

I. 4. 1. 3. Effort dans les diagonales

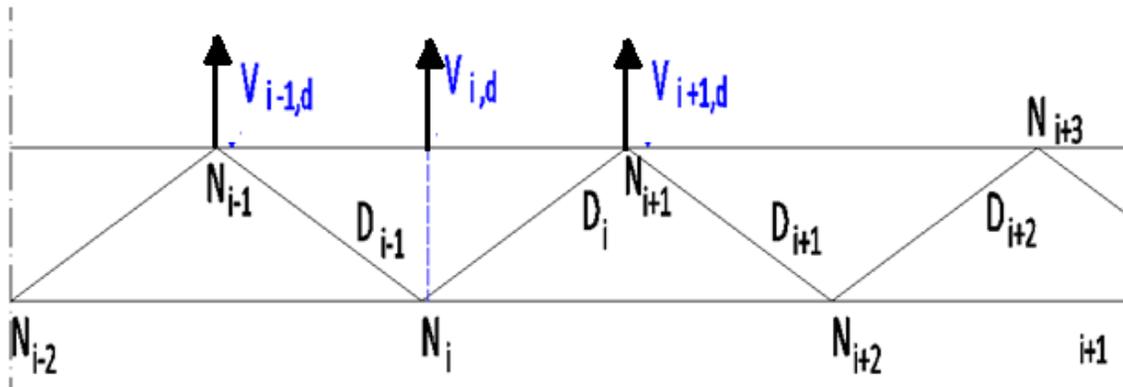


Figure 55: Schéma de calcul des efforts dans les diagonales

On calcule l'effort dans une barre diagonale D_i (entre N_i et N_{i+1}) avec l'expression :

$$F_{D,i} = \pm \frac{V_{i,d}}{\cos \varphi}$$

Où, $\varphi = 35^\circ$, l'angle d'inclinaison des diagonales et $V_{i,d}$ l'effort tranchant à droite du nœud N_i .

La traction maximale dans les diagonales est : $F_{t,max} = 640,51 \text{ kN}$

Et l'effort de compression maximale est : $F_{c,max} = 767,25 \text{ kN}$

I. 4. 2. Effort dans les barres de l'arc

Pour la détermination des efforts dans les barres de l'arc, nous utiliserons le même principe qu'avec ceux de la poutre.

L'arc est en treillis de type Warren sans montant. Etant parabolique, sa longueur développée est :

$$S = l + \frac{8f^2}{3l} + \frac{32f^4}{l^3}$$

Avec $f = 30[\text{m}]$, la flèche de l'arc et $l = 200[\text{m}]$, son ouverture, on a $S = 211,352[\text{m}]$.

L'inclinaison des diagonales par rapport aux lignes normales de l'arc étant de 35° , la distance entre nœuds est donc, $a = 4,34[\text{m}]$; par conséquent, les nombres $b_$ de barres sont les suivants :

$$b_{\text{membres inférieures}} = S/a = 49$$

$$b_{\text{membres supérieures}} = S/a + 1 = 50$$

$$b_{\text{diagonales}} = 2 \times S/a = 98$$

Au total, on a, $b = b_{\text{membres inférieures}} + b_{\text{membres supérieures}} + b_{\text{diagonales}} = 197$ barres

Le nombre de nœuds est de $n = 101$.

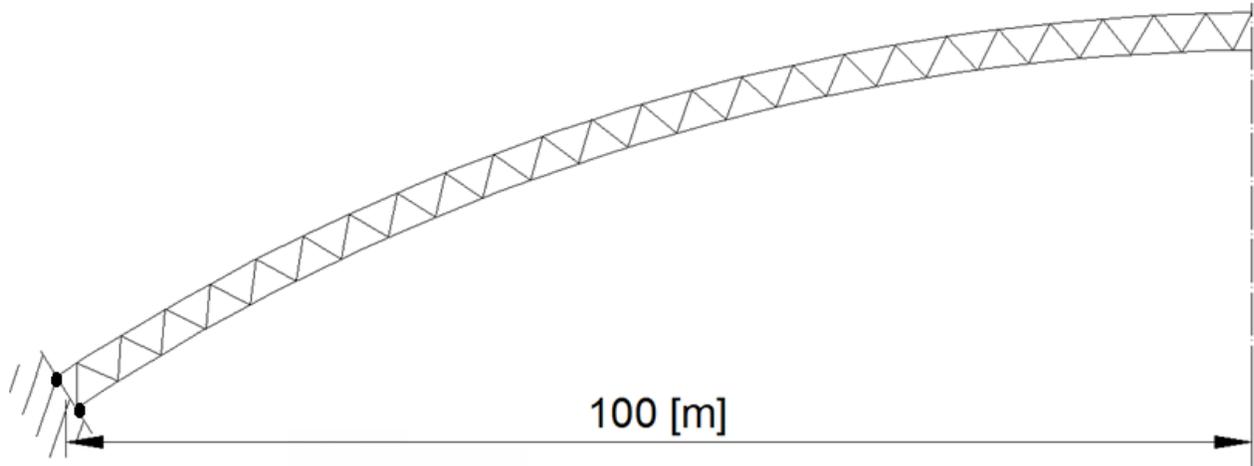


Figure 56 : Modélisation de l'arc en treillis

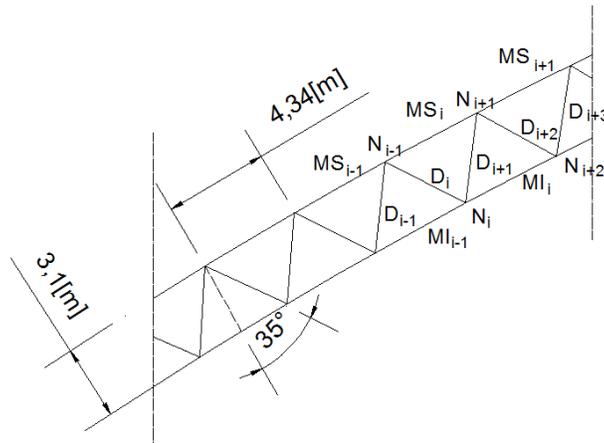


Figure 57 : Dimensions et désignations des éléments du treillis de l'arc

I. 4. 2. 1. Vérification de la stabilité du système

On a : $b = 197$, le nombre de barres ;

$n = 101$, le nombre de nœuds ;

$2n - 3 = 199 \geq b = 197 \Rightarrow b \geq 2n - 3$: le système est isostatique intérieurement, donc stable intérieurement.

L'arc est encastré à ses deux naissances, avec les trois équations d'équilibres et les six inconnus aux appuis, l'arc est trois fois hyperstatique extérieurement, donc il est stable extérieurement.

Le système est stable intérieurement qu'extérieurement => le système est généralement stable.

I. 4. 2. 2. Effort dans les membrures supérieures

Ainsi, nous la traction maximale dans les membrures supérieures : $F_{t,max} = 1\,095,69\text{ kN}$

Et l'effort de compression maximale est : $F_{c,max} = 2\,797,10\text{ kN}$

I. 4. 2. 3. Effort dans les membrures inférieures

Nous avons la traction maximale dans les membrures inférieures : $F_{t,max} = 2\,797,10\text{ kN}$

Et l'effort de compression maximale est : $F_{c,max} = 1\,095,52\text{ kN}$

I. 4. 2. 4. Effort dans les diagonales

La traction maximale dans les diagonales est : $F_{t,max} = 518,13\text{ kN}$

Et l'effort de compression maximale est : $F_{c,max} = 518,90\text{ kN}$

Les détails de résultats des efforts dans les barres sont donnés en annexe VI.A à annexe VI.H.

I. 5. Récapitulation des sollicitations

Tableau 47 : Efforts maximaux dans les barres

Efforts en [kN]		Barres plus sollicitées	Abscisse x[m] (Repère global)	Traction		Compression	
				ELU	ELS	ELU	ELS
Poutre	Membrure Supérieure	MS 8	15 à 17	194,40	144,00		
		MS 60	119 à 121			414,49	315,43
	Membrure Inférieure	MI 61	120 à 122	414,68	315,56		
		MI 89	176 à 178			163,17	120,70
	Diagonale	D 17	16 à 17	640,51	474,45		
		D 20	19 à 20			767,25	568,33
Arc	Membrure Supérieure	MS 40	177,08 à 181,16	1 095,69	809,82		
		MS 26	119,96 à 124,04			2 797,10	2 128,57
	Membrure Inférieure	MI 25	117,92 à 122	2 797,10	2 128,57		
		MI 11	60,8 à 64,88			1 095,52	809,80
	Diagonale	D 49	117,92 à 119,96	518,13	384,06		
		D 51	122 à 124,04			518,90	384,63

I. 6. Vérifications

I. 6. 1. Vérifications de résistance des barres de treillis de l'ossature métallique

Précédemment, la détermination des sollicitations dans les éléments des treillis nous a fait constater que la sollicitation prépondérante dans les barres est l'effort normal. Toutefois, il a été observé que, les barres sont également sollicitées par des moments de flexion dits secondaires. Ainsi, une interaction entre ces sollicitations pourrait se produire et causera l'instabilité de l'ouvrage, il convient donc de vérifier les éléments de la poutre vis-à-vis de cette instabilité.

I. 6. 1. 1. Caractéristiques physiques et statiques des barres

Les barres constituant l'arc et la poutre ont les caractéristiques données dans le tableau suivant,

Tableau 48 : Caractéristiques des barres

Eléments		Poutre			Arc		
Caractéristiques		Membrure supérieure	Membrure inférieure	Diagonale	Membrure supérieure	Membrure inférieure	Diagonale
Profilés		T300*300*20	T300*300*20	2 x UPN120	section creuse	section creuse	2 x UPN350
h	[mm]	300	300	120	400	400	350
b	[mm]	300	300	55	400	400	100
t _w	[mm]	20	20	7	20	20	14
t _f	[mm]	20	20	9	20	20	16
r ₁	[mm]	2	2	9	-	-	16
r ₂	[mm]	2	2	5	-	-	8
A x 10 ²	[mm ²]	116,02	116,02	17,00	300,00	300,00	77,30
G	[kg/m]	92,81	92,81	13,4	235	235	60,6
I _y x 10 ⁴	[mm ⁴]	5097,954	5097,954	364	71468	71468	12840
W _{ely} .10 ³	[mm ³]	234,29	234,29	60,7	3573	3573	734

Caractéristiques		Membrure supérieure	Membrure inférieure	Diagonale	Membrure supérieure	Membrure inférieure	Diagonale
Profilés		T300*300*20	T300*300*20	2 x UPN120	section creuse	section creuse	2 x UPN350
$W_{ply} \times 10^3$	[mm ³]	87,4	87,4	72,6	4245	4245	918
$i_y \times 10$	[mm]	9,37	9,37	4,62	15,4	15,4	12,9
$I_z \times 10^4$	[mm ⁴]	4518,67	4518,67	43,2	71468	71468	570
$W_{el,z} \times 10^3$	[mm ³]	301,24	301,24	11,1	3573	3573	75
$W_{pl,z} \times 10^3$	[mm ³]	35,4	35,4	21,2	4245	4245	143
$i_z \times 10$	[mm]	6,24	6,24	1,59	15,4	15,4	2,72
$I_t \times 10^4$	[mm ⁴]	9616,62	9616,62	4,15	112489	112489	61,2

1. 6. 1. 2. Résistance de calcul

Pour les aciers, la norme Eurocode spécifie une résistance de calcul R_d qui est :

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_M}$$

R_k : valeur caractéristique de la résistance considérée, déterminée au moyen des valeurs caractéristiques ou nominales des propriétés des matériaux ou des dimensions ;

γ_M : coefficient partiel global pour la résistance considérée ; les γ_M sont définies par le tableau suivant :

Tableau 49 : Coefficients partiels de γ_M

a) résistance des éléments et des sections transversales :	
— résistance des sections transversales à une plastification excessive y compris le voilement local	γ_{M0}
— résistance des éléments à l'instabilité, évaluée par vérification des éléments	γ_{M1}
— résistance à la rupture des sections transversales tendues	γ_{M2}
b) résistance des assemblages	
— résistance des boulons — résistance des rivets — résistance des axes d'articulation — résistance des soudures — résistance à la pression diamétrale	γ_{M2}
— résistance au glissement — à l'état limite ultime (Catégorie C) — à l'état limite de service	γ_{M3} $\gamma_{M3,ser}$
— résistance en pression diamétrale d'un boulon à injection	γ_{M4}
— résistance des joints des poutres à treillis de profils creux	γ_{M5}
— résistance des axes d'articulation à l'état limite de service	γ_{M6ser}
— précontrainte des boulons à haute résistance	γ_{M7}

Avec, $\gamma_{M0} = 1,00$; $\gamma_{M1} = 1,10$; $\gamma_{M2} = 1,25$; $\gamma_{M3} = 1,25$; $\gamma_{M3,ser} = 1,10$; $\gamma_{M4} = 1,10$; $\gamma_{M5} = 1,10$;
 $\gamma_{M6,ser} = 1,00$; $\gamma_{M7} = 1,10$.

1. 6. 1. 2. Classification des sections transversales

La classification sections transversales a pour but d'identifier dans quelle mesure leur résistance et leur capacité de rotation sont limitées par l'apparition du voilement local.

Quatre classes de section sont définies :

- Classe 1, elle regroupe les sections dans lesquelles peut se former une rotule plastique pouvant atteindre sans réduction de résistance la capacité de rotation requise pour une analyse plastique ;
- Classe 2, dans les sections transversales peut se développer leur moment de résistance plastique, mais la capacité de rotation est limitée à cause du voilement local ;
- Classe 3, pour les sections de cette classe, la contrainte calculée dans la fibre comprimée extrême de la barre en acier en supposant une distribution élastique des contraintes peut atteindre la limite d'élasticité, mais le voilement local est susceptible d'empêcher le développement du moment résistance plastique ;

- Classe 4, le voilement local se produit avant l'atteinte de la limite d'élasticité dans une ou plusieurs parois de la section transversale.

La classe d'une section transversale dépend du rapport largeur « c » sur épaisseur « t » de ses sections soumises à la compression, elle dépend aussi de ε , un facteur dépendant de sa résistance f_y . Elle est déterminée à l'aide du tableau de l'annexe VII.A.

$$\text{On a : } \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,81$$

- Classe de section transversale des membrures de la poutre de rigidité

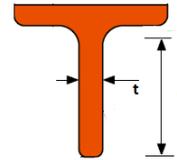
Les membrures ont une section transversale en té, elles travaillent en flexion simple, leurs âmes sont fléchies et leurs semelles sont comprimées.

Classe de l'âme : parois fléchis

$$c = 255 \text{ [mm]}$$

$$t = 20 \text{ [mm]}$$

$$\Rightarrow \frac{c}{t} = 12,75 \leq 72 \cdot \varepsilon = 58,32 : \text{ la section est vérifiée pour la classe 1.}$$

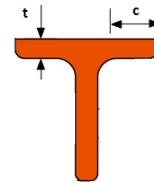


Classe de la semelle en console : parois comprimée

$$c = 115 \text{ [mm]}$$

$$t = 20 \text{ [mm]}$$

$$\Rightarrow \frac{c}{t} = 5,75 \leq 9 \cdot \varepsilon = 7,29 : \text{ la section est vérifiée pour les classes 1.}$$



Donc les sections transversales des membrures des poutres sont de classe 1.

- Classe de section des diagonales de la poutre de rigidité

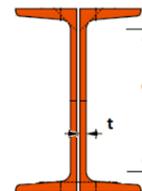
Les diagonales des treillis ont une section transversale en U. Même si elles sont soumises à un effort axial et à un moment fléchissant, par mesure de simplification, on les classe suivant une compression uniforme.

Classe de l'âme : parois comprimé

$$c = 84 \text{ [mm]}$$

$$t = 7 \text{ [mm]}$$

$$\Rightarrow \frac{c}{t} = 12 \leq 33 \cdot \varepsilon = 26,73 : \text{ la section est vérifiée pour la classe 1.}$$



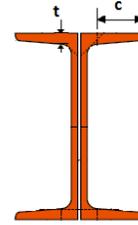
Classe de la semelle : en console comprimée

$$c = 39 \text{ [mm]}$$

$$t = 9 \text{ [mm]}$$

$$f_y = 355 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\Rightarrow \frac{c}{t} = 4,33 \leq 9 \cdot \varepsilon = 7,29 : \text{ la section est vérifiée pour la classe 1.}$$



- Classe des sections transversales des pièces de pont

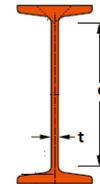
Les pièces de pont ont une section transversale en I, elles travaillent en flexion simple, donc leurs âmes sont fléchies et leurs semelles sont comprimées.

Classe de l'âme : parois fléchis

$$c = 159,1 \text{ [mm]}$$

$$t = 7,5 \text{ [mm]}$$

$$\Rightarrow \frac{c}{t} = 21,21 \leq 72 \cdot \varepsilon = 58,32 : \text{ la section est vérifiée pour la classe 1.}$$

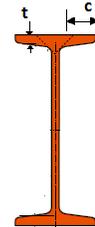


Classe de la semelle en console : parois comprimée

$$c = 33,75 \text{ [mm]}$$

$$t = 11,3 \text{ [mm]}$$

$$\Rightarrow \frac{c}{t} = 2,99 \leq 9 \cdot \varepsilon = 7,29 : \text{ la section est vérifiée pour la classe 1.}$$



Donc les sections transversales des pièces de pont sont de classe 1.

- Classe de section transversale des membrures de l'arc

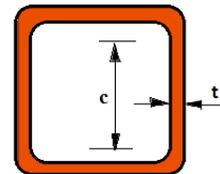
Les membrures de l'arc ont une section transversale creuse. Les âmes sont fléchies et les semelles comprimées.

Classe de l'âme : parois interne fléchis

$$c = 360 \text{ [mm]}$$

$$t = 20 \text{ [mm]}$$

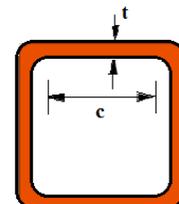
$$\Rightarrow \frac{c}{t} = 18 \leq 72 \cdot \varepsilon = 58,32 : \text{ la section est vérifiée pour la classe 1.}$$



Classe de la semelle : parois interne comprimée

$$c = 360 \text{ [mm]}$$

$$t = 20 \text{ [mm]}$$



$\Rightarrow \frac{c}{t} = 18 \leq 33 \cdot \varepsilon = 27,73$: la section est vérifiée pour la classe 1.

- Classe de section des diagonales de l'arc

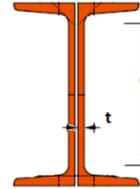
Les diagonales des treillis de l'arc ont une section transversale en U, elles reprennent les efforts tranchants, donc on a une âme comprimée et des semelles en flexion composée.

Classe de l'âme : parois interne comprimé

$$c = 318 \text{ [mm]}$$

$$t = 14 \text{ [mm]}$$

$\Rightarrow \frac{c}{t} = 22,71 \leq 33 \cdot \varepsilon = 26,73$: la section est vérifiée pour la classe 1.



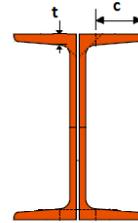
Classe de la semelle : en console comprimée

$$c = 86 \text{ [mm]}$$

$$t = 16 \text{ [mm]}$$

$$f_y = 355 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$\Rightarrow \frac{c}{t} = 5,375 \leq 9 \cdot \varepsilon = 7,29$: la section est vérifiée pour la classe 1.



1. 6. 1. 3. Vérification des barres comprimées

- Vérification de la résistance à la compression des barres comprimées

La valeur de calcul N_{Ed} de l'effort de compression dans chaque section transversale doit satisfaire la condition suivante :

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0$$

Avec $N_{c,Rd} = N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$ puisque l'absence de voilement est assurée pour toutes les sections.

A est l'aire de la section.

$$\gamma_{M0} = 1,00$$

- Pour la membrure supérieure de la poutre :

$$N_{c,Rd} = N_{pl,Rd} = \frac{11\,602 \cdot 355}{1,0} = 4\,118\,710 \text{ N}$$

$$N_{Ed} = 414\,490 \text{ N}$$

$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} = 0,10 \leq 1,0$: La membrure supérieure de la poutre résiste à l'effort de compression.

- Pour la membrure inférieure de la poutre :

$$N_{c,Rd} = N_{pl,Rd} = \frac{11\,602.355}{1,0} = 4\,118\,710 \text{ N}$$

$$N_{Ed} = 163\,170 \text{ N}$$

$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} = 0,04 \leq 1,0$: La membrure inférieure de la poutre résiste à l'effort de compression.

- Pour la diagonale de la poutre :

Comme on deux UPN qui forment une diagonale, la résistance à la compression est doublée.

$$N_{c,Rd} = N_{pl,Rd} = 2 \cdot \frac{1\,700.355}{1,0} = 2\,414\,000 \text{ N} \quad N_{Ed} = 767\,250 \text{ N}$$

$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} = 0,32 \leq 1,0$: La diagonale de la poutre résiste à l'effort de compression.

- Pour la membrure supérieure de l'arc :

$$N_{c,Rd} = N_{pl,Rd} = \frac{30\,000.355}{1,0} = 10\,650\,000 \text{ N}$$

$$N_{Ed} = 2\,797\,100 \text{ N}$$

$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} = 0,26 \leq 1,0$: La membrure supérieure de l'arc résiste à l'effort de compression.

- Pour la membrure inférieure de l'arc :

$$N_{c,Rd} = N_{pl,Rd} = \frac{30\,000.355}{1,0} = 10\,650\,000 \text{ N}$$

$$N_{Ed} = 1\,693\,930 \text{ N}$$

$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} = 0,16 \leq 1,0$: La membrure inférieure de l'arc résiste à l'effort de compression.

- Pour la diagonale de l'arc :

Même situation que la diagonale de la poutre, on a deux section en U, d'où,

$$N_{c,Rd} = N_{pl,Rd} = 2 \cdot \frac{7\,730.355}{1,0} = 10\,976\,600 \text{ N}$$

$$N_{Ed} = 518\,900 \text{ N}$$

$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} = 0,05 \leq 1,0$: La diagonale de l'arc résiste à l'effort de compression.

- Vérification de la résistance au flambement des barres comprimées

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1$$

Avec, $N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$: résistance de calcul de la barre comprimée au flambement ;

$\gamma_{M1} = 1,10$: facteur partiel pour la résistance des barres ;

$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1$: coefficient de réduction pour le mode de flambement approprié ;

$$\phi = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$$

$\bar{\lambda}$: élancement réduit approprié, déterminé à partir de la courbe de flambement ;

La courbe de flambement est choisie à partir de la géométrie de section transversale, selon les annexes VII.B et VII.C ;

α : facteur d'imperfection correspondant à la courbe de flambement concernée ;

Tableau 50 : Facteur d'imperfection α

Courbe de flambement	a ₀	a	b	c	d
Facteur d'imperfection α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Pour nos sections, l'élancement réduit $\bar{\lambda}$ peut être calculé par la formule suivante :

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\lambda_1}$$

L_{cr} : longueur de flambement dans le plan de flambement considéré, elle est déterminée à partir de l'annexe VII.E : Dans notre cas, pour les membrures $L_{cr} = L$ et pour les diagonales $L_{cr}=0,9$.

L ; avec L : longueur entre nœuds de la barre concernée.

i : rayon de giration selon l'axe adéquate déterminé en utilisant les propriétés de la section brute ;

$$\lambda_1 = 93,9. \varepsilon = 93,9. 0,81 = 76,06$$