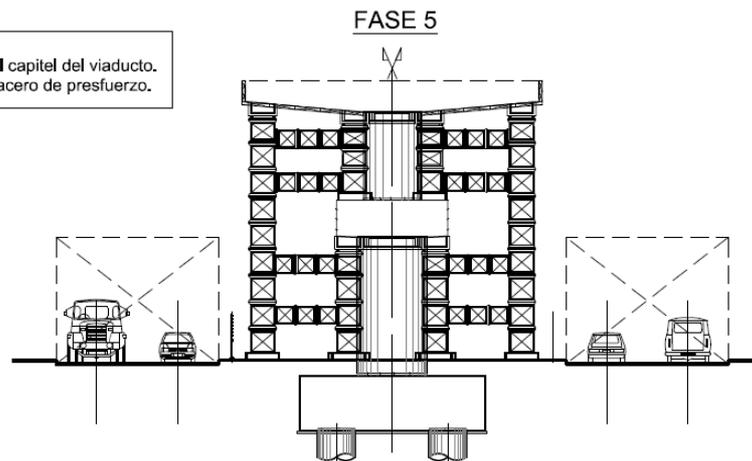
Construction sur place de la pile supérieure entre mezzanine et quai pour maintenir le viaduc



Phase 5

Construction sur place du chevêtre du viaduc
Mis en oeuvre l'acier de précontraint

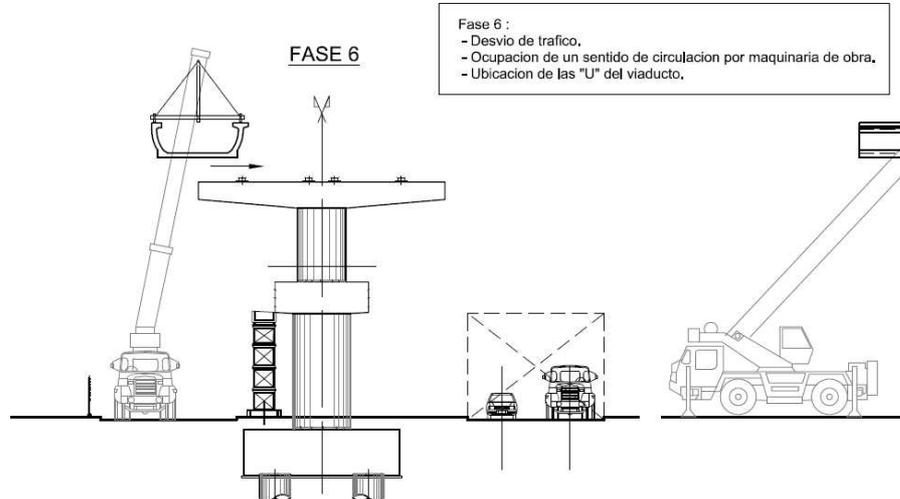
Fase 5 :
- Construcción in situ del capitel del viaducto.
- Puesta en tensión del acero de presfuerzo.

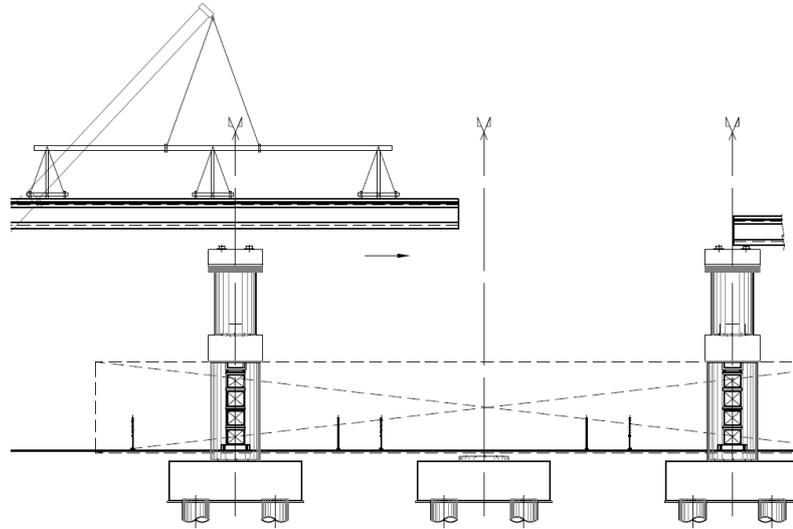


Phase 6

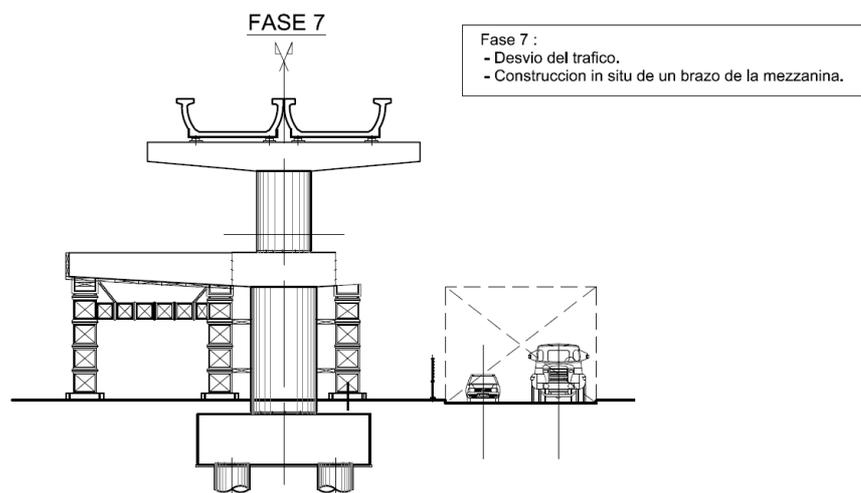
Détournement de la circulation
Occupation d'un sens de circulation
Emplacement des U du viaduc

Fase 6 :
- Desvío de tráfico.
- Ocupacion de un sentido de circulación por maquinaria de obra.
- Ubicación de las "U" del viaducto.

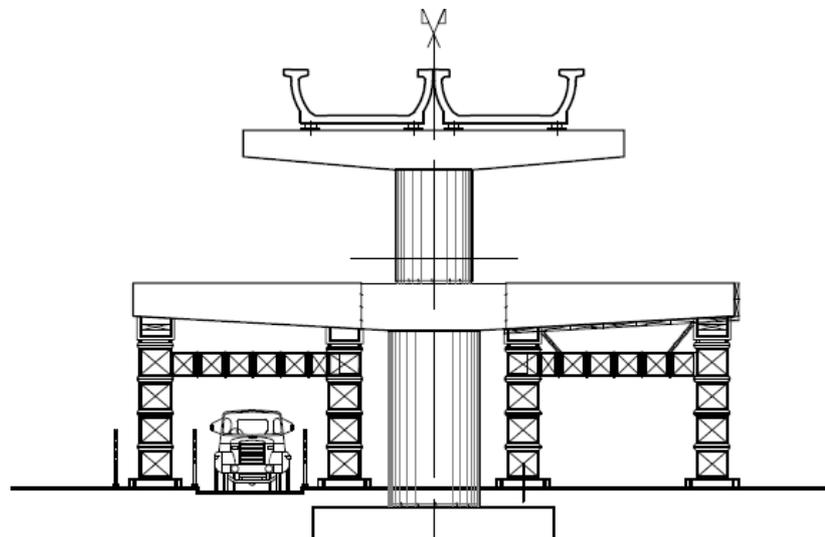




Phase 7
 Détournement de la circulation
 Construction sur place du premier bras de la mezzanina



Phase 8
 Détournement de la circulation
 Occupation d'un sens de circulation
 Construction sur place du deuxième bras de la mezzanina



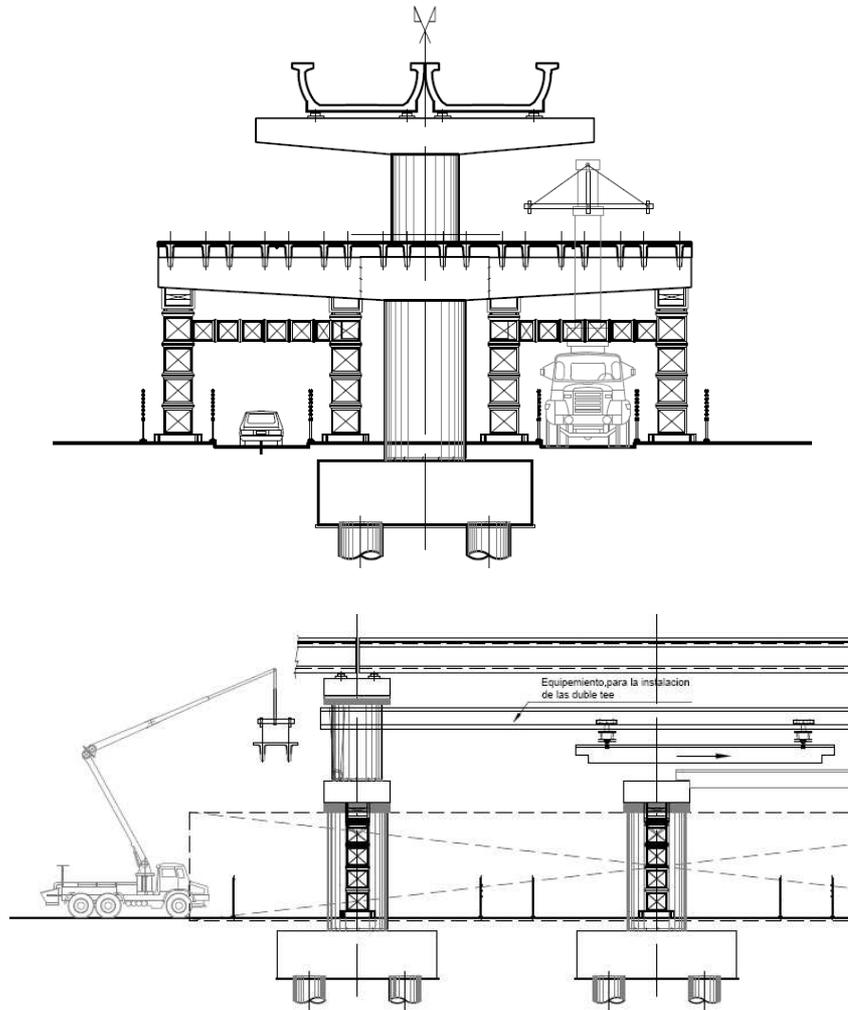
Phase 9

Détournement de la circulation

Occupation d'un sens de circulation pour les machines de chantier

Mis en œuvre des poutres double Tee depuis un extrême de la station

Déplacement longitudinal jusqu'à la position définitive des double Tee



Pour les stations, des poutres « double T » sont la base de la conception de la dalle de mezzanine.

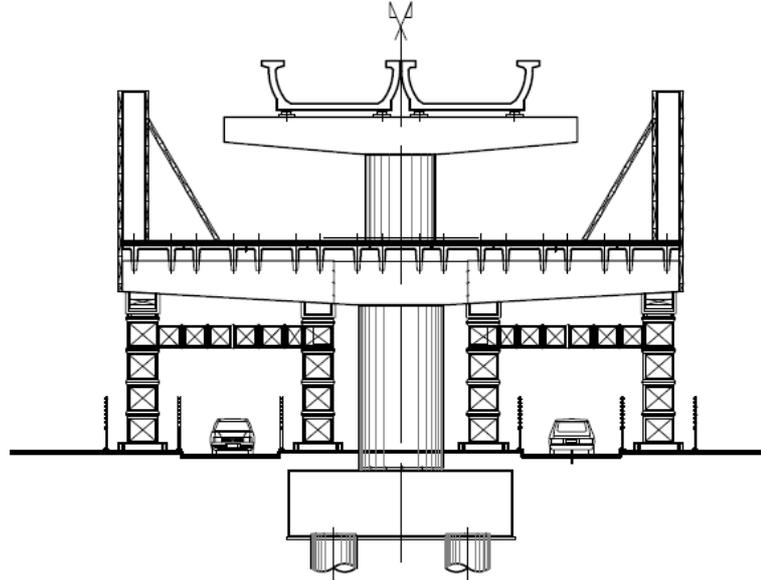


Figure 30: Double Tee construction

Phase 10

Rétablissement des deux sens de circulation

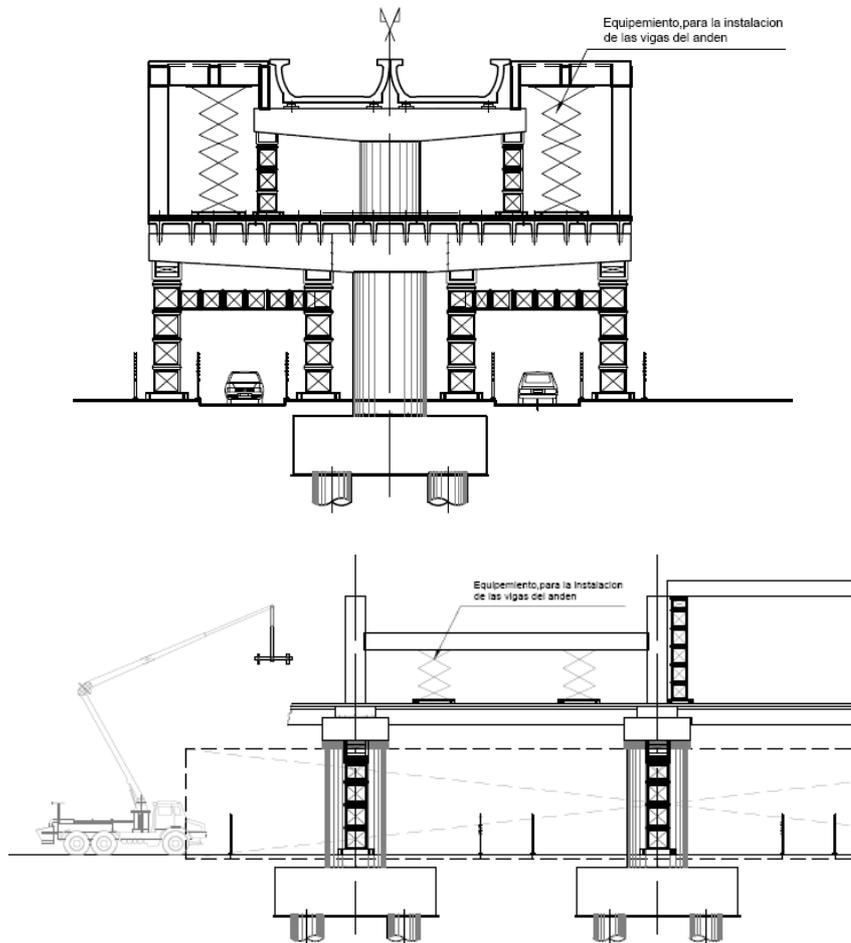
Construction des piles en béton armé



Phase 11

Mis en œuvre des poutres préfabriquées

Construction in situ de la dalle de la plateforme et le diaphragme



VI. Conclusion

Avoir collaboré à l'étude de la conception structurale des Stations Aériennes du Métro à Panama, a été pour moi une expérience très enrichissante dans ma formation comme ingénieur.

J'ai découvert avec enthousiasme le domaine des ouvrages d'art dédiés au transport en ville, et l'ensemble des problématiques qui s'y rattache.

Étant donné le domaine des travaux publics, j'ai voulu mettre en valeur l'avancement du projet, lors de la phase d'appel d'offre (janvier 2011) jusqu'à la situation actuelle (mai 2011). Le contexte urbain particulier aux villes des pays émergents (Amérique du Sud), cette offre TC structurante semble primordiale pour un développement durable de ces agglomérations.

Cependant, vu les capacités de financement relatives que possède cette ville, la problématique du choix de construction intègre une optique singulière, qui diverge avec le contexte de la planification des transports au sein des villes des pays développés.

Les résultats ambitieux de ce projet permettent ainsi de proposer des solutions pour un développement durable et accéléré de la mobilité urbaine.

Cette étude, réalisée au sein de SYSTRA, montre bien la qualité de l'ouvrage, et la démarche fondamentale de l'ingénieur dans l'acte de construire un ouvrage d'art dédié au transport. J'avais à cœur de vérifier que les connaissances acquises à l'Ecole étaient véritablement utiles, si j'étais capable de les restituer et de m'en servir dans mon travail de tous les jours. Je tenais à évaluer mes capacités propres d'adaptation à un projet, de mise en œuvre des réflexions sur les difficultés posées. Acquérir un savoir-faire et une connaissance des techniques de construction me semblaient être des objectifs primordiaux.

VII. Annexes

Annexe n°1 : Toiture de la Station Aérienne

La technologie utilisée pour effectuer la charpente métallique est la soudure des tuyaux. Les tubes sont de 150 mm et 300 mm, ils sont pliés au long des arcs de cercles. Les tubes sont dotés des plaques temporaires qui permettent de lier les uns aux autres tubes côte à côte avant le soudage in situ.

Solutions toiture

Cette technique est actuellement utilisée à travers le monde pour construire charpente pas plat, puisque le tube a l'avantage de s'adapter à tous les types de connexions au niveau des nœuds (ce qui est plus compliqué avec les IPE et HEA). Nous recommandons ce type d'union, simple, moderne et facile à appliquer à cette typologie de toiture.

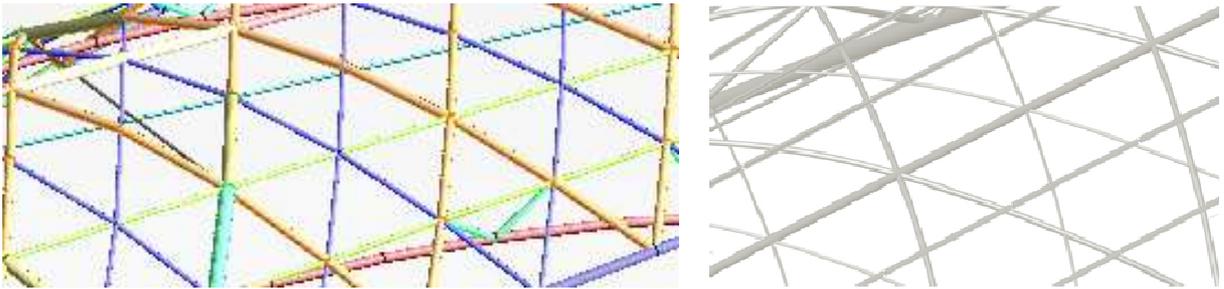


Figure 31: Maillage principal (jaune) et secondaire (en bleu)

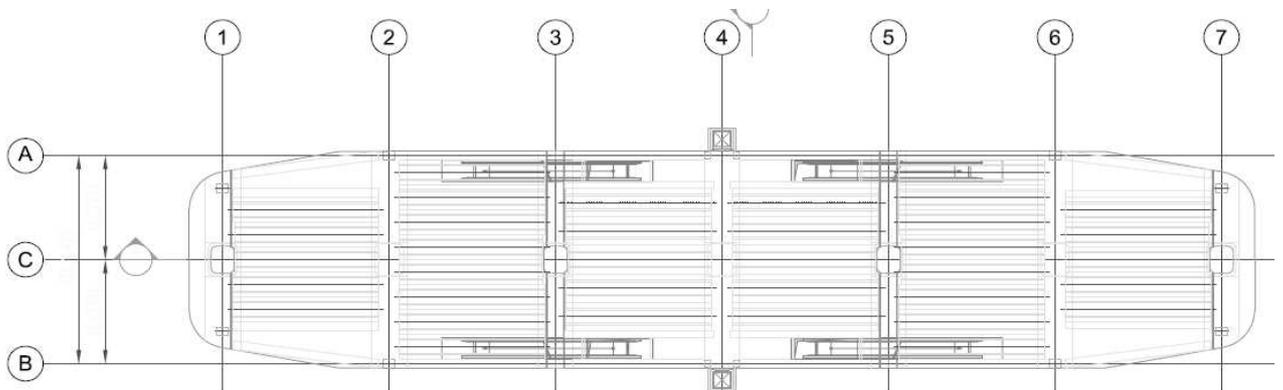


Figure 32: Vue en plan de la Station

La toiture repose sur 10 appuis. Au niveau des axes de référence 2 et 6 les appuis se trouvent directement sur les nœuds de la charpente métallique. Au niveau des axes de référence de 3,4 et 5, la toiture repose sur des tripodes articulés dans le quai.

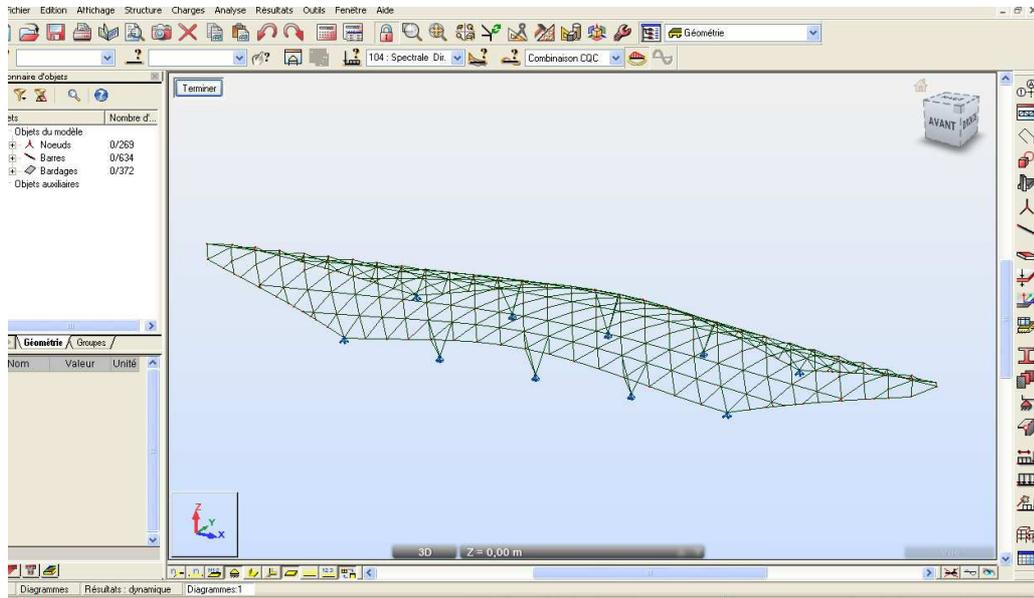


Figure 33: vue en perspective X-Y-Z de la création du modèle de la toiture

Le fonctionnement de cette structure est principalement un portique en flexion. Il est possible de monter la toiture par des bandes de 15m pour couvrir la partie centrale et de fournir étaie temporaire pour les parties portées à faux. Les portiques de 15 m de largeur ont besoin d'un contreventement de stabilisation temporaire de type longitudinal.

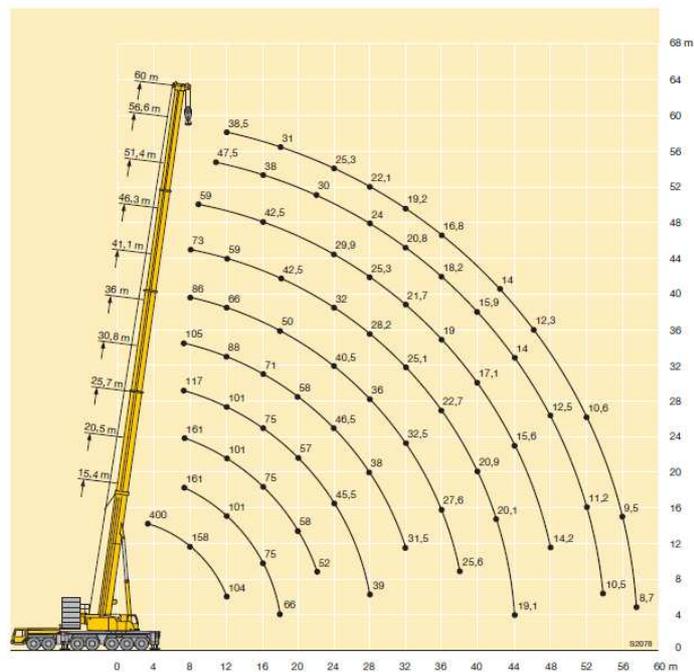


Figure 34: Schéma du bras de la grue pour l'installation de la toiture

Cette type d'opération est courant dans la métallurgie et n'a pas de difficulté particulière. Une bande de 15 m pèse environ 30 tonnes. Il ya des grues mobiles télescopiques qui permettent lever cette charge à 30 m de haut avec un arbre de 30m sur le boulier comme indiqué ci-dessus. La résille est formée par l'intersection des tubes, avec une trame principale et autre secondaire. Quant à la trame secondaire il est conseillé d'utiliser des assemblages boulonnés à la place des soudées in situ.

Aspect architectural

La résille de la toiture pour la couverture des stations aériennes de la ligne 1 du métro est composée d'éléments soudés de section relativement faible.

Ce type de montage permet de traverser vastes zones, avec une grande qualité visuelle et de l'espace intérieur. La grille métallique est compatible avec la proposition formulée dans l'appel d'offres. Elle permet de concevoir une couverture mince, élégante avec un intérêt architectural.



Figure 35: Perspective 3D de la toiture en station

Cette unité de la couverture permet l'évacuation des gaz toxiques en cas de catastrophe. En vertu de la conception initiale du projet, l'installation de ce support permet aux stations de Panama de bénéficier de couverture élégante, contemporaine de l'image d'une ville et un pays moderne qui regarde vers la future.

Montage de la station

La méthode de montage dépend essentiellement des facteurs suivants :

1. L'espace disponible sur le site de la station pour assembler les éléments constitutifs de la charpente
2. Le moyen de transport et les gabarits des routes rencontrés dans le trajet.
3. Le matériel de levage utilisé (poids soulevé, la hauteur, flèche ...)
4. Les moyens de surélévation rencontrés
5. Les possibilités de souder sur place (station ouverte au public)

Il est préférable de limiter les opérations de soudage dans la station en service.

Développé en Allemagne depuis 1987, SOFISTIK® permet d’appréhender les phénomènes physiques complexes, comme la non-linéarité des structures dans leur géométrie et dans leurs matériaux. Le logiciel reste néanmoins pédagogique grâce à l’assistant interactif et l’interface avec Autocad® (SOFIPLUS®) qui permettent un pré-processing rapide.

Matériaux :

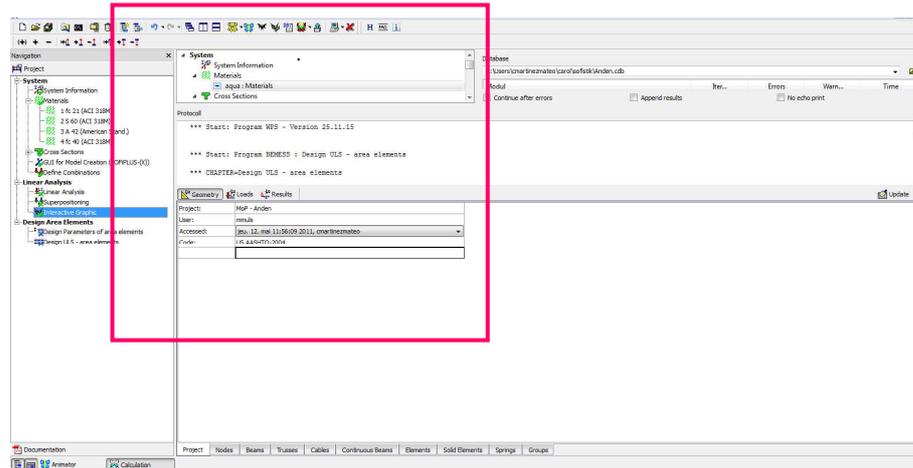


Figure 38: Saisi des données concernant les matériaux sur l’utilitaire Sofistik®

Béton $f_c = 40$ MPa
 Acier des armatures $F_y = 420$ MPa
 AASHTO Amercaine

Descente des Charges :

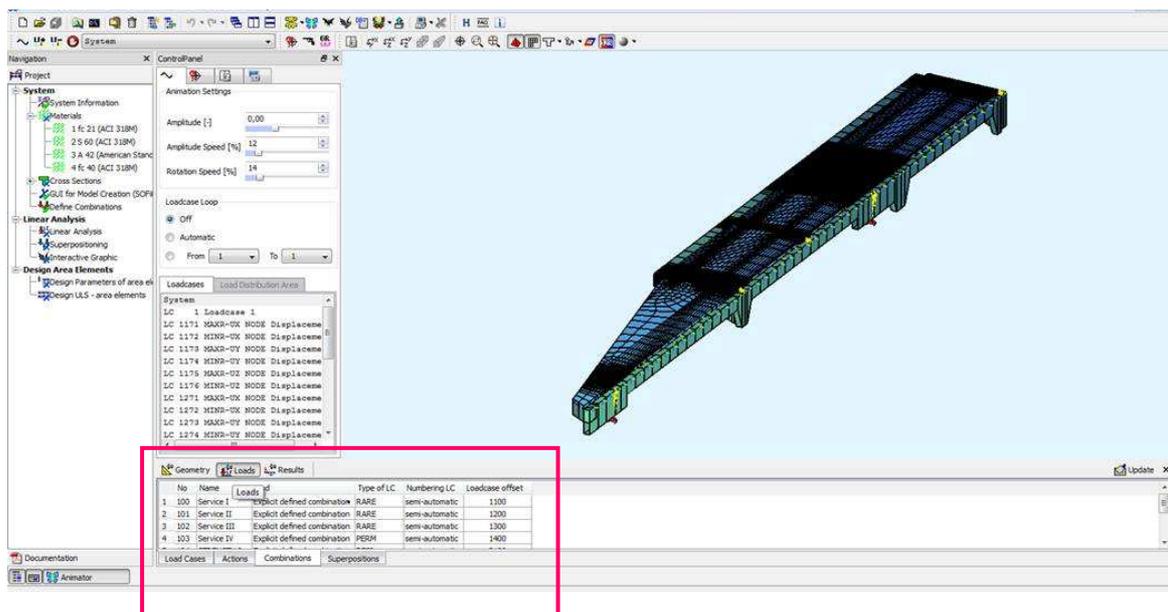


Figure 39: Saisi des données concernant la descente des charges sur l’utilitaire Sofistik®

Sollicitations :

Nous pouvons obtenir les différents sollicitations selon l'axe X , Y ou Z :

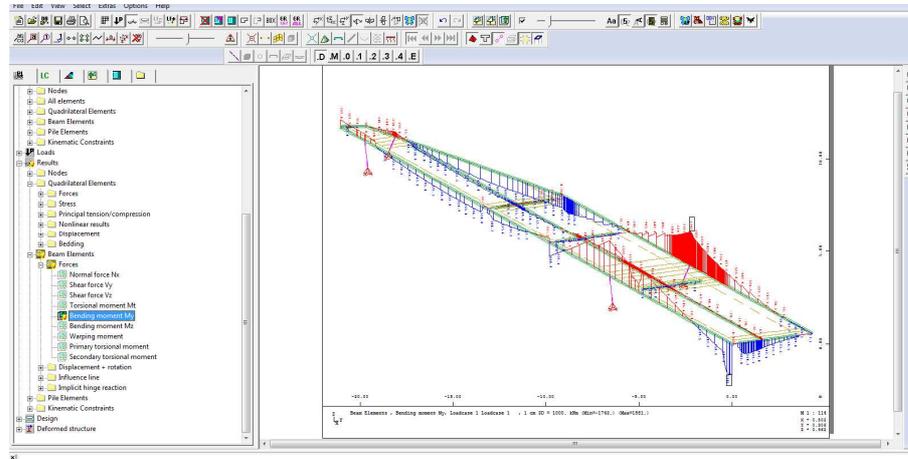


Figure 40: Moment fléchissant au tour de l'axe Y

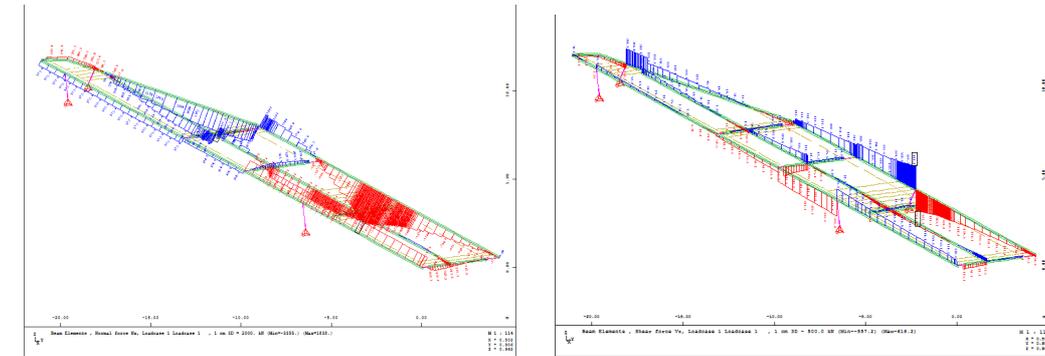


Figure 41: effort normal et effort tranchant

Déformations :

Le commando *Animator* nous permet d'étudier les déformations du modèle

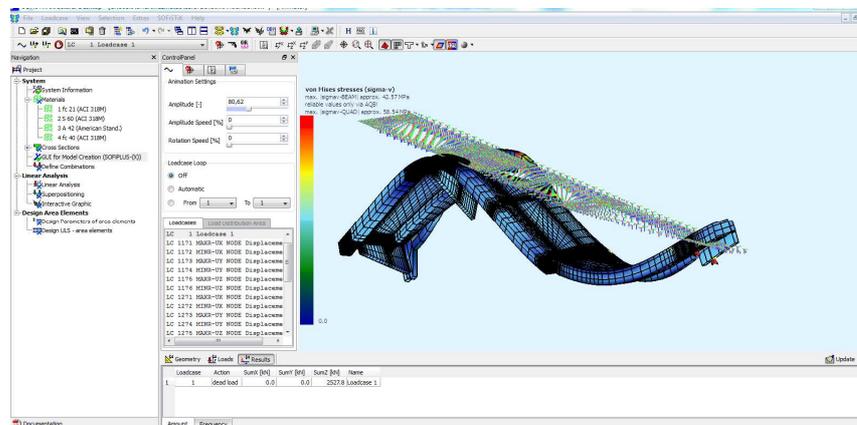
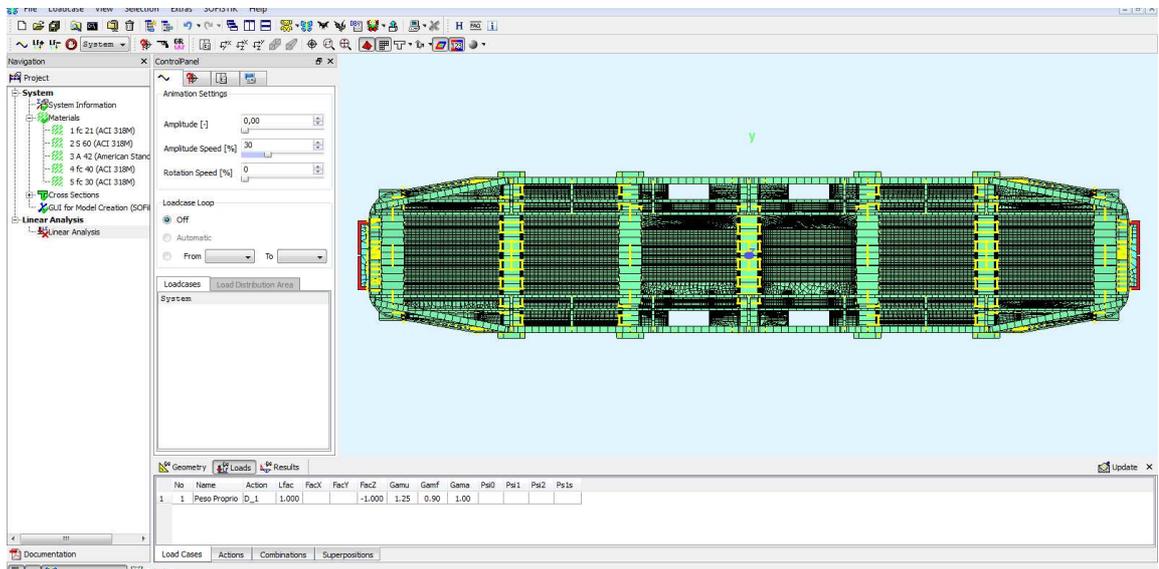
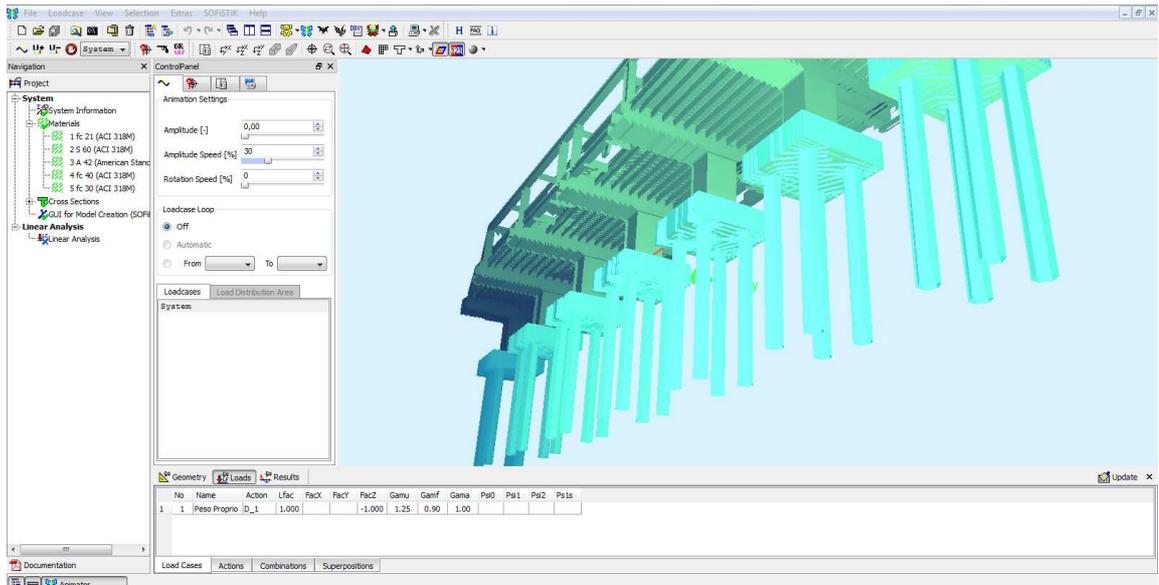
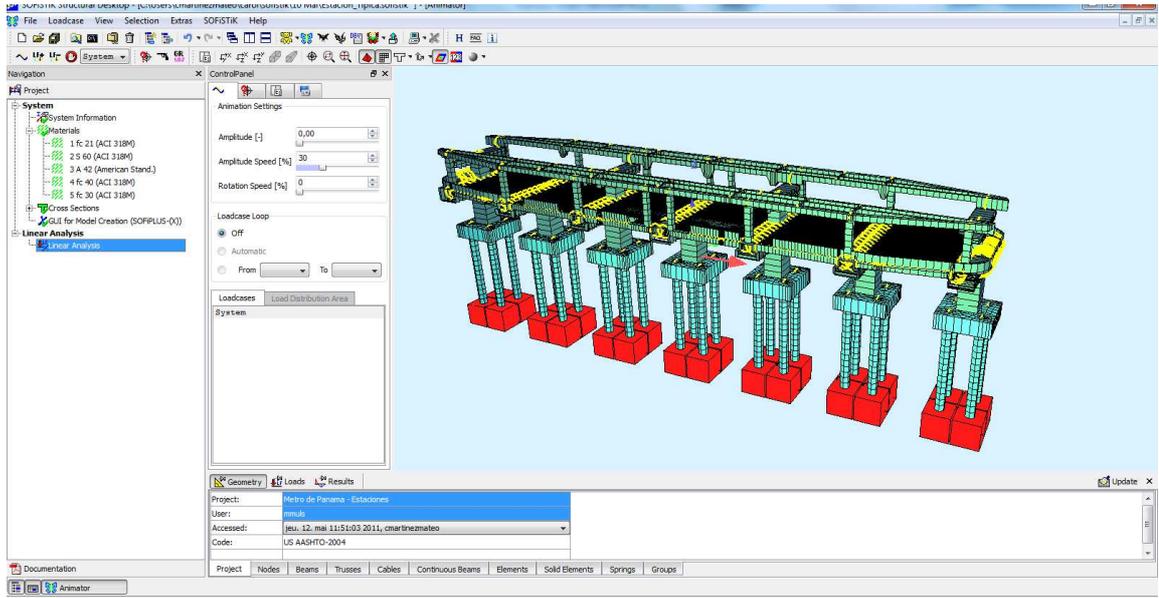


Figure 42: Vue en perspective de la déformation du quai avec le « Animator »

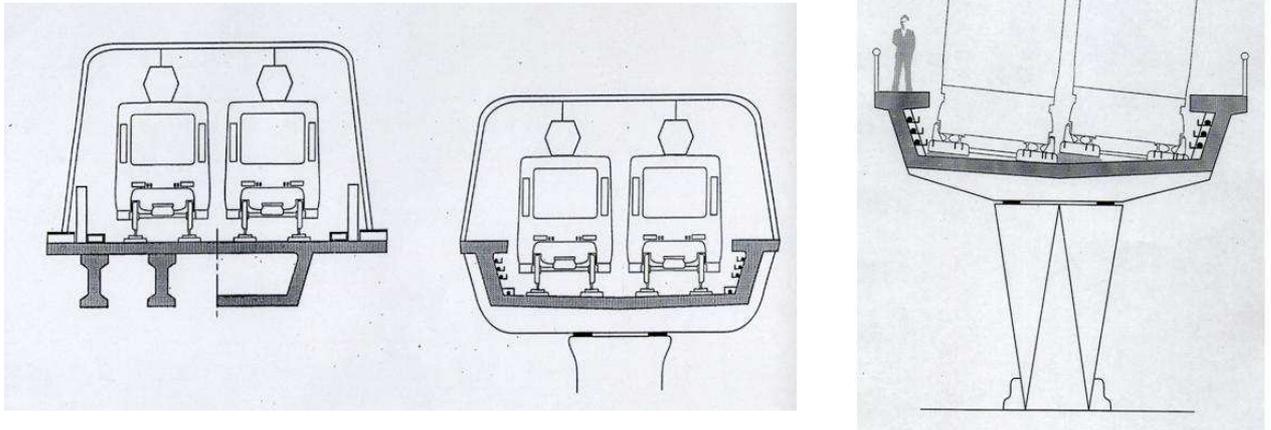
Modélisation de l'ensemble de la station aérienne



Annexe n°3: Viaduc – élément U Systra

La section « U » SECTION est un système d’ouvrage d’art pour les viaducs développé par Monsieur Daniel Dutoit chez Systra Département GCOA (Génie Civil Ouvrages d’Art).

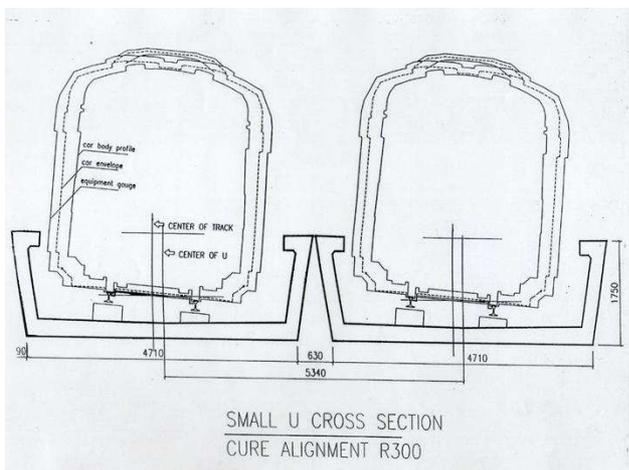
Figure : L’évolution du système de transport aérien



Figures : Metro Viaduc U différentes types

METRO VIADUCTS WITH U DECK

COUNTRY	TOWN	TYPE	LENGTH (km)
CHILI	SANTIAGO Line 5	Big U	5.6
CHILI	SANTIAGO Line 4	Big U	7
TAIWAN	TAIPEI Neihu Line	Small U	11
INDIA	DELHI Line 3	Big U	22
DUBAI	DUBAI Green line and Red line	Big U	62
CHINA	SHANGHAI Line 8	Small U	6.4
INDIA	MUMBAI	Small and big U	11.1
INDIA	DELHI Airport Link	Small U	7
PAKISTAN	LAHORE	Small U	15.4
SAUDI ARABIA	MECQUA	Small U	19
VIETNAM	HO CHI MIN Line 2	Small U	5.2
KOREA	UIJONGBU	Big U	11.2
VIETNAM	HANOI	Small U	8.5



VIII. Référencement

- [1] <http://whc.unesco.org/fr/list/790>
 [2] <http://www.transportation.org/>
 [3] AASHTO MCEER/ATC-49.

IX. Glossaire

AASHTO : The American Association of State Highway and Transportation Officials.

Moment fléchissant : si l'on considère les efforts de cohésion, le moment fléchissant est la résultante de la décomposition de la flexion d'une poutre en éléments infinitésimaux.

Effort tranchant : Il y a cisaillement (application d'un effort tranchant) lorsqu'une pièce est sollicitée par deux forces égales, de même droite d'action mais de sens contraires qui tendent à faire glisser l'une sur l'autre les deux parties de la pièce (exemple : action d'une paire de ciseaux sur une feuille de papier, action d'un poinçon sur une tôle, ...).

Etat Limite Ultime (ELU) : Dans ce mode de sollicitation, l'ouvrage est à la limite de la rupture, il doit résister aux charges mais il subit des déformations irréversibles et en ressort endommagé.

Inertie : Le moment d'inertie est une grandeur qui caractérise la géométrie d'une section et se définit par rapport à un axe ou un point.

Torsion : Mode de sollicitation mécanique d'un corps solide déformable dû à un mouvement autour d'un axe provoquant un déplacement angulaire des plans perpendiculaires à ce dernier.

Constante de torsion : la constante de torsion est une propriété géométrique d'une section de poutre qui relie l'angle de torsion et le couple appliqué.

Module de Young : Constante élastique qui, pour un matériau homogène isotrope, lie la contrainte à la déformation. Dans le Système International on l'exprime en MPa.

NDC : Note de calcul

X. Références bibliographiques

- John S. Burpulis, Neoprene in bridge bearing pads – the proven performance, Université de Floride, coll. « Extending the life of bridges (G. W. Maupin, Bernard C. Brown, Abba G. Lichtenstein) », 1990
- Thierry Kretz, *Appareils d'appui à pot - Utilisation sur les ponts, viaducs et structures similaires - Guide technique*, Bagneux, SETRA, novembre 2007
- LCPC, *Instruction technique pour l'entretien et la surveillance des ouvrages d'art – Fascicule 13 – Appareils d'appui*, Bagneux, SETRA, 2002

Articles

Designs for civil engineering for the Panama metro

<http://www.systra.com/Etudes-de-genie-civil-pour-le-metro-de-Panama>

Le 7 janvier 2011, SYSTRA a signé avec CONSORCIO LINEA UNO le contrat d'études détaillées de génie civil pour la réalisation de la première ligne de Métro de Panama.

21/01/2011

CONSORCIO LINEA UNO est la joint-venture constituée par les sociétés de génie civil brésilienne ODEBRECHT et espagnole FCC, dont le groupement est sorti vainqueur en novembre 2010 de l'appel d'offres international lancé par la Secretaria del Metro de Panama (SMP) pour la conception et construction clé en main de la ligne 1 de métro.

Au titre de cet accord, SYSTRA sera en charge de l'ingénierie de génie civil des deux tronçons aériens de cette ligne de métro automatique de 13,7 km. Les équipes de SYSTRA seront notamment responsables de la totalité des études détaillées du dépôt et des ateliers de la ligne, de 1,2 km de tranchées couvertes et ouvertes, de 5,2 km de viaduc basé sur le concept du double U, de 5 stations aériennes et d'une station semi-enterrée. Ce contrat, d'une durée de 18 mois, s'inscrit dans la stratégie de SYSTRA, qui vise à conforter son leadership mondial en ingénierie ferroviaire et à renforcer sa présence en Amérique Latine.

Page de garde

Logo drapeau Pays de Panamá

Logo Entreprise Systra

Logo Métro de Panamá

Pages Web visitées

<http://www.systra.com/Etudes-de-genie-civil-pour-le-metro-de-Panama>

<http://www.elmetrodepanama.com/Conoce-la-Linea-1.html>

<http://www.systra.com/Etudes-de-genie-civil-pour-le?lang=fr>

[http://fr.wikipedia.org/wiki/Panam%C3%A1_\(ville\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Panam%C3%A1_(ville))

<http://www.alstom.com/transport/fr/news-and-events/press-releases/Alstom-equipera-la-premiere-ligne-de-metro-de-la-ville-de-Panama-et-fournira-45-voitures-pour-la-ligne-2-du-metro-de-Saint-Domingue/>

<http://maitrejulia.blogspot.com/2010/01/construction-du-metro-de-panama-le-bal.html>

http://www.euskalyvasca.com/fr/multi_infog_detalle.html?contentName=cont_multimedia_infografia.construccion_viaductos

TABLE DES FIGURES

- Figure 1** : Vue aérienne Ville de Panama
Figure 2 et 3 : Ligne 1 du métro à Panama City
Figure 4 et 5 : Station Aérienne « Los Andes » et perspective viaduc dans la ville
Figure 6: Portail d'accueil site web
Figure 7: Schéma des intervenants dans le projet
Figure 8: Coupe transversale de la Station –Solution Appel d'Offre
Figure 9: Vue en Plan de la Solution Appel d'Offre
Figure 10 : Schéma de la disposition des piles Solution 2
Figure 11 : Schéma de la disposition des piles Solution 3
Figure 12 : Schéma vue en plan de la mezzanine avec la configuration actuelle
Figure 13 : Aperçu de la mezzanine avec l'inclusion de colonnes distinctes pour le viaduc.
Figure 14: Schéma de la coupe transversale de la station
Figure 15 : Schéma de la coupe longitudinale de la station avec la configuration initiale
Figure 16: Schéma en coupe longitudinale de la station avec l'inclusion de colonnes indépendantes du viaduc.
Figure 17: Schéma de la structure de la Solution A
Figure 18: Bielles avec rotules
Figure 19: Amortisseurs
Figure 20: Appui en Néoprène
Figure 21 : Schéma de la structure de la Solution B
Figure 22 : Schéma de disposition des Piles de la Solution Définitive
Figure 23 : Schéma de la Structure de la Solution Définitive
Figure 24 : Coupe transversale de la Solution Définitive
Figure 25 : Coupe longitudinale de la Solution Définitive
Figure 26: Perspective des éléments structurels de la plateforme des stations aériennes
Figure 27: Schéma structural de la poutre de 15m de portée
Figure 28: Construction d'une pile du viaduc
Figure 29: Méthode de construction : bétonnage
Figure 30: Double Tee construction
Figure 31: Maillage principal (jaune) et secondaire (en bleu)
Figure 32: Vue en plan de la Station
Figure 33: vue en perspective X-Y-Z de la création du modèle de la toiture
Figure 34: Schéma du bras de la grue pour l'installation de la toiture
Figure 35: Perspective 3D de la toiture en station
Figure 36: vue en perspective X-Y-Z de la création du modèle (SOFIPLUS®)
Figure 37: vue en perspective X-Y-Z de la création du modèle du quai de la station (SOFIPLUS®)
Figure 38: Saisi des données concernant les matériaux sur l'utilitaire Sofistik®
Figure 39: Saisi des données concernant la descente des charges sur l'utilitaire Sofistik®
Figure 40: Moment fléchissant au tour de l'axe Y
Figure 41: effort normal et effort tranchant
Figure 42: Vue en perspective de la déformation du quai avec le « Animator »

TABLE DES TABLEAUX

- Tableau 1** : Récapitulatif des risques pour Systra dans ce projet
Tableau 2 : Récapitulatif de la Solution 2
Tableau 3 : Récapitulatif de la Solution 3

XI. GANTT

Gantt spécifié et modifié éventuellement

