

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique d'Alger



Département de génie civil

Mémoire de Master

Thème :

**Étude paramétrique sur la
conception d'un pont bowstring**

Rédigé par :

SAIDANI Amar

Soutenu le 14 Octobre 2015 devant le jury :

Président	M. BALI	Professeur ENP
Promotrice	Mme KETTAB Ratiba	Professeure ENP
Co-promoteur	Mr CHABNI Rachid	Ingénieur ANESRIF
Examineurs	Mme CHERRID Djamila	Maître assistante classe A ENP
	M. LAKHAL Saadi	Maître assistant Classe A ENP

Promotion : Juin 2015

Ecole Nationale Polytechnique : 10, Avenue Hassen Badi 16200 El-Harrach, Alger.

ملخص:

الغرض من هذا العمل هو تصميم و دراسة جسر للسكك الحديدية من نوع قوس مقسم الى مقطعين، حاملا سطح مختلط بطول اجمالي يصل الى 105م. تمت الاستعانة بالبرنامج ميداس سيفيل في تحديد النموذج و تقدير الافعال و القوى المؤثرة، اما تبرير المقاطع العرضية فتم على حساب قواعد أورو كود 3 و 4. **الكلمات المفتاحية:** جسر السكك الحديدية، جسر على شكل قوس ، ميداس سيفيل.

Résumé :

Le but de ce travail est l'analyse du comportement d'un pont rail en arc type bow-string, composé de deux travées et portant un tablier mixte d'une longueur totale de 105m pour 11,6m de largeur, sous différentes conceptions.

Cette étude est destinée à varier la flèche de l'arc et de constater les variations des efforts engendrés dans les éléments de l'ouvrage.

La modélisation et le calcul des sollicitations ont été faits à l'aide du logiciel MIDAS Civil 2015, et la vérification des sections face aux contraintes et aux phénomènes d'instabilité s'est faite conformément au règlement Eurocode 3 pour la structure métallique et l'Eurocode 4 pour le tablier mixte.

Mots clés : Pont rail, métallique, bow-string, arc, MIDAS Civil.

Summary:

The purpose of this work is the study of the behavior of a bowstring rail-bridge, composed of two spans and carrying a mixed apron an overall length of 105m for 11.6m of width. In different conceptions as we change the height of the arch.

This study is intended to change the height of the arch and comment the variation of the constraints in the different elements of the structure.

The modeling and calculation of stresses were made using the MIDAS Civil 2015 software and the verification of sections face the constraints and instability phenomena was done in accordance with Eurocode 3 for steel structure and Eurocode 4 for composite deck.

Key words: Bridge rail, metal, bowstring beam, arc, Civil MIDAS.

Remerciements

Tout d'abord, je remercie Dieu le tout puissant qui m'a donné la force et la santé pour accomplir mes études.

Je remercie mes parents, pour leur patience et leur soutien financier et moral, et sans lesquels je ne serais jamais arrivé là aujourd'hui.

Je voudrais témoigner ma grande reconnaissance envers Mme Pr. R. KETTAB, qui m'a donné l'opportunité d'effectuer ce travail et avoir mis en ma disposition tout ce dont j'avais besoin, en matière d'encadrement et d'orientation.

Mes vifs remerciements vont à Mr R. CHABNI, le directeur technique des ouvrages d'art, pour son soutien et son aide très précieuse, ainsi qu'à l'ensemble des employés de l'ANESRIF pour leur très bon accueil.

Enfin, je remercie toute personne ayant porté un regard critique sur mon travail et contribué de près ou de loin à son accomplissement.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à mon père tout particulièrement, à mère, mes frères Karim et Farid, à ma sœur Roza et notre petit bijoux Ikram, qui m'ont toujours accompagné et soutenu dans les moments où j'avais le plus besoin, vous êtes l'essence de ma vie.

Mes cousins et cousines, ces lignes sont pour vous témoigner toute ma reconnaissance et l'amour que je vous porte dans mon cœur, je pense particulièrement à Amel, Arezki et sa femme Thamilla, Nabila, Amar, Gaya, Said et mon frère Idir.

Je ne pourrai oublier de citer mes amis sans lesquels tout serait différent, oui je parle de toi Pedro, Amirouche, Ali, Ilies. Et toutes les merveilleuses personnes que j'ai eu la chance de connaître depuis Oran, Nassim, Nacer, Missi, Rabeh, Hakim, Roza, Namira, Fatima, Wissam et Saadia. Mon binôme et ami Sofiane, Rak mlihhh.

A tout ceux que j'aime et je respecte.

Amar

TABLES DES MATIERES

Introduction générale	2
Chapitre I	
1. Introduction	4
2. Conception de l'arc.....	4
2.1 Forme	4
2.2 Section transversale	5
3. Matériau et section	5
4. Les variantes.....	6
Chapitre II	
1. Introduction	8
2. Résultats de l'étude.....	8
2.1 Arc.....	8
2.2 Poutres longitudinales (principales).....	9
2.3 Poutres transversales.....	9
2.4 Suspentes.....	9
3. Observation premières.....	9
a) Arc.....	9
b) poutres longitudinales.....	10
c)poutres transversales.....	10
d) suspentes.....	10
4. Conclusion.....	10
Chapitre III	
1. Introduction	12
2. Vérification des éléments de la charpente.....	12
2.1 Arc	12
2.1.1 Caractérisation sectionnelles.....	12
2.1.2 Vérification à l'état limite ultime	12
a) Interaction tranchant-Moment fléchissant	12
b) Interaction effort axial-Moment fléchant.....	13
2.1.3 Vérification à l'état limite de service.....	13
2.1.4 Résultats.....	13
2.1.5 Observation.....	14
2.2 Poutres longitudinales (principales).....	14
2.2.1 Vérification à l'état limite ultime.....	14
a) Interaction tranchant-Moment fléchissant.....	14
b) Interaction effort axial-Moment fléchant.....	15
2.2.2 Vérification à l'état limite de service.....	15
2.2.3 Résultats.....	15
2.2.4 Observation	15
2.3 Poutres transversales.....	16
2.3.1 Vérification à l'état limite ultime.....	16
c) Interaction tranchant-Moment fléchissant.....	16
d) Interaction effort axial-Moment fléchant.....	16
2.3.2 Vérification à l'état limite de service.....	17
2.3.3 Résultats.....	17
2.3.4 Observation.....	17

2.4 Suspentes.....	17
2.4.1 Résultats.....	17
2.4.2 Observation.....	18
3. Conclusion.....	18
Conclusion générale	20

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Caractéristiques sectionnelles de l'arc.....	5
Tableau I.2 : Différentes variantes prise en compte.....	6
Tableau V.1 : Caractéristiques sectionnelles de l'arc.....	12
Tableau V.5 : Caractéristiques sectionnelles de la poutre longitudinale	14
Tableau V.6 : Caractéristiques sectionnelles de la poutre transversale.....	16

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION :

La conception des ouvrages d'art est un art en soi. Répondre à toutes les contraintes liées au contrat et aux règlements en vigueur pour concevoir un ouvrage qui va, à la fois, durer dans le temps et avoir un impact positif sur l'environnement, relève de la très grande technicité des ingénieurs en collaboration étroite avec les architectes.

Les ponts en particulier constituent un réel challenge pour nous les ingénieurs. S'agissant d'un pont métallique type bowstring, l'ouvrage offre une grande flexibilité aux concepteurs. A l'ingénieur d'en tirer profit.

La conception d'un pont bowstring, consiste à définir les sections des éléments de l'ouvrage, leur géométrie, liaisons et différentes dispositions de ces derniers.

Dans ce présent document, je vais m'intéresser à la conception d'un des éléments de cet ouvrage, en l'occurrence l'arc. Une étude paramétrique consiste à varier le rapport de la portée de l'arc à sa flèche. Cette variation aura une répercussion sur les efforts repris par l'arc et ceux transmis aux autres parties de l'ouvrage, qui nous permettra de définir laquelle de ces conceptions est la meilleure en terme de rendement.

Dans le premier chapitre, je vais donner une définition brève de l'arc ainsi que son pré dimensionnement dans l'ouvrage et les matériaux utilisés. Dans le but de répondre à cette problématique, six variantes seront choisies qui feront office d'une analyse lors des chapitres suivants. Le second chapitre traite les données obtenues lors de l'analyse, ainsi l'effort axial, le moment fléchissant et l'effort tranchant résultant dans chaque élément sont exposés sous forme de tableaux (et de graphes en annexe), une critique de ses données sera élaborée avant de passer à l'étude approfondie dans le chapitre suivant. Une étude statique exploitera ces données dans le troisième chapitre, et une conclusion générale viendra clore ce travail et donner l'avis de l'auteur.

Chapitre 01

Présentation de l'arc et définition des variantes

1. INTRODUCTION

Conformément aux dispositions données par l'ingénieur ayant le plus contribué au développement de ce type de ponts, le norvégien Per Tveit. A la fin des années 1950, l'ingénieur avait développées des formules expérimentales de conception et de calcul des ponts en arc, grande famille de ponts comportant les ponts type bowstring. Dans les manuels de M. Tveit, le rapport de la flèche de l'arc à sa portée est compris entre les deux valeurs limites $1/5$ et $1/6$.

2. CONCEPTION DE L'ARC

Les arcs doivent être conçus pour pouvoir supporter d'abord l'effort de compression mais également les efforts de flexion. Les résistances au flambement et à la flexion dépendent fortement de l'inertie de la section transversale de l'arc. Donc, une section avec une grande inertie autour de ses deux axes est favorable, une propriété assurée par une section tubulaire ou en caisson composé-soudé. Il est possible que l'axe de plus forte inertie doive être situé dans un plan vertical pour résister au flambement hors du plan de l'arc (dans le cas d'absence de contreventement entre les deux arcs).

2.1 Forme

Outre l'aspect esthétique du pont, qui dépend fortement de la forme de l'arc, les efforts qui sollicitent l'arc et la poussée horizontale qui en découle sont fortement liés à celle-ci. Le choix de la forme de l'arc a pour but, d'éliminer les effets parasites du moment de flexion qui peuvent le solliciter. La forme caténaire est la plus optimale qui permet à l'arc de supporter son poids propre. Quand on y rajoute les charges, cette forme penche de plus en plus vers une parabole, la forme la plus répandue.

Conventionnellement, le rapport de la hauteur de l'arc à la portée du pont est compris entre les deux valeurs limites $1/5$ et $1/6$, et ce pour des raisons esthétiques d'abord mais aussi fonctionnelles. Par ailleurs, la hauteur de l'arc a une influence directe sur le risque de flambement de celui-ci, il est donc très soigneusement choisi, et plusieurs variantes seront étudiées avant le choix définitif.

2.2 Section transversale

Les dimensions de la section de l'arc sont d'autant plus importantes que la distance franchie augmente. Dès lors, un choix s'impose pour les tôles utilisées dans la constitution de l'arc.

Un caisson avec des tôles minces avec raidisseurs offre un gain de matière important et une diminution du poids propre non-négligeable. Cependant, la procédure de soudure des raidisseurs, le cintrage et la maintenance sont des tâches difficiles qui nécessitent donc un grand savoir-faire.

Le choix d'utiliser des tôles épaisses non raidies, est alors plus facile à mettre en œuvre, mais devient économiquement non rentable dans les grandes portées.

3. MATERIAU ET SECTION

L'acier utilisé dans la charpente est de type : **S355** dont les caractéristiques sont définies dans la norme (EN 10025-2-2004).

- Module d'élasticité : $2,1 \times 10^5 \text{ MPa}$
- Coefficient de poisson : 0,3
- Coefficient thermique : $6,6667 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
- Densité : $76,98 \text{ KN/m}^3$

Nota : Cette étude étant basée principalement sur la conception de l'arc, les détails sont axés sur cet élément. Cependant, les autres éléments aussi importants que l'arc et les charges sollicitant l'ouvrage sont présentés d'une manière plus détaillée dans le document « Etude d'un pont mixte type bowstring à usage ferroviaire » présenté par moi-même et mon binôme M. BELKACHE en juin 2015, et présent sous format papier et électronique à la bibliothèque de l'Ecole Nationale Polytechnique (ENP) à Alger.

La section qui assurerait le meilleur rendement à l'arc est en forme de caisson dont les caractéristiques sont les suivantes :

Avec :

- A (m²)** Aire de la section transversale
- A_{sy} (m²)** Aire de la section parallèle à l'axe z
- A_{sz} (m²)** Aire de la section parallèle à l'axe y
- z(+)** (m) Position de l'axe neutre par rapport à l'axe z
- z(-)** (m) Position de l'axe neutre par rapport à l'axe z
- I_{xx}(m⁴)** Inertie de la section par rapport à l'axe x
- I_{yy} (m⁴)** Inertie de la section par rapport à l'axe y
- I_{zz}(m⁴)** Inertie de la section par rapport à l'axe z

y(+) (m) Position de l'axe neutre par rapport à l'axe y

y(-) (m) Position de l'axe neutre par rapport à l'axe y

Tableau I.1 : Caractéristiques sectionnelles de l'arc.

A (m ²)	A _{sy} (m ²)	A _{sz} (m ²)	z(+)	z(-)
0.154	0.080	0.080	0.500	0.500
I _{xx} (m ⁴)	I _{yy} (m ⁴)	I _{zz} (m ⁴)	y(+)	y(-)
0.035	0.024	0.024	0.500	0.500

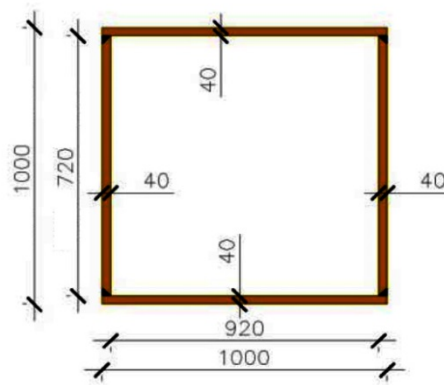


Figure I.2 : Dimensions de la section transversale de l'arc.

4. LES VARIANTES :

Dans le but d'examiner au plus près l'influence de ce ratio sur le comportement du pont, j'ai définis différentes conceptions, avec des ratios variées comme défini dans le tableau suivant.

Ce ratio est calculé par la formule suivante : $Ratio = \frac{Flèche}{Portée}$

Tableau I.2 : Différentes variantes prise en compte.

Variante	V1	V2	V3	V4	V5	V6
Ratio	1/5	1/5.2	1/5.4	1/5.6	1/5.8	1/6
Portée	52.5	52.5	52.5	52.5	52.5	52.5
Flèche	10.50	10.10	9.72	9.38	9.05	8.75

CONCLUSION :

Après cette définition, exposée dans ce chapitre, et les variantes fixées, je vous invite à consulter le chapitre suivant qui va vous exposer les résultats des efforts qui sollicitent chaque élément de la structure.

CHAPITRE II
RESULTATS DES EFFORTS

1. INTRODUCTION

Après avoir définis différentes variantes qui seront prises en compte lors de cette étude, je vais consacrer les pages de ce présent chapitre à l'exposition des résultats obtenus pour chaque conception.

Les résultats sous forme de tableaux illustrent les différentes valeurs des efforts (Effort normal, Moment fléchissant, Moment de torsions, Effort de cisaillement) sollicitant les différents éléments de la structure. Une première critique sera faite dans ce chapitre, se basant sur des graphiques comparatifs des différentes sollicitations. La seconde exploitation des résultats sera faite dans le prochain chapitre, avec une étude qui déterminera avec exactitude l'effet de ce ratio (Flèche/Portée) sur le comportement de la structure.

2. RESULTATS DE L'ETUDE

Le logiciel MIDAS CIVIL, de par ma précédente expérience lors du projet de fin d'étude d'un côté et de ses performances élevées d'un autre côté, a été reconduit lors de l'élaboration de cette étude. Les résultats de cette analyse sont exposés ci-dessous.

Avec :

M^+ : Moment positif maximum dans l'élément (kN.m)

M^- : Moment négatif maximum dans l'élément (kN.m)

$T_{z_{max}}$: Effort tranchant maximum dans le sens z (kN)

N_{max} : Effort normal maximum de traction (-) ou de compression (+) (kN)

2.1 Arc :

Variante	V1	V2	V3	V4	V5	V6
M^+	84333,93	84757,42	85037,05	85071,66	85488,85	85671,42
M^-	-32488,45	-32143,56	-32399,92	-33077,2	-32867,82	-33084,98
$T_{z_{max}}$	-5442,36	-5544,71	-5626,5	-5545,67	-5767,01	-5827,82
N_{max}	-20675,32	-21936,76	-22444,37	-22967,82	-23442,1	-23936,79

2.2 Poutres longitudinales (principales) :

Variante	V1	V2	V3	V4	V5	V6
M^+	79664,78	79598,06	79486,01	79475,18	79301,98	79226,04
M^-	-119991,93	-119746,83	-119749,9	-119754,11	-119763,73	-119773,94
Tz_{max}	14070,26	14059,38	14055,94	14056,01	14023,76	14048,55
N_{max}	9507,78	9629,29	9955,69	10282,74	10580,56	10882,63

2.3 Poutres transversales :

Variante	V1	V2	V3	V4	V5	V6
M^+	5133,19	5133,19	5133,19	5133,19	5133,18	5133,18
M^-	-592,03	-454,25	-465,47	-477,57	-486,16	-495,79
Tz_{max}	-1612,86	-1604,57	-1604,83	-1605,2	-1605,29	-1605,49
N_{max}	-164,17	-134,11	-142,11	-151,27	-156,8	-163,56

2.4 Suspentes :

Variante	V1	V2	V3	V4	V5	V6
N_{max}	3499,07	3563,57	3562,19	3564,65	3558,46	3556,2

3. OBSERVATION PREMIERES

a) Arc :

- La première observation concerne la variation de l'effort normal (de compression) dans l'arc : moins la flèche de l'arc est grande plus l'élément reprend un effort de compression plus important.

Dans les cas des ponts en arc, cette particularité devient plus intéressante dans les cas de massifs d'ancrage très résistants comme le cas des roches. Cependant, dans les cas courants, l'effort serait très grand d'autant plus que ce même effort sera transmis aux poutres longitudinales d'une manière proportionnelle.

- La deuxième observation, quant à elle, concerne l'effort tranchant et le moment fléchissant, les valeurs de ces derniers augmentent quand la flèche de l'arc décroît. Cela est en effet dû à « l'horizontalité » de l'arc, l'angle d'inclinaison décroît ce qui

tend les charges à se transmettre dans un plan plus au moins perpendiculaire à la section transversale de l'arc (de façon tangente) ce qui donne lieu à des efforts de cisaillement et des moments fléchissant.

b) Poutres longitudinales :

- On remarque, cette variation de l'effort normal (de traction) comme prédis précédemment, l'effort de compression à l'arc étant retransmis à la poutre longitudinale, la valeur de ce dernier est directement dépendante de la flèche de l'arc.
- Par contre, avec toute logique, les valeurs du moment fléchissant et l'effort de cisaillement ne se trouvent pas altérés, tant ils sont uniquement liés à l'élément lui-même et les éléments supportés (la dalle et les poutres transversales).

c) Poutres transversales :

- Les valeurs de ces derniers ne se trouvent (théoriquement) pas altérés, seulement, quelques variations dues notamment à des efforts parasites.

d) Suspentes :

- La même raison qui a donné naissance à des efforts de cisaillement et moment fléchissant dans l'arc (angle d'inclinaison de l'élément) est derrière cette variation de l'effort de traction dans les suspentes, pour dire que la géométrie de la structure définit le cheminement des efforts.

4. CONCLUSION

Ces résultats obtenus ne sont que pour démontrer toute l'importance de la conception dans le domaine de l'engineering. On peut d'ores et déjà relever les écarts entre les valeurs des efforts sollicitant notre ouvrage, directement liés à la géométrie de l'arc. Lors du prochain chapitre, ces résultats seront exploités de manière plus détaillée.

CHAPITRE III

ETUDE STATIQUE DES VARIANTES

1. INTRODUCTION :

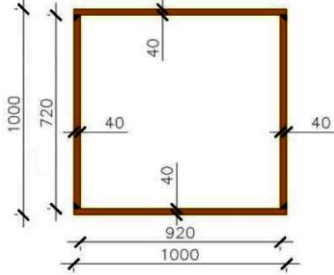
Dans ce présent chapitre, je vais exploiter les résultats exposés dans le chapitre précédent. Une étude statique (moins détaillée que celle performée dans le PFE) sera faite, les éléments constituant l'ouvrage seront ainsi vérifiés face aux différentes sollicitations conformément au règlement Eurocode 3, les résultats obtenus de cette étude seront analysés dans le but de répondre à la problématique de cette étude.

2. VERIFICATION DES ELEMENTS DE LA CHARPENTE :

2.1 Arc :

2.1.1 Caractéristiques sectionnelles :

Tableau III.1 : Caractéristiques sectionnelles de l'arc.

Classe : 1 $A = 0.154 \text{ m}^2$ $E = 2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$ $f_y = 355 \text{ MPa}$				
Sens		$I \text{ (m}^4\text{)}$	$W_{pl} \text{ (m}^3\text{)}$	$M_{pl} \text{ (MNm)}$
	Z	0.024	0.048	15.5
	Y	0.024	0.048	15.5
	X			

2.1.2 Vérification à l'état limite ultime :

a. Interaction Tranchant-Moment fléchissant :

$V_{Ed} = 1,04 \text{ MN} < V_{pl,Rd} < 0,5 \cdot V_{pl,Rd} \rightarrow$ Il n'est pas nécessaire de diminuer la capacité à la flexion de la poutre.

La vérification vis-à-vis de l'interaction d'efforts Tranchant-Moments fléchissant s'est portée sur la vérification des éléments constituant l'arc suivant la formule ci-dessous :

$$\frac{V_{Ed}}{A f_y / \sqrt{3} \gamma_{M0}} + \frac{M_{y,Ed}}{W_y f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{z,Ed}}{W_z f_y / \gamma_{M0}} < 1$$

b. Interaction effort axial-Moment fléchissant :

La vérification vis-à-vis de l'interaction d'efforts Normal-Moments fléchissant suit le même principe que la vérification à l'interaction d'effort Tranchant- Moment fléchissant suivant la formule ci-dessous :

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \leq 1$$

Il faut aussi vérifier la condition suivante :

$$M_{n,Rd} > M_{Ed}$$

Avec : $M_{n,Rd}$ le moment ultime de résistance réduit en présence d'un effort axial.

$$M_{n,Rd} = 1,26 \times M_{pl,Rd} \times (1 - n) \quad \text{avec} \quad n = \frac{N_{sd}}{N_{pl,Rd}}$$

2.1.3 Vérification à l'état limite de service :

La vérification à l'état limite de service s'effectue en vérifiant les contraintes dans les éléments constituant l'arc, comme suite :

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \frac{M_y \cdot y}{I} + \frac{N}{A} < \sigma_{lim,ser} = \frac{f_y}{\gamma_{Mser}} \\ \tau &= \frac{T}{A} < \tau_{lim,ser} = \frac{f_y}{\gamma_{Mser} \sqrt{3}} \end{aligned} \right\}$$

2.1.4 Résultats :

Les résultats de cette étude sont exposés dans le tableau suivant. La ligne « Ratio » définit le pourcentage d'exploitation de la section, sa valeur ne devant pas dépasser 100%, en revanche plus cette valeur s'en rapproche, plus la section de l'élément est bien exploitée, lors du dimensionnement des ouvrages on vise à tirer pleinement profit des sections en augmentant ce ratio dans les limites de sécurité de l'ouvrage.

Tableau III.2 : Moyenne des ratios d'exploitation de la section transversale de l'arc

Variante	V1	V2	V3	V4	V5	V6
Ratio	0.295	0.328	0.345	0.356	0.378	0.399

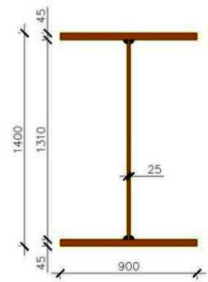
2.1.5 Observations :

D'après les résultats obtenus, on remarque que les capacités de la section transversale de l'arc est plus exploitée dans les conceptions d'arc à flèche moindre que dans les arcs qui ont une grande flèche.

Force de noter que les valeurs obtenus ne sont pas représentatives en terme qualitatif, étant obtenus en calculant la moyenne des ratios des éléments constitutifs de l'arc à l'ELU et l'ELS, sans tenir compte des zones de faiblesses (considérées traitées et renforcées par des raidisseurs). Mais ces valeurs nous renseignent approximativement sur le rendement de la section.

2.2 Poutres longitudinales (principales) :

Tableau III.3 : Caractéristiques sectionnelles de la poutre longitudinale

Classe : 1 $A = 0.114 \text{ m}^2$ $E = 2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$ $f_y = 355 \text{ MPa}$				
Sens		$I \text{ (m}^4\text{)}$	$W_{pl} \text{ (m}^3\text{)}$	$M_{pl} \text{ (MNm)}$
	Z	0.005	0.00714	2.3
	Y	0.042	0.09333	30.12
	X			

2.2.1 Vérification à l'état limite ultime :

a. Interaction Tranchant-Moment fléchissant :

$V_{Ed} = 1.417 \text{ MN} < V_{pl,Rd} < 0,5 \cdot V_{pl,Rd} \rightarrow$ Il n'est pas nécessaire de diminuer la capacité à la flexion de la poutre.

La vérification vis-à-vis de l'interaction d'efforts Tranchant-Moments fléchissant s'est portée sur la vérification des éléments constituant les poutres longitudinales suivant la formule ci-dessous :

$$\frac{V_{Ed}}{A f_y / \sqrt{3} \gamma_{M0}} + \frac{M_{y,Ed}}{W_y f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{z,Ed}}{W_z f_y / \gamma_{M0}} < 1$$

b. Interaction effort axial-Moment fléchissant :

La vérification vis-à-vis de l'interaction d'efforts Normal-Moments fléchissant s'est portée sur la vérification des éléments constituant les poutres suivant la formule ci-dessous :

$$\frac{N_{Ed}}{A f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{y,Ed}}{W_y f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{z,Ed}}{W_z f_y / \gamma_{M0}} < 1$$

Il faut aussi vérifier la condition suivante :

$$M_{n,Rd} > M_{Ed}$$

2.2.2 Vérification à l'état limite de service :

La vérification à l'état limite de service s'effectue en vérifiant les contraintes dans les éléments constituant les poutres longitudinales, comme suite :

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \frac{M_y \cdot y}{I} + \frac{N}{A} < \sigma_{lim,ser} = \frac{f_y}{\gamma_{Mser}} \\ \tau &= \frac{T}{A} < \tau_{lim,ser} = \frac{f_y}{\gamma_{Mser} \sqrt{3}} \end{aligned} \right\}$$

2.2.3 Résultats :

Les résultats de l'étude sont exposés dans le tableau suivant, une étude portant sur le comportement de l'élément face aux sollicitations a été performée. Le comportement de l'élément face aux phénomènes d'instabilité n'a pas été fait, un choix assumé visant à donner seulement un aperçu des résultats sans autant pousser les calculs.

Tableau III.4 : Moyenne des ratios d'exploitation de la section transversale de la poutre longitudinale

Variante	V1	V2	V3	V4	V5	V6
Ratio	0.402	0.411	0.418	0.425	0.432	0.437

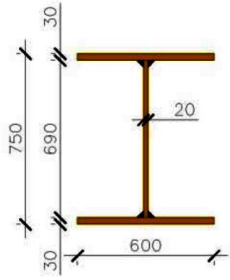
2.2.4 Observations :

Encore une fois, la section transversale des poutres principales est mieux exploitée dans les variantes avec arc ayant une moindre flèche. On note cependant que la variation n'est

pas aussi grande que dans le cas de l'arc, puisque le seul effort étant altéré par cette conception est l'effort normal (de traction).

2.3 Poutres transversales :

Tableau III.5 : Caractéristiques sectionnelles de la poutre transversale

Classe : 1 $A = 0.050 \text{ m}^2$ $E = 2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$ $f_y = 355 \text{ MPa}$				
Sens		$I \text{ (m}^4\text{)}$	$W_{pl} \text{ (m}^3\text{)}$	$M_{pl} \text{ (MNm)}$
	Z	0.001	0.00267	0.86
	Y	0.005	0.01667	5.38
	X			

2.3.1 Vérification à l'état limite ultime :

c. Interaction Tranchant-Moment fléchissant :

$V_{Ed} = 1.417 \text{ MN} < V_{pl,Rd} < 0,5 \cdot V_{pl,Rd} \rightarrow$ Il n'est pas nécessaire de diminuer la capacité à la flexion de la poutre.

La vérification vis-à-vis de l'interaction d'efforts Tranchant-Moments fléchissant s'est portée sur la vérification des éléments constituant les poutres longitudinales suivant la formule ci-dessous :

$$\frac{V_{Ed}}{A f_y / \sqrt{3} \gamma_{M0}} + \frac{M_{y,Ed}}{W_y f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{z,Ed}}{W_z f_y / \gamma_{M0}} < 1$$

d. Interaction effort axial-Moment fléchissant :

La vérification vis-à-vis de l'interaction d'efforts Normal-Moments fléchissant s'est portée sur la vérification des éléments constituant les poutres suivant la formule ci-dessous :

$$\frac{N_{Ed}}{A f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{y,Ed}}{W_y f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{z,Ed}}{W_z f_y / \gamma_{M0}} < 1$$

Il faut aussi vérifier la condition suivante :

$$M_{n,Rd} > M_{Ed}$$

2.3.2 Vérification à l'état limite de service :

La vérification à l'état limite de service s'effectue en vérifiant les contraintes dans les éléments constituant les poutres longitudinales, comme suite :

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \frac{M_y \cdot y}{I} + \frac{N}{A} < \sigma_{lim,ser} = \frac{f_y}{\gamma_{Mser}} \\ \tau &= \frac{T}{A} < \tau_{lim,ser} = \frac{f_y}{\gamma_{Mser} \sqrt{3}} \end{aligned} \right\}$$

2.3.3 Résultats :

Les résultats de l'étude sont exposés dans le tableau suivant, une étude portant sur le comportement de l'élément face aux sollicitations a été performée. Le comportement de l'élément face aux phénomènes d'instabilité n'a pas été fait, un choix assumé visant à donner seulement un aperçu des résultats sans autant pousser les calculs.

Tableau III.6 : Moyenne des ratios d'exploitation de la section transversale de la poutre transversale

Variante	V1	V2	V3	V4	V5	V6
Ratio	0.221	0.221	0.221	0.221	0.221	0.221

2.3.4 Observations :

Prédit dans le chapitre précédent, confirmée par l'analyse, les poutres transversales ne sont pas altérées par la conception de l'arc. Les seules charges que supportent ces poutres sont le poids propre, la dalle et les charges mobiles des trains.

Le ratio de leur exploitation reste le même dans toute les conceptions.

2.4 Suspentes :

Les suspentes seront vérifiées au seul effort de traction qui sollicite ces éléments, les résultats de cette analyse sont exposés dans le tableau suivant.

2.4.1 Résultats :

Les résultats de l'étude sont exposés dans le tableau suivant, une étude portant sur le comportement de l'élément face aux sollicitations a été performée. Le comportement de

l'élément face aux phénomènes d'instabilité n'a pas été fait, un choix assumé visant à donner seulement un aperçu des résultats sans autant pousser les calculs.

Tableau III.7 : Moyenne des ratios d'exploitation de la section transversale des suspentes

Variante	V1	V2	V3	V4	V5	V6
Ratio	0.770	0.772	0.775	0.781	0.785	0.787

2.4.2 Observations :

Les suspentes sont plus sollicitées dans les cas des variantes à arc ayant des flèches moindres, ce qui confirme une fois de plus les observations faites dans le chapitre précédent.

3. CONCLUSION :

La vérification des éléments de l'ouvrage sus différentes conceptions, en gardant les mêmes section transversales, nous a permis de définir la variation sur le ratio d'exploitation des capacités de ces sections. On remarque, pour l'arc, les poutres longitudinales et transversales, que la flèche de l'arc a une répercussion directe sur leur comportement. Ainsi, leur ratio est d'autant plus élevé que la flèche est grande. Pour les poutres transversales, on remarque qu'il n'y a pas de changement de comportement, ce dernier est indépendant de la conception de l'arc.

CONCLUSION GENERALE :

CONCLUSION GENERALE :

Au cours de cette étude, complémentaire à l'étude d'un pont mixte type bowstring, j'ai pu confirmer une théorie qui était pourtant évidente, la conception des ponts est une phase déterminante pour les ouvrages.

Les ponts arc type bowstring en font une grande illustration, de par sa complexité, le pont offre une grande flexibilité en phase de conception, comme celui de la flèche de l'arc. Cette étude pouvait ne pas s'arrêter en si bon chemin, le type de liaisons arc-poutres est tout aussi un sujet intéressant. La forme de l'arc (Parabolique, circulaire ou autre) pourrait aussi faire l'objet d'une étude pertinente.

Ce qui était alors vérifié pour l'arc est aussi valable pour les autres éléments, ce sont autant de possibilités qu'offre le pont arc type bowstring, qui est pour ma part (aussi inexpérimenté que je suis) le plus fascinant des ouvrages.

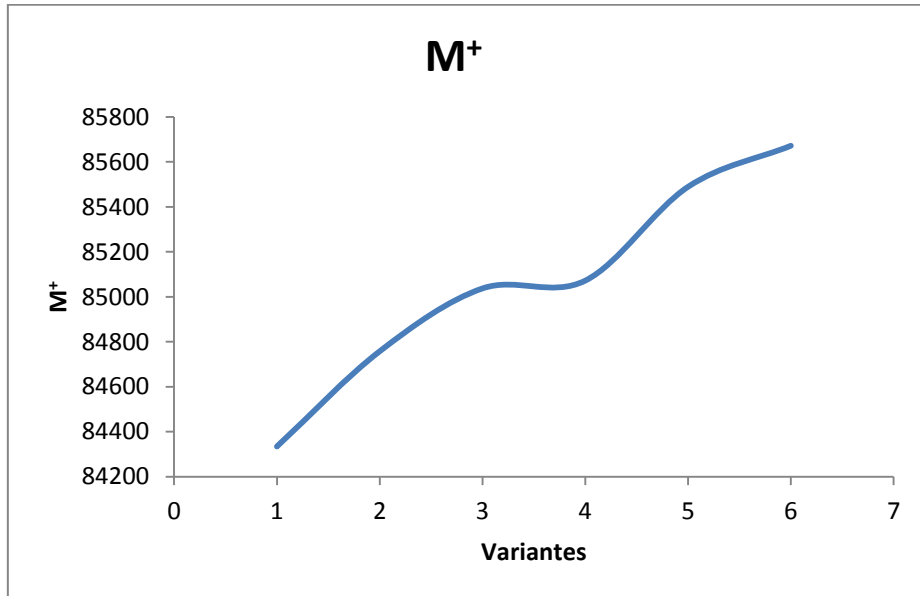
REFERENCES :

- Niclison, A. (2010). Statical analysis of netork arch bridge. Master thesis : Insttut of Baustatik.
- BELKACHE S, SAIDANI A. (2015). Etude d'un pont mixte type bowstring. Projet de fin d'étude. ENP. Alger
- MIDAS Civil. (2011). General use of midas civil.
- MIDAS Civil. (2013). Train load analysis.
- Ministère des travaux public. (2008). RPOA.
- Lida Hepola & Ronja Marwedel. (2012° ; Arch bridges. Aalto University.

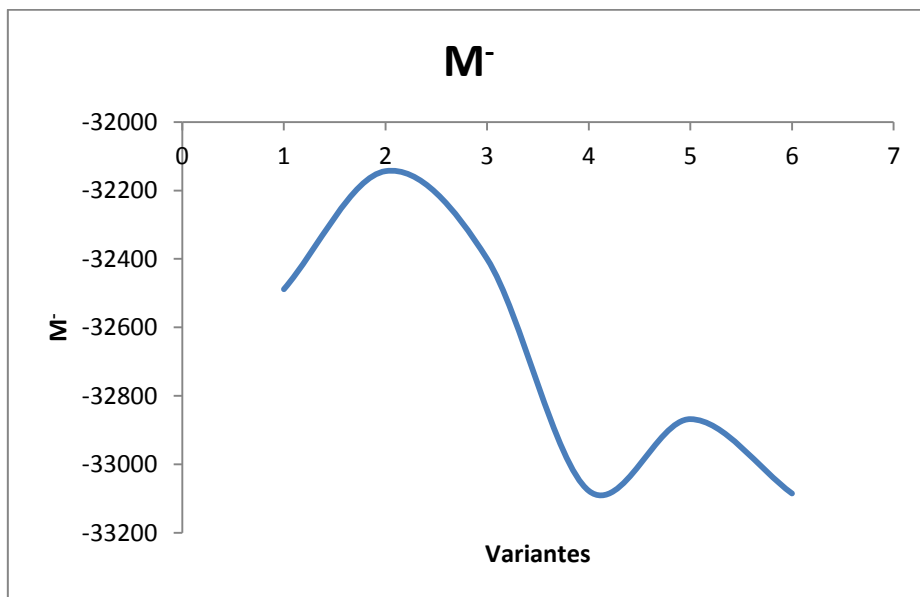
ANNEXE

ANNEXE : GRAPHIQUE DES EFFORTS

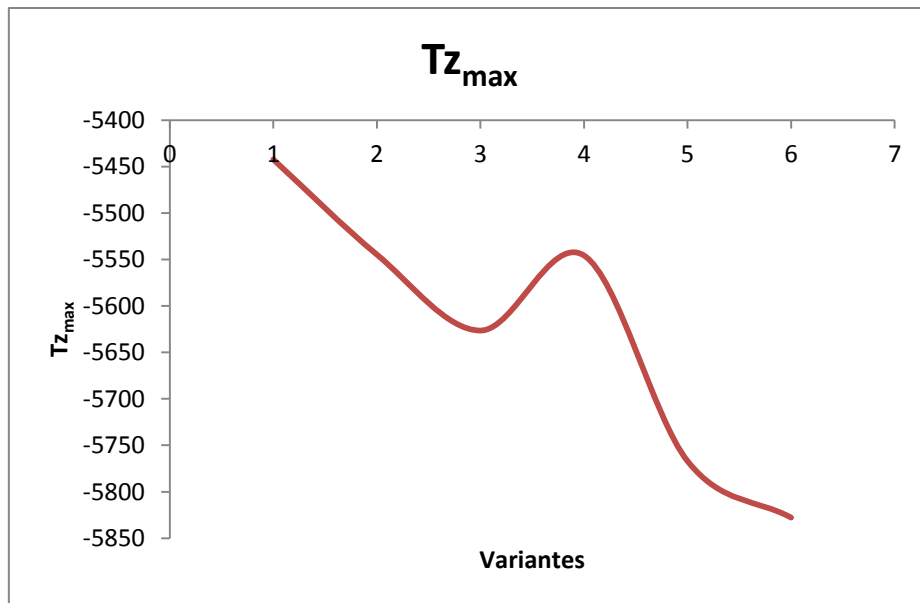
L'ARC :



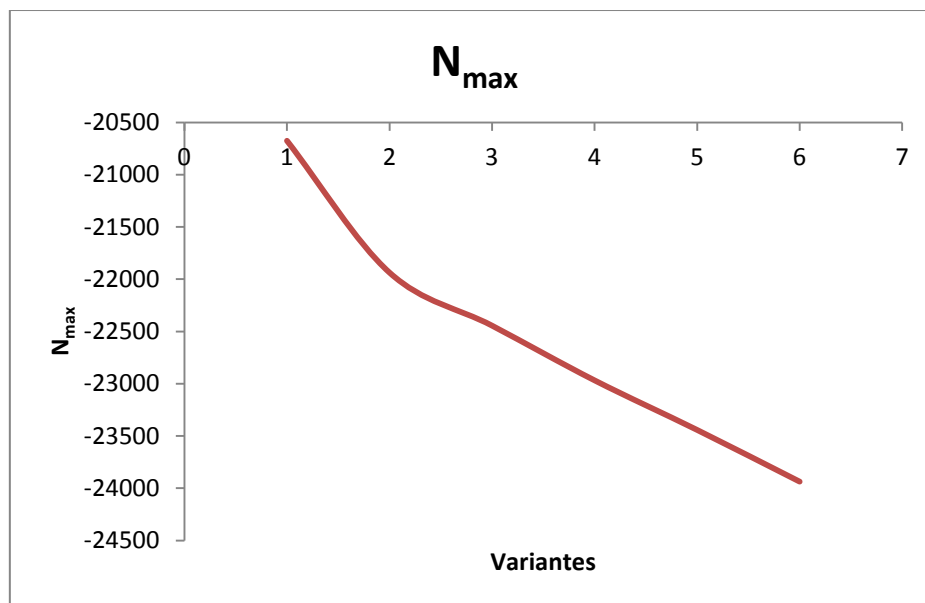
Moment positif maximal dans l'arc pour chacune des conceptions.



Moment positif minimal dans l'arc pour chacune des conceptions.

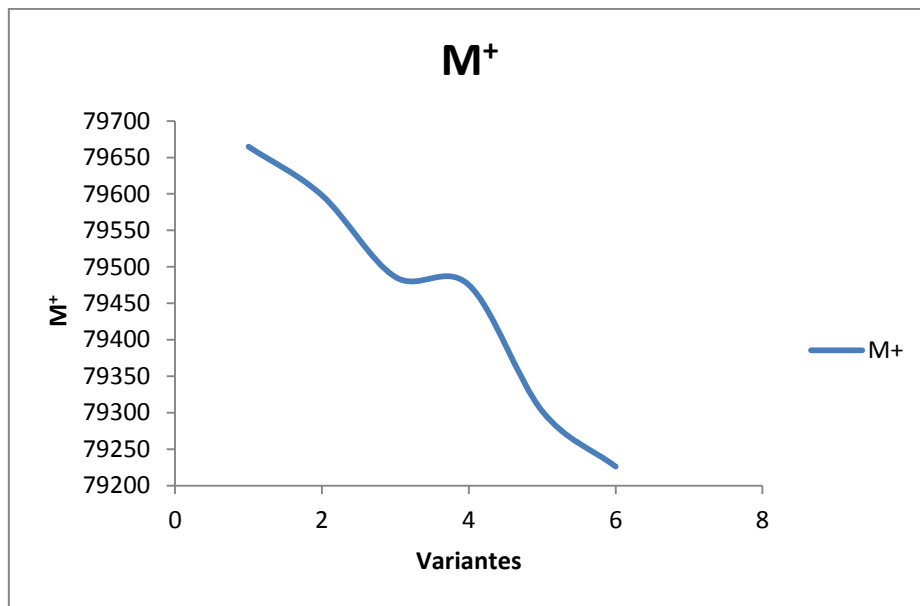


Effort de cisaillement maximal dans l'arc pour chacune des conceptions.

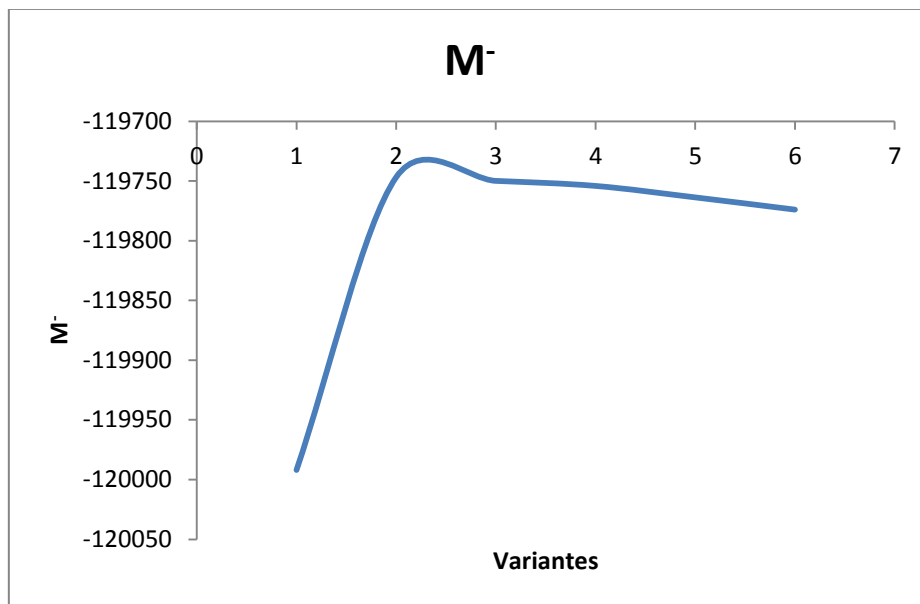


Effort axial maximal dans l'arc pour chacune des conceptions.

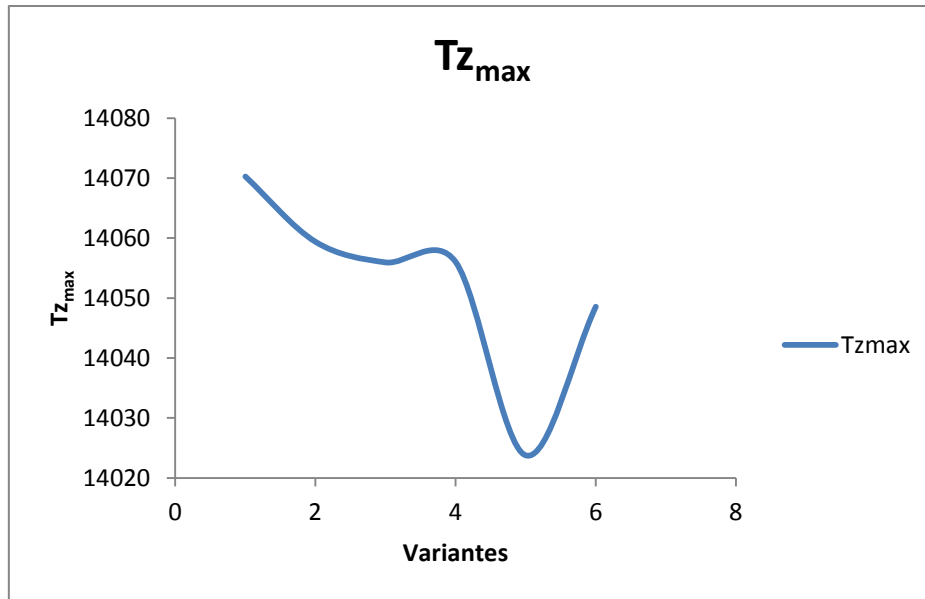
POUTRES LONGITUDINALES :



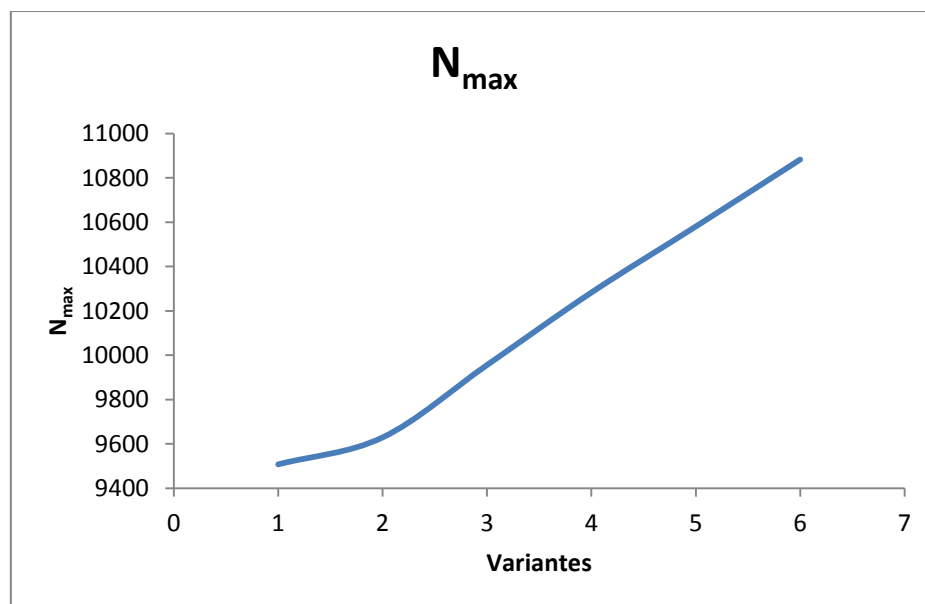
Moment positif maximal dans la poutre longitudinale pour chacune des conceptions.



Moment positif minimal dans la poutre longitudinale pour chacune des conceptions.

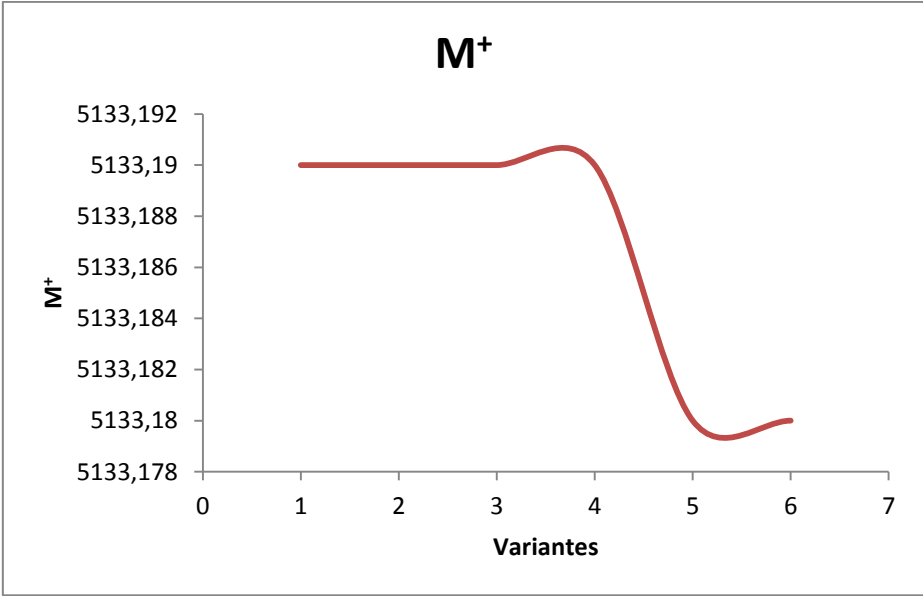


Effort de cisaillement maximal dans la poutre longitudinale pour chacune des conceptions.

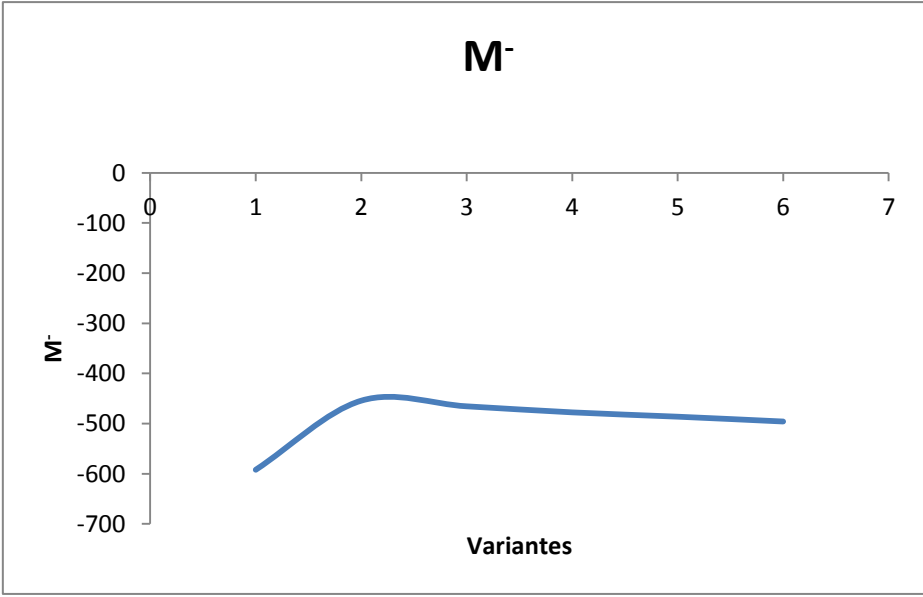


Effort axial maximal dans la poutre longitudinale pour chacune des conceptions.

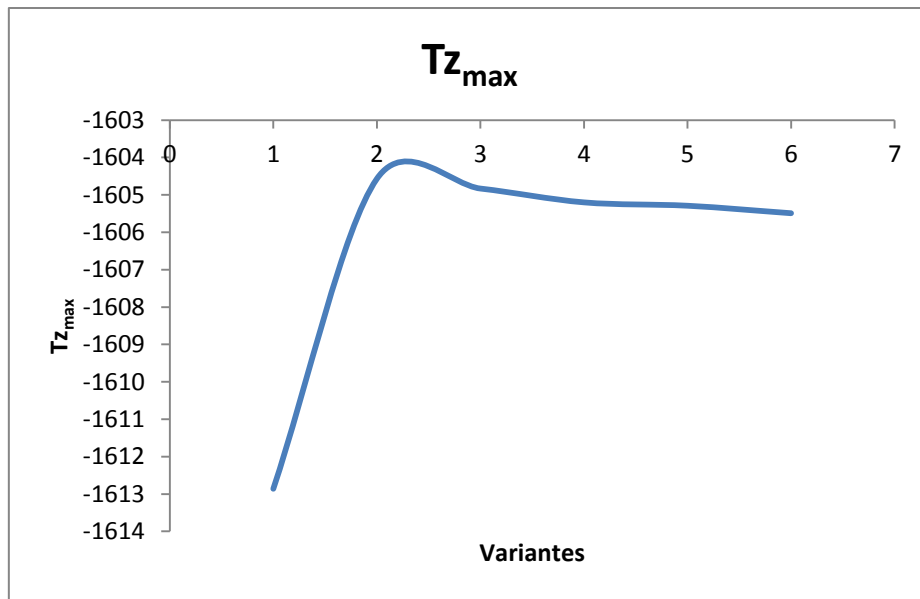
POUTRES TRANSVERSALES :



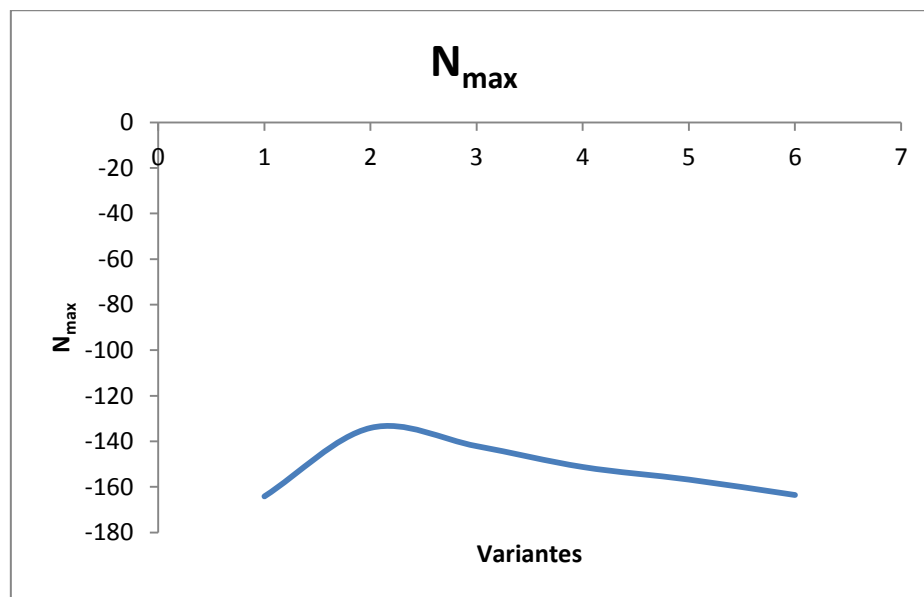
Moment positif maximal dans la poutre transversale pour chacune des conceptions.



Moment positif minimal dans la poutre transversale pour chacune des conceptions.

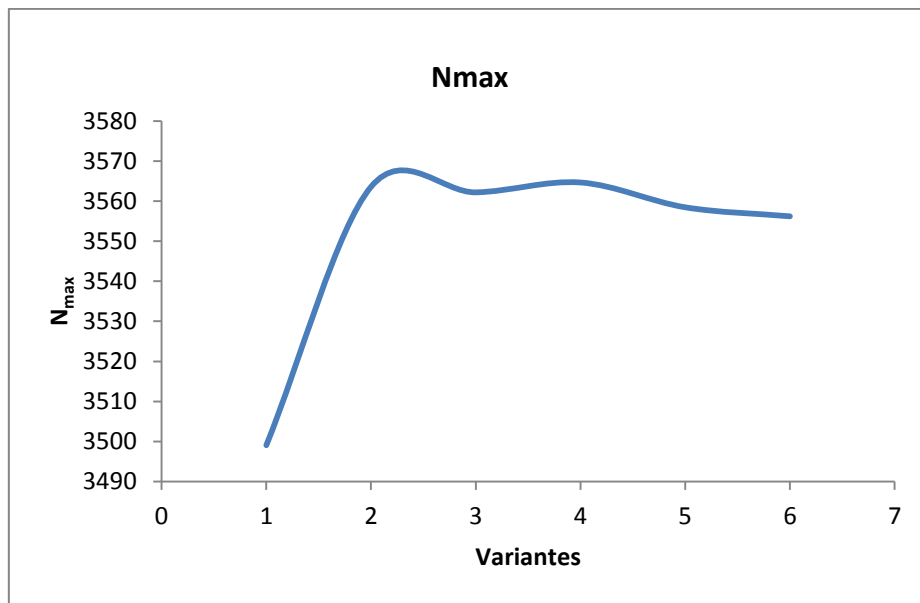


Effort de cisaillement maximal dans la poutre transversale pour chacune des conceptions.



Effort axial maximal dans la poutre transversale pour chacune des conceptions.

SUSPENTES :



Effort axial maximal dans les suspentes pour chacune des conceptions.