



----- HAÏTI -----
**MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS, TRANSPORTS
ET COMMUNICATIONS (MTPTC)
UNITÉ CENTRALE D'EXÉCUTION (UCE)**

**PROGRAMME DE TRANSPORT ET
CONNECTIVITÉ DÉPARTEMENTALE**
*COMPOSANTE 3 : PROGRAMME DE MISE A NIVEAU DES PONTS
OPERATION : HA-L1104, ACCORD DE DON 4618 /GR-HA*

**ETUDES DU PROJET DE REPARATION DU PONT
FRANCHISSANT LA RIVIERE ROUYONNE SUR LA ROUTE
NATIONALE No 2 (RN2)**

Financé par : BANQUE INTERAMERICAINE DE DÉVELOPPEMENT (BID)

Notes de Calculs

Directeur de Projet : prof. ing. Axan Abellard
Spécialiste en hydraulique : prof. ing. Jean Marie André Lerebours
Spécialiste en structures : ing. Giovanni Corrao

Port-au-Prince, 26 Avril 2022

Ficher : NotesDeCalculs.rev3c

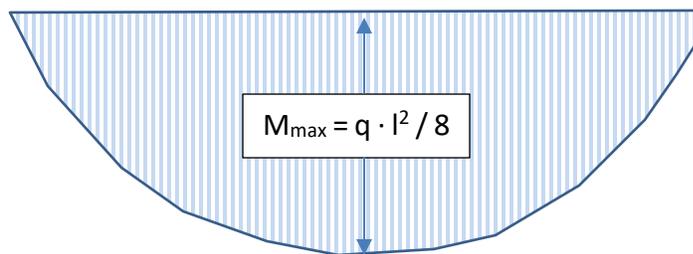
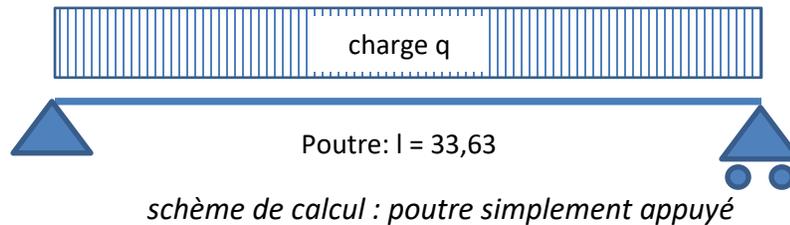
	TECHNIPLAN	CECOM Consultants	
Via Guido d'Arezzo, 14 - 00198 Roma (Italy) Tel. +39 068535.0880 - email: techniplan@gmail.com		36, Rue Marcadieu, Impasse Crepsac Prolongé, Delmas 40B (Haïti) Tél. +509 3227-2493 - email : cecomconsultants@yahoo.fr	

Sommaire exécutif

1. Calcul de vérification du pont existant	3
2. Calcul de vérification des pieux du nouveau pont.....	6
3. Calcul de vérification des poutres porteuses du nouveau pont	8
4. Estimation des vibrations.....	9
5. Amplification dynamique.....	11

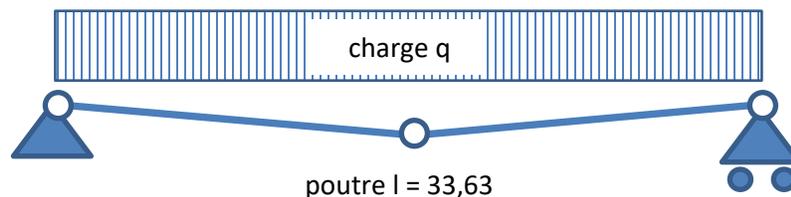
1. Calcul de vérification du pont existant

Les calculs du pont ont été effectués avec le système au « états limites ultimes », ELU, qui tire le meilleur parti de la capacité de résistance des matériaux. Le schème de calcul, pour déterminer le ELU, donne un moment résistant $M = q \cdot l^2 / 8$



schème de calcul : diagramme des moments

En cette situation de diagramme de charge la typologie de calcul donne des résultats équivalents au « calcul aux tensions admissibles », parce que nous sommes en présence d'un schème qui en situation de rupture donne trois rotules alignées, et donc il n'y a pas de surcharge disponible pour profiter encore plus des matériaux :



schème de calcul : les trois charnières alignées

Pour ceci le calcul élastique donnera les mêmes résultats que le calcul à la rupture.

Ci-dessous, il a été développé dans le calcul de vérification des contraintes auxquelles le pont est soumis. La charge de conception maximale est de 110 tonnes, tandis que le poids propre du pont est de 45 tonnes. Il convient de noter que la flèche de 6 cm existante, supérieure à la limite calculée de 4.2cm ($L/800$), n'est pas due à la défaillance structurelle du pont, mais au fluage de l'acier soumis à des contraintes cycliques. La Mabey admet une flèche jusqu'à $L/360$.

PONT ROUYONNE

Calcul poutre simplement appuyé

longueur de la poutre	l	=	33.63	m
trottoires	s	=	40.00	kN
largeur du pont	la	=	9.86	m
poids pont	tr	=	410.00	kN
surcharge	qs	=	32700.00	N/m
78 KN/m ³ ⇒ charge de l'acier			24500	N/m ³
charge	q	=	46081	N/m

A	=	b x h	Surface de la section
N			Effort normal
σ	=	M / W	≤ σ_{am} tension normale interne
σ_{am}			tension normale admissible
Δl			déformation
E			module d'élasticité normal
I			moment d'inertie barycentrique

$$I_x = (B \times H^3 - b \times h^3) / 12$$

W	=	I / y	moment d'inertie	(cm ³ o mm ³)
W _x	=	I / y	= b x h ² / 6	moment d'inertie rectangle
W _x	=		(BxH ³ - bxh ³) / 6xH	= 0.045176753

σ	=	N / A	≤ σ_{lim}
σ_{lim}	=	350	MPa

I	=	4686000	cm ⁴	Moment d'inertie du profilée
E _{fe}	=	210000	Mpa	Module di elasticité ou de young

M/W=

$$M_{fx} = q \times l^2 / 8 = 6514555.58 \text{ Nm}$$

$$\sigma_{fx} = M_{fx} / (I/V)_x \leq \sigma_e$$

σ_e	=	M / W	=	144.20	MPa	≤	350	Mpa	verifié
------------	---	-------	---	--------	-----	---	-----	-----	---------

$$(I/V)_x \geq M_{fx} / \sigma_e = 45176.75 \quad \text{module de résistance} \quad 0.281009$$

Force de coupe A = B = q x l / 2 774850.5 N

flèche f = 5 x q l⁴ / 384 x J x E = 0.00078 ≤ 0.042038 = l/800

verifié

Un renforcement des poutres porteuses latérales pourrait permettre au pont de continuer à effectuer son travail encore de nombreuses années, même si, du fait de sa propre structure en treillis, il continuerait à être soumis à des vibrations verticales et latérales au passage des véhicules plus lourds.

N'ayant pas été en mesure de détecter avec précision les dimensions des coulées, pour des raisons évidentes, nous nous en sommes tenus aux plans d'origine et aux dimensions réellement prises sur place. En ce qui concerne les calculs structurels, les données obtenues à cet égard sont présentées ci-dessous, car elles sont analytiquement correctes, exhaustives et bien élaborées.

Tableau #6.- Géométrie des fondations

GEOMETRIE:									
Hauteur totale:	H_t	6 m		a_1	0.5 m				
Epaisseur semelle:	e	1 m							
Hauteur mur	H'	5 m		d	2.7 m				
Largeur semelle:	B	4.5 m							
Longueur semelle	L	14.4 m							
Angle d'inclinaison remblai	α	0°							
Epaisseur mur	hm	1.3 m							

Tableau #7.- Caractéristiques mécaniques du sous-sol et des éléments de fondation

CARACTERISTIQUES MECANIQUES									
		REMBLAI			SOL NATUREL			BETON	
Angle de frottement	ϕ	30°		ϕ_{sol}	28°				
cohesion	c	0.00 t/m ²		c_{sol}	1.7 t/m ²				
masse volumique	γ	2.01 t/m ³		γ'_{sol}	0.8 t/m ³		γ_{mur}	2.5 t/m ³	
coeff de poussée	K_a	0.3333							

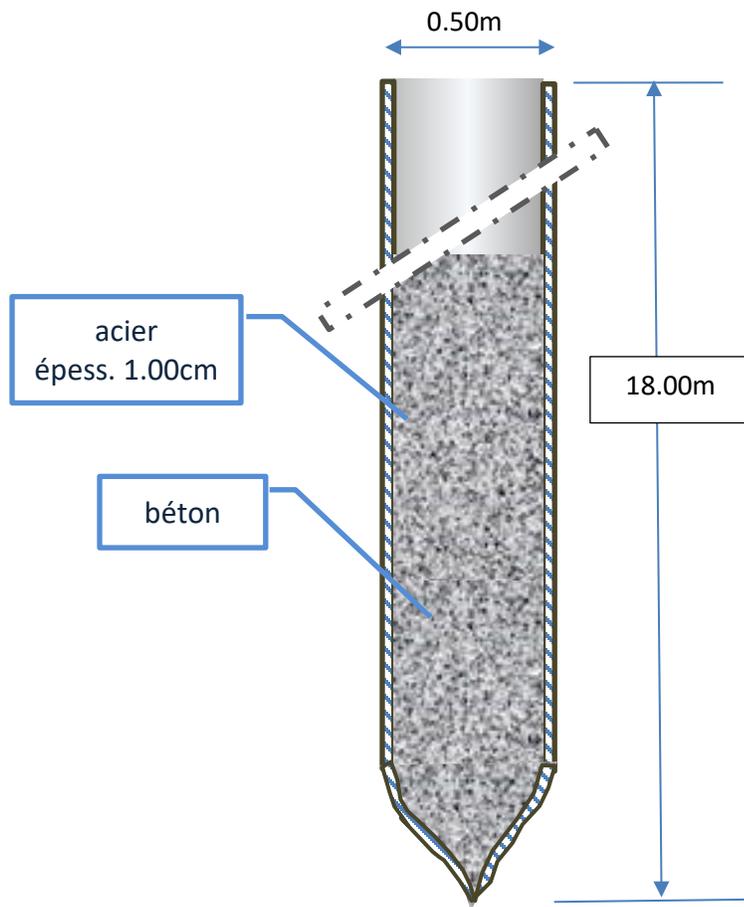
Tableau #8.- Charges transmises aux fondations

CHARGES									
Poids mort mur	217.75 t			Surcharge due au trafic	55 t				
Poids mort semelle	162 t			Force de freinage	2.75 t				
Poids superstructure	22.50 t			Force de butée	23.62595 t				
Poids des terres	363.609 t			Comp. horiz. pousse des terres	161.59 t				

2. Calcul de vérification des pieux du nouveau pont

Dans la phase préliminaire de l'étude, seul le calcul de vérification des nouvelles infrastructures a été réalisé, en tenant compte de l'expérience acquise sur le terrain, et des ouvrages similaires construits.

Les pieux, $d=50\text{cm}$ épess. $1,00\text{cm}$, avec pointe aplatie et remplissage en béton, étaient pourvus de type battu et fixés à une profondeur de $18,00\text{m}$, selon les indications fournies par les sondages et par le SPT.



Les calculs du pieu, effectués avec la formule de Dorr, en appliquant un coefficient de sécurité de « 3 », donnent une charge limite par pieu égale à $1,344\text{ kN}$, (134 tonnes), tandis que, avec un coefficient de sécurité de 3, la charge effective applicable est de 448 kN (45 tonnes).

Le calcul a été envisagé avec un pieu en acier et un remplissage en béton, même si, à proprement parler, le poids du remplissage diminue la capacité portante du pieu, mais augmente sa solidité et sa résistance en cas de tremblement de terre.

En tenant compte du poids global du système, qui devrait être d'une valeur proche de 500 tonnes (200 tonnes de tablier, y compris les poutres de support en acier, et 150 tonnes chacune des coulées complètes avec les semelles), et une surcharge d'environ 150 tonn, on obtient prudemment huit poteaux pour chaque côté du pont.

Calcul Pieux en acier D=51cm, épess. 1cm, rempli de Béton

rev2

- Q_{max} Charge max permis sur le pieu
- Q_{lim} Charge limite sur le pieu
- W_p Poids du pieu
- R_a Poussée résistante latérale globale des terres sur le pieu
- R_b Poussée résistance des terres à l'estremité inferieure du pieu

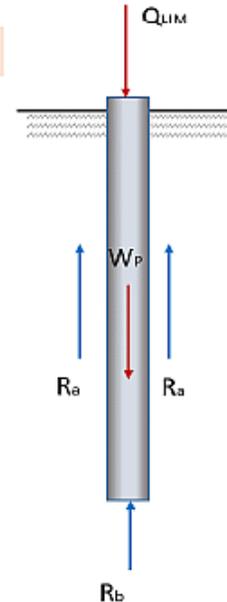
$$Q_{LIM} + W_p < R_a + R_b$$

Formule de Dörr (2)

$$Q_{lim} = [\gamma * 1/4 * \pi * D^2 * h_x * tg^2(45^\circ + \varphi/2)] + [\gamma * tg\varphi_1 * \pi * D * h_x * (\Delta + h_x/2) * (1 + tg^2\varphi)]$$

SVP remplir les fenêtres jaunes

	sol	épaisseur	φ	γ	f
couche 1	Grave sablo-limon	2.00	35	17	0.1
couche 2	Limon-arg. sabl.	8.00	29	18	0.35
couche 3	Grave sablo limon.	2.25	35	18	0.3
couche 4	Limon sableux	1.50	30	17.5	0.3
couche 5	Limon argilo sableux	4.55	28	18	0.35
couche 6					
couche 7					
couche 8					
couche 9					
couche 10					
			30.226776	17.849727	0.312432



section du pieu: (remplir une seule ligne)		coupe		périmètre	
D	si circulaire entrer le diamètre en m	0.00	0.00	0.00	m
L	si carrée entrer le côté en m		0.00	0.00	m
ω	si generique: entrer section en m ² - périmètre en m	0.19	0.19	1.60	m
		0.19		1.60	m

h	18.00	m	profondeur totale du pieu en dessous de la terre
Δ		m	différence de hauteur entre plan de campagne et surface superieure de la couche "X"
ω	0.19	m ²	coupe du pieu ($\pi * D^2 / 4$)
p	1.60	m	périmètre de la coupe du micropieu ($D * \pi$)
γ	18.00	kN/m ³	poids spécifique de la terre
φ	30	°	angle de frottement intérieure
φ_1	33	°	angle de frottement terre-pieu
f	0.31		coefficient de friction intérieure
Psb	78.00	kN/m ³	poids spécifique du material du pieu (25 béton - 78 acier)
Wp	21.29	kN	poids acier
Pbet	83.77	kN	poids béton
Ptot	105.05	kN	poids du pieu

Acier

pieu diametro	0.508
épaisseur	0.010
surface	0.015
périmètre	1.596

Béton

pieu diametro	0.489
surface	0.188
périmètre	1.535

R_a	126475.45 kg	→	1264.75	kN	résistance latérale	87.29%
R_b	18413.142 kg	→	184.13	kN	résistance à la pointe du pieu	12.71%
Q_{am}	144888.59 kg	→	1448.89	kN	charge verticale de calcul	→ 144.89 tonn
					charge verticale limite du pieu	→ 1343.83 kN

cx securité = 3 → $Q_{max} = (Q_{lim} - P_{tot}) / cx \text{ secur.} = 447.94$ kN → 44.79 tonn ← charge possible sur chaque pieu

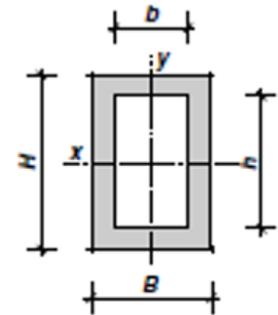
solicitation de l'acier :					
σ_b	=	Q_{lim} / ω_t	=	447.94 / 0.02	= 29545.21 kN/m ² → 295.45 kg/cm ²

3. Calcul de vérification des poutres porteuses du nouveau pont

La possibilité d'utiliser l'acier comme structure portante du pont, avec une poutre d'environ 33 mètres, garantit la durabilité du matériau, s'il est correctement protégé depuis sa construction, et si un travail d'entretien minutieux constant est ensuite effectué dans le temps. Un calcul de vérification a été effectué en attendant le développement de la conception.

PONT 1

Calcul poutre simplement penché



longueur de la poutre	l	=	33.40	m
épaisseur dalle	s	=	0.20	m
largeur du pont	la	=	5.00	m
truttoir	tr	=	0.20	m ²
surcharge	qs	=	45000.00	N/m
24.5 KN/m ³ ⇒ charge du béton			24500	N/m ³
charge	q	=	74400	N/m

$$W_x = \frac{B \cdot H^3 - b \cdot h^3}{6 \cdot H}$$

$$W_y = \frac{H \cdot B^3 - h \cdot b^3}{6 \cdot B}$$

A	=	b x h	Surface de la section
N			Effort normal
σ	=	M / W	≤ σ_{am} tension normale interne
σ_{am}			tension normale admissible
Δl			déformation
E			module d'élasticité normal
I			moment d'inertie barycentrique
I_x		$(B \times H^3 - b \times h^3)/12$	

W	=	I / y	moment d'inertie	(cm ³ o mm ³)
W_x	=	I / y	=	$b \times h^2 / 6$ moment d'inertie rectangle
W_x	=		=	$(B \times H^3 - b \times h^3) / 6 \times H = 0.045176753$
σ	=	N / A	≤	σ_{lim}
σ_{lim}	=	440		MPa
I	=	7582100		cm ⁴ Moment d'inertie du profilé
E_{fe}	=	210000		Mpa Module di elasticité ou de young

M/W=

σ_e	=	M / W	=	229.65	MPa	≤	440	Mpa	verifié
$(I/V)_x$	≥	M_{fx} / σ_e	=	45176.75				module de résistance	0.281009

Force de coupe	A	=	B	=	$q \times l / 2$	1242480 N	flèche maximale
flèche	f	=	$5 \times q \times l^4 / 384 \times J \times E$	=	0.000757	≤	0.167 = l/200

verifié

4. Estimation des vibrations

Pour estimer une vibration, on peut choisir de mesurer le déplacement ou ses dérivées première et seconde, la vitesse et l'accélération. Le choix du paramètre à mesurer dépend de la gamme de fréquences du phénomène. Par rapport à une seule harmonique, quel que soit le paramètre considéré, la forme et la période de la vibration restent inchangées, tandis qu'une variation d'amplitude et de phase se produit.

Il a donc été décidé d'utiliser un accéléromètre pour évaluer l'amplitude des oscillations auxquelles le pont est soumis. Sur la base des valeurs obtenues, il est possible d'évaluer la résistance actuelle du pont, le degré de fluage de l'acier, et d'obtenir des indications sur le potentiel résiduel de la capacité portante et d'une éventuelle réutilisation de l'infrastructure.

Ci-dessous les paramètres utilisés pour l'accéléromètre :

Axe x → de gauche à droite

Axe y → du bas de l'instrument vers le haut

Axe z → vers le spectateur

R → est la mesure de l'amplitude de l'accélération, la même dans toutes les directions

Θ → indique l'inclinaison de l'instrument dans le plan x-y

φ → le long de l'axe « z »

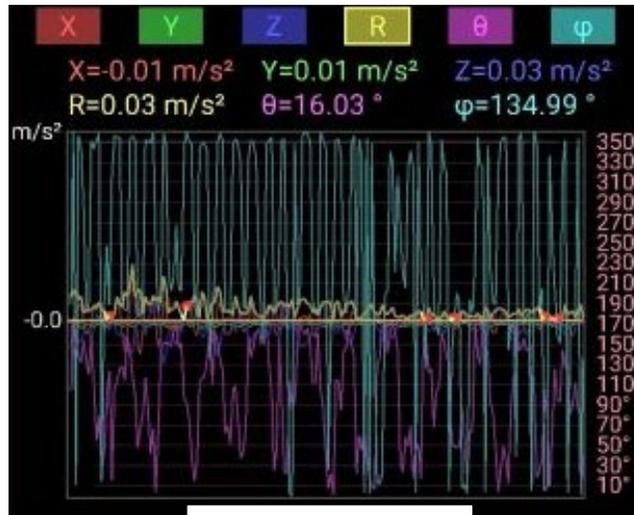
Le graphique, à échelle variable, indique la variation de l'accélération et de l'angle dans le temps. L'effet de la gravité est inclus.

L'accélération complexe est comprise entre $0.03 \div 0.05$ m/sec². Cette valeur élevée fortement pulsatoire, comparée aux accélérations détectées selon les autres axes (x, y, et z), montre que le pont est significativement affecté par les sollicitations des poids lourds, sous forme de vibrations.

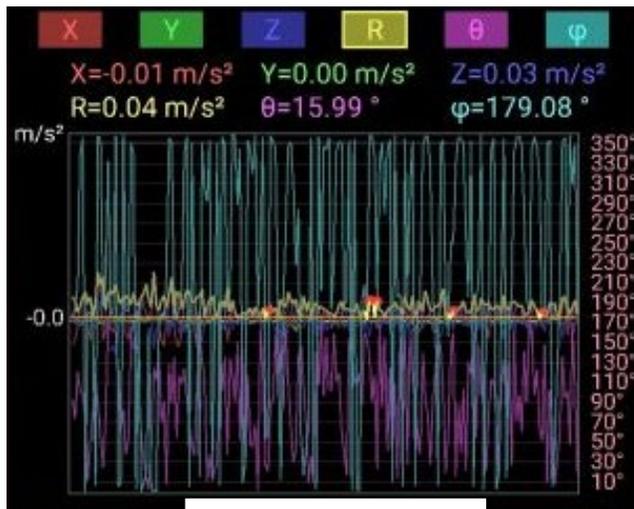
L'acier dont est constituée la structure portante du pont est affecté au fil du temps par des contraintes cycliques sous forme de fluage permanent. De cette façon, on comprend bien le pourquoi de la flèche résiduelle permanente de 6 cm, mesurée au milieu du pont.

Il est à noter que le type de support des extrémités du pont, réalisé avec des plaques métalliques au lieu des plus utilisés coussins en néoprène ou élastomère, favorise les phénomènes de résonance et empêche l'amortissement des vibrations.

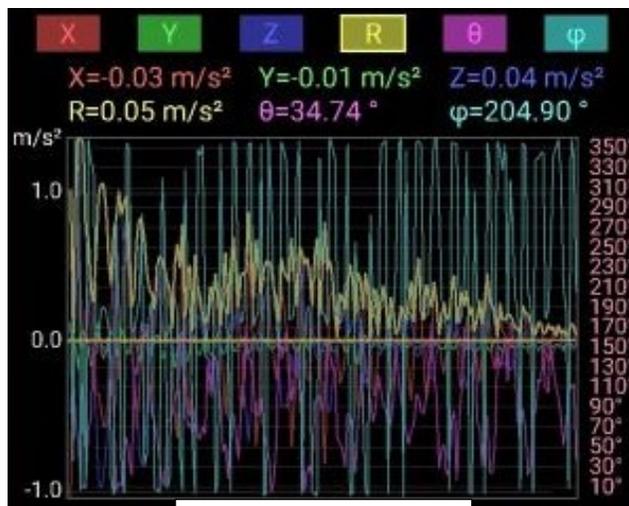
De plus, il faut dire qu'une partie des contraintes pulsatoires est déchargée sur les vis et les boulons, une situation qui peut donner une explication probable au matériel manquant dans de nombreuses parties du pont.



mesure sur 33 sec.



mesure sur 48 sec.



mesure sur 68 sec.

5. Amplification dynamique

Pour le projet d'un pont neuf les prescriptions établies par "American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)" proposaient déjà en 1931 une amplification dynamique en fonction de la longueur du pont avec une valeur maximale de 0.25.

Le code AASHTO actualisé en 1992 mentionnait que les charges utiles routières devaient être augmentées pour le calcul des éléments structuraux de la superstructure et des piles pour tenir compte des effets dynamiques dus aux vibrations et aux chocs et que la valeur de l'incrément "impact allowance or increment" était exprimée comme une fraction des contraintes des charges utiles et devait être déterminée par la relation suivante

$$I = 15.24/L + 38.1 \quad (L = \text{portée en m} = 33.63 \text{ m}) = 0.21$$

De plus, l'amplification dynamique I "impact fraction" était limitée à la valeur maximale de 0.3. Dans la dernière révision du code AASHTO de 1994, la charge vive spécifiée est considérée comme une combinaison du véhicule standard HS20 et d'une charge uniformément distribuée de 9.8 kN/m. L'amplification dynamique "Dynamic Load Allowance" est exprimée comme une constante simple égale à 0.33 qui majore l'effet du véhicule seulement.