

## **Etude comparative économique-structurale d'une poutre en treillis de type Warren et d'une poutre Vierendeel comme structure porteuse d'un pont de portée 30 mètres sur la rivière Kahira à Sake, Goma, dans le Nord Kivu en République Démocratique du Congo (RDC)**

### **[ Comparative economic-structural study of a Warren truss girder and a Vierendeel girder as main beams for a 30-meter span bridge on the Kahira river in Sake, Goma, North Kivu, Democratic Republic of Congo (DRC) ]**

**Amadou MOUNDOM<sup>1</sup>, Patient KUBUYA BINWA<sup>2</sup>, Michel MBESSA<sup>3</sup>, Cobler STEEVEN TAMENYA<sup>4</sup>, François NGAPGUE<sup>5</sup>, and Thomas TAMO TATIETSE<sup>6</sup>**

<sup>1</sup>Chargé de Cours en Génie Civil, Département du Génie Rural, Faculté d'Agronomie et des Sciences Agricoles, Université de Dschang, BP 222, Dschang, Région de l'Ouest, Cameroon

<sup>2</sup>Assistant et Etudiant de Troisième Cycle en Génie Civil, Département de Génie Civil, Faculté de Sciences et Technologies Appliquées, Université Libre des Pays des Grands Lacs, BP. 368 GOMA, RD Congo

<sup>3</sup>Maître de Conférences en Génie Civil, Département du Génie Civil, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique de Yaoundé 1, Université de Yaoundé I, Cameroon

<sup>4</sup>Ingénieur de Génie Civil, Département de Génie Civil, Faculté de Sciences et Technologies Appliquées, Université Libre des Pays des Grands Lacs, BP. 368 GOMA, RD Congo

<sup>5</sup>Professeur Titulaire en Génie Civil, Département de Génie Civil, Institut Universitaire de Technologie Fotso Victor de Bandjoun de l'Université de Dschang, Laboratoire du LISIE, BP 134 Bandjoun, Cameroon

<sup>6</sup>Professeur Titulaire HDR en Génie Civil, Département du Génie Civil, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique de Yaoundé 1, Université de Yaoundé I, Cameroon

---

Copyright © 2022 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**ABSTRACT:** The present work proposes an economic-structural study of a bridge girder with two variants: the metallic Vierendeel girder and the Warren type steel truss girder formed of top and bottom chords and diagonals in order to propose the girder that fulfills the conditions of Ultimate Limit State (ULS), Serviceability Limit State (SLS) and economically profitable for the bridge over the Kahira River in Sake, Goma in the Capital of North Kivu in the Democratic Republic of Congo (DRC). In order to analyze structural elements, the French method of loads on bridges was used, the Naylor method derived from the Cross moment distribution method was used for the analysis of the Vierendeel girder, the method of joints and method of sections for the Warren truss girder; the French code «Béton Armé aux Etats Limites 91 modified 99» was used for the design of the reinforced concrete parts; the Eurocode 3 and the «Construction Métallique 66 (CM66) » were used to determine the cross-sectional area of different elements of the steel girder. An economic study was carried out passing the bill of quantities and cost estimate for each type of beam giving a total of \$2485.1 for the Vierendeel beam, a total of \$5866.95 for the Warren truss beam, the total cost of the Vierendeel beam representing 42.36% of the total cost of the Warren truss beam. The Vierendeel girder meeting the structural and economic conditions is proposed for the bridge over the Kahira River in Sake.

**KEYWORDS:** Vierendeel steel beam, Warren truss beam, reinforced concrete, unknowns, design, economic study.

**RESUME:** Le présent travail propose l'étude économico-structurale d'une poutre porteuse de pont avec deux variantes à savoir: la poutre Vierendeel métallique et la poutre en treillis métallique de type Warren formée des membrures et des diagonales afin de proposer la poutre qui remplit les conditions d'Etat Limite Ultime (ELU), Etat Limite de Service (ELS) et Economiquement rentable pour le pont sur la rivière Kahira à Sake, Goma dans la Capitale du Nord Kivu en République Démocratique du Congo (RDC). En vue de déterminer les éléments de réduction, la méthode française de charges sur les ponts est utilisée, la méthode de Naylor dérivée de la méthode de Cross a été utilisée pour l'analyse de la poutre Vierendeel et les méthodes de nœuds et de sections pour la poutre en treillis; Le Béton Armé aux Etats Limites 91 modifié 99 a été utilisé pour le dimensionnement des parties en béton armé; L'Eurocode 3 et la Construction Métallique 66 (CM66) ont été utilisés pour déterminer les sections des différents éléments de la poutre métallique. Une étude économique a été réalisée passant le devis quantitatif et estimatif pour chaque type de poutre donnant 2485.1 \$ pour le coût total de la poutre Vierendeel 5866.95 \$ pour le coût total de la poutre en treillis, le coût total de la poutre Vierendeel représentant 42,36% du coût total de la poutre en treillis. La poutre Vierendeel remplissant les conditions structurales et économiques est proposée pour le pont sur la rivière Kahira à Sake.

**MOTS-CLEFS:** Poutre Vierendeel métallique, poutre en treillis métallique de Warren, béton armé, éléments de réduction, dimensionnement, étude économique.

## **1 INTRODUCTION GENERALE**

### **1.1 CONTEXTE**

Le développement économique d'un Etat passe par l'amélioration des conditions de ses infrastructures en général, et en particulier des infrastructures routières. Cela étant, les pays dits développés sont ceux possédant des infrastructures routières continues, et d'autres dits sous-développés comme étant ceux présentant des infrastructures routières non continues. La discontinuité est souvent due à des cours d'eau et des vallées coupant des tracés routiers.

Dans le but de franchir ces obstacles avec des moyens limités, les ingénieurs sont appelés à faire des choix structuraux présentant des avantages économiques considérables. C'est dans ce cadre que nous avons cherché à comparer deux types de poutres pouvant être utilisées dans les ponts, sachant que les poutres les plus répandues dans les pays en voie de développement dans les ponts sont des poutres en treillis. Il existe un autre type de pont ayant comme poutre porteuse la poutre Vierendeel, qui présenterait assez d'avantages structuraux comme économiques que celle en treillis. C'est donc dans cet esprit que nous voulons réaliser une étude comparative économico-structurale d'une poutre de pont en treillis et poutre Vierendeel comme structure porteuse d'un pont sur la rivière Kahira où existent trois ouvrages dont deux sont en bois, de tonnage limite non précisé et l'autre en acier de 30 m de portée et de 3.4m de largeur.

### **1.2 OBJECTIF DU TRAVAIL**

L'objectif principal de ce travail est de faire une étude comparative économico-structurale entre la poutre Vierendeel et la poutre en treillis travaillant dans les conditions d'un pont poutre de moins de 50 mètres de portée comme c'est le cas pour le pont Kihira à Sake, Goma dans le Nord Kivu en RDC.

## **2 REVUE DE LA LITTERATURE**

Des travaux antérieurs existant dans le domaine, on note que:

- Ben Ouédou (2008) a étudié toutes les charges des ponts et dimensionné les ponts à poutres à travées indépendantes;
- Krishna Raju (2018) a étudié et dimensionné des buses, dalots, et ponts en béton armé, ponts en béton précontraint avec détermination des sections d'armature ainsi que le calcul des ponts métalliques;
- Charon (1981) et Charon (1983) ont étudié et dimensionné les ponts à poutres droites en béton armé ainsi que les systèmes de charge A et B pouvant s'appliquer aux ponts;
- Krishna Raju (2005) a étudié et dimensionné les poutres Vierendeel et les poutres en treillis en béton armé ainsi que la détermination des différentes sections d'armature;

- Charon (1983) a utilisé la méthode approchée et Krishna Raju (2005) a utilisé la méthode de Cross telle que développée par Charon (1982), pour le calcul des poutres Vierendeel;
- Husson (2002) a étudié les éléments porteurs d'une structure en béton armé et déterminé les différentes sections d'armature;
- Maitre (1997) a étudié et déterminé les aciers pour les éléments porteurs d'une structure métallique selon Construction Métallique 66 (CM 66) et Eurocode 3;
- Morel (2005) a étudié et déterminé les aciers pour les éléments porteurs d'une structure métallique selon Eurocode 3;
- Coates et al (1987) ont déterminé les éléments de réduction d'une structure ainsi que les déplacements pouvant se produire à une abscisse donnée de la structure.

Les travaux antérieurs portent sur les ponts à poutre Vierendeel et les poutres en treillis séparément et non pas sur les deux types de ponts à la fois sur la rivière Kahira en RDC ainsi que l'étude de l'aspect économique: D'où l'intérêt de ce travail.

### 3 MATERIELS ET METHODES

Nous présentons la localisation du site du pont et la méthodologie utilisée pour analyser les poutres et tablier ainsi que la détermination des armatures de béton armé et les profilés pour chaque composante des poutres.

#### 3.1 LOCALISATION DU SITE

Le territoire de Masisi est une entité décentralisée de la province du Nord-Kivu reliant le Nord et le Sud-Kivu par voie terrestre; il partage également ses limites avec la ville de Goma, Chef-lieu de la province et les territoires de Rutshuru, de Masisi et de Walikale.

En effet, cette liaison est rendue possible grâce à la traversée de ce territoire par la route nationale numéro deux (RN2). La figure 1 montre la situation de Sake, traversée par la rivière Kihira site de construction du pont.



**Fig. 1.** Localisation de Sake traversé par la rivière Kihira en bleu

Ce territoire possédant une hydrographie complexe, cette route va souvent être coupée par une rivière dénommée Kihira au point des coordonnées:

- Latitude: 1°34'28.47756" Sud
- Longitude: 29°3'55.76004" Est
- Altitude: 4870 m

La précision de l'appareil utilisé est de 5m.

### 3.2 ETAT DES LIEUX

En effet, les traversées actuelles de Kihira se font par 3 ouvrages qui y sont érigés. Deux sont en bois, de tonnage limite non précisé et l'autre en acier de 30m de portée et de 3.4m de largeur. Etant donné l'importance de cette route, certaines normes devraient être prises en compte dans la conception de ce pont. La figure 2 présente l'ouvrage avec poutres en acier sur culée en béton sur la rivière Kahira et la figure 3 présente l'ouvrage en bois sur culée en gabions sur la rivière Kahira.



*Fig. 2. Ouvrage avec poutres en acier sur culée en béton sur la rivière Kahira*



*Fig. 3. Ouvrage en bois sur culée en gabions sur la rivière Kahira*

### 3.3 MÉTHODES

Les méthodes suivantes ont été utilisées dans le présent travail:

La détermination des éléments de réduction de la poutre en treillis est effectuée par la méthode de nœuds et celle des sections telle que développée par Coates et al (1987);

La détermination des éléments de réduction de la poutre Vierendeel est effectuée par la méthode de Naylor adaptée de la méthode de Cross (1982) et développée dans Krishna Raju (2005);

La détermination des différentes sections d'acier de nuance 235 des éléments porteurs des poutres métalliques en treillis et Vierendeel ainsi que des entretoises en acier espacées de 5 m est effectuée suivant Maître (1997) et Morel (2005);

Les flèches au centre des différentes poutres sont déterminées par le Théorème de MÜLLER-BRESLAU (formule de MOHR), Théorème décrit dans Delaplace et al. (2008) et les flèches déterminées par l'équation 1:

$$\delta_p = \int_{Structure} \left( \frac{Mm}{EI} + \frac{Nn}{ES} + \frac{Vv}{GS_R} \right) ds \quad (1)$$

Où:

- $\delta_p$  représente le déplacement ou la rotation,
- M, N et V représentent les efforts intérieurs associés au chargement extérieur,
- m, n et v représentent les efforts intérieurs associés causés par une charge unitaire appliquée dans le sens du déplacement,
- E, S, G et  $S_R$  sont respectivement le module d'Young du matériau, l'aire de la section de chaque élément de la structure, le module de cisaillement et la section réduite en cisaillement.

La flèche maximale f (m) de chacune des poutres de portée L (m) est donnée par l'équation 2:

$$f = \frac{L}{500} \quad (2)$$

Les culées et le tablier de 20 cm en béton armé sont dimensionnées conformément au BAEL 91 modifié 99 avec une densité de béton de 24 kN/m<sup>3</sup>, une résistance caractéristique de béton à 28 jours 30 MPa et une limite de rupture des armatures de FeE400 (400 MPa);

Les différents assemblages sont réalisés suivant Maître (1997) et Morel (2005);

En ce qui concerne les charges sismiques, il est convenable d'utiliser les appareils d'appuis pour isoler l'infrastructure de la superstructure: Ainsi, tout mouvement ondulatoire du sol sera en phase avec les culées, dès que les culées sont en mouvement, les appareils d'appuis amortiront le mouvement oscillatoire et la superstructure ne sera pas affectée par les charges sismiques.

Le système français de charge d'exploitation est utilisé dans ce travail pour le pont de largeur roulable 7m (2 x 3,5m), donc de classe 1, d'accotement 2 x 1,5 m et de portée 30 m, de hauteur de poutre 4 m. Ainsi les surcharges suivantes sont étudiées: Surcharge A (L), Système B<sub>c</sub>, Système B<sub>t</sub>, Système Br, Surcharge militaire MC120, Charge exceptionnelle D240, Surcharges sur trottoirs, Surcharges dues au vent, Efforts de freinage.

Le revêtement hydrocarboné a une épaisseur de 8 cm et une densité de 24 kN/m<sup>3</sup>.

La pression dynamique normale de base et la pression dynamique extrême de base dans la zone d'étude obtenues auprès du service météo du Nord Kivu capitale de la zone d'étude sont respectivement de 90 et 157,5 daN/m<sup>2</sup>.

## 4 RESULTATS ET INTERPRETATIONS

### 4.1 SURCHARGE DE DIMENSIONNEMENT

Après examen de toutes les surcharges, la surcharge B<sub>c</sub> est celle qui a produit les effets les plus défavorables et est donc considérée pour le dimensionnement.

### 4.2 ELEMENTS DE REDUCTION DE LA POUTRE EN TREILLIS DE TYPE WARREN

Les éléments de réduction de la poutre en treillis de type Warren sont présentés dans le tableau 1:

Tableau 1. Efforts des familles des barres

Elément du treillis	Efforts maximaux (kN)
Corde inférieure	-913.16
Corde supérieure	2141.15
Diagonale	-1241.29

Les valeurs du tableau 1 sont conformes à celles déterminées par Krishna Raju (2005) et Charon (1983). Les éléments de la corde supérieure seront calculés comme supportant un effort de compression, ceux de la corde inférieure comme supportant un effort de traction tandis que les diagonales le seront comme supportant un effort axial de traction.

#### 4.3 ELEMENTS DE REDUCTION DE LA POUTRE VIERENDEEL

Les éléments de réduction de la poutre Vierendeel sont présentés dans le tableau 2:

Tableau 2. Nœud de la poutre Vierendeel avec moment maximal et barres avec effort normal maximal

Elément de la poutre	Force de compression axiale (kN)	Force de traction axiale (kN)	Moment fléchissant (kN.m)	Effort tranchant (kN)
Membrane supérieure	1349,03	-	2602,67	769,8
Membrane inférieure	-	507,11	2602,67	769,8
Montant	769,8		1698,74	1349,03

Les valeurs du tableau 2 sont conformes à celles déterminées par Krishna Raju (2005) et Charon (1983). Les éléments de la membrane supérieure seront calculés comme supportant un effort de compression et un moment, ceux de la membrane inférieure comme supportant un effort de traction et un moment tandis que les montants le seront comme supportant un effort axial de compression et un moment.

#### 4.4 SECTION DES PROFILS EN ACIER RETENUES POUR LES ÉLÉMENTS DES POUTRES EN TREILLIS ET VIERENDEEL

Les calculs de structure donnent les différents profilés et boulons pour la réalisation de la poutre Vierendeel et la poutre en treillis de type Warren comme présentés dans le tableau 3:

Tableau 3. Différents profilés et boulons pour la poutre Vierendeel et la poutre en treillis

Profilés et boulons	Destination
IPE 200 (26.2 kg/m)	Poutre Vierendeel (Membrane supérieure et membrane inférieure)
HEB 120 (26.7 kg/m)	Poutre Vierendeel (Deux montants placés aux extrémités pour limiter le gabarit du pont et ne rentrant pas dans les calculs)
HEB 200 (61.3 kg/m)	Poutre en treillis (Corde supérieure et corde inférieure)
IPE 330 (49.1 kg/m)	Poutre en treillis (Montants)
HEB 140 (33.7 kg/m)	Poutre en treillis (Diagonales)
Boulon M16, Classe 10.9	Poutre Vierendeel et poutre en treillis (Assemblages)

Le tableau 3 montre que les cordes supérieure et inférieure de la poutre en treillis de masse linéaire 61,3 kg/m sont plus lourdes que les membrures supérieure et inférieure de la poutre Vierendeel de masse linéaire 26,2 kg/m impliquant aussi que la poutre en treillis de type Warren est plus lourde que la poutre Vierendeel.

#### 4.5 FLECHES AU CENTRE DE CHAQUE POUTRE

Les flèches au centre des poutres sont présentées dans le tableau 4:

**Tableau 4. Flèches au centre des poutres**

Poutre	Flèche au centre (cm)	Flèche maximale (cm)
En treillis de type Warren	5,8	6
Vierendeel	1,393	6

Le tableau 4 montre que les flèches au centre de chaque poutre sont inférieures à la flèche maximale de 6 cm.

#### 4.6 ETUDES ÉCONOMIQUES

L'étude du coût des deux choix de construction est présentée dans le tableau 5 pour la poutre Vierendeel et dans le tableau 6 pour la poutre en treillis de type Warren.

**Tableau 5. Devis quantitatif et estimatif d'acier pour la réalisation de la poutre Vierendeel**

N°	Désignation	Unité	Quantité	P. U. [\$]	P. T. [\$]
1	IPE 200	tonne	1.572	820	1289.04
2	HEB 120	tonne	0.9345	820	766.26
3	Boulon M 16, classe 10.9	unité	140	3.07	429.8
	<b>TOTAL</b>				<b>2485.1</b>

**Tableau 6. Devis quantitatif et estimatif d'acier pour la réalisation de la poutre en treillis**

N°	Désignation	Unité	Quantité	P. U. [\$]	P. T. [\$]
1	IPE 330	tonne	2.946	820	2415.72
2	HEB 140	tonne	1.1795	820	967.19
3	HEB 200	tonne	2.61	820	2140.2
4	Boulon M 16, classe 10.9	unité	112	3.07	343.84
	<b>TOTAL</b>				<b>5866.95</b>

- $C_{\text{VIERENDEEL}}$  = Coût total de la poutre Vierendeel = 2485.1 \$
- $C_{\text{TREILLIS}}$  = Coût total de la poutre en treillis = 5866.95 \$
- Le coût total de la poutre Vierendeel est de 42,36% du coût total de la poutre en treillis
- $C_{\text{TOTAL}}$  = Somme de  $C_{\text{TREILLIS}}$  et  $C_{\text{VIERENDEEL}}$  = 8352.05 \$

En déterminant le rendement qui est le rapport du coût d'une poutre au coût nous donne:

$$R_{\text{treillis}} = 70.24 \%$$

$$R_{\text{vierendeel}} = 29.76 \%$$

En considérant le coût total, la poutre Vierendeel consomme 29.76 % du total, quand la poutre en treillis en consomme 70.24 % pour la même résistance.

## 5 CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Le présent travail propose l'étude économico-structurale d'une poutre porteuse de pont avec deux variantes à savoir: la poutre Vierendeel métallique et la poutre en treillis métallique de type Warren formée des membrures et des diagonales afin de proposer la poutre qui remplit les conditions d'Etat Limite Ultime (ELU), Etat Limite de Service (ELS) et Economiquement rentable pour le pont sur la rivière Kahira à Sake, Goma dans la Capitale du Nord Kivu en RDC. En vue de déterminer les éléments de réduction, la méthode française

de charges sur les ponts est utilisée, la méthode de Naylor dérivée de la méthode de Cross a été utilisée pour l'analyse de la poutre Vierendeel et les méthodes de nœuds et de sections pour la poutre en treillis; Le Béton Armé aux Etats Limites 91 modifié 99 a été utilisé pour le dimensionnement des parties en béton armé; L'Eurode 3 et la Construction Métallique 66 (CM66) ont été utilisés pour déterminer les sections des différents éléments de la poutre métallique. Une étude économique a été réalisée passant le devis quantitatif et estimatif pour chaque type de poutre donnant 2485.1 \$ pour le coût total de la poutre Vierendeel 5866.95 \$ pour le coût total de la poutre en treillis, le coût total de la poutre Vierendeel représentant 42,36% du coût total de la poutre en treillis. La poutre Vierendeel remplissant les conditions structurales et économiques est proposée pour le pont sur la rivière Kahira à Sake. Cette étude s'est concentrée sur les poutres qui sont les éléments prépondérants d'un pont à poutres. Cette étude peut être étendue à d'autres types de poutre Warren.

#### REFERENCES

- [1] Ben Ouédou, M., Cours d'ouvrages d'art, tome 2 (Dimensionnement), Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, 2008, 155p.
- [2] Charon, P., Calcul des ouvrages en béton suivant les règles B.A.E.L. 80 (Théorie et applications), Eyrolles, Paris, 1981, 470p.
- [3] Charon, P., La méthode de Cross et le calcul pratique des constructions hyperstatiques (Théorie et applications), Eyrolles, Paris, 1982, 320p.
- [4] Charon, P., Calcul et la vérification des ouvrages en béton armé (Théorie et applications), Règles CCBA 68, Dixième Edition (Nouveau tirage), Eyrolles, Paris, 1983, 640p.
- [5] Coates, R. C., Coutie, M. G. and Kong, F. K., Structural Analysis (Third Edition), Van Nostrand (UK) Co. Ltd, Molly Millars Lane, Wokingham, Berkshire, England, 1987, 605p.
- [6] Delaplace, A., Gatuingt, F. et Ragueneau, F., Mécanique des structures (Resistance des matériaux), Dunod, Paris, 2008, 230p.
- [7] Husson, J. M., Etude des structures en béton (BAEL 91 révisé 99), Casteilla, Paris, 2002, 248p.
- [8] Krishna Raju, N., Advanced Reinforced Concrete (2nd Edition), CBS Publishers & Distributors, New Delhi, 2005, 353p.
- [9] Krishna Raju, N., Design of Bridges (Fifth Edition), Oxford & IBH Publishers, New Delhi, 2017 (Reprinted 2018), 666p.
- [10] Maître, P., Formulaire de la construction métallique, Règles CM66 plus additif, Eurocode 3, Le Moniteur, Paris, 1997, 459p.
- [11] Morel, J., Calcul des structures métalliques selon l'Eurocode 3, Première Edition (Sixième tirage), Eyrolles, Paris, 2005, 331p.