

### XII.3.8. Justification des contraintes normales

La justification des contraintes normales consiste à calculer les contraintes dans les fibres supérieures et inférieures de la poutre pendant les différentes étapes de précontrainte. Si ces contraintes sont élevées, la solution est de redimensionner la section de la poutre ou de mettre en place des armatures tendues pour faire face à ces contraintes.

#### a) Phases de vérification

Les vérifications se font selon les phases qui suivent :

- Phase I : Mise en tension de la première famille après 7 jours d'âge du béton
  - Section résistante : section nette de la poutre ;
  - Efforts considérés : poids propre de la poutre seule, actions des câbles de la première famille après pertes de tension instantanées ;
  
- Phase II : Age du béton : 21 jours (coulage du hourdis et des entretoises effectuées)
  - Section résistante : section nette de la poutre ;
  - Efforts considérés : poids propre (poutre+hourdis), actions dues aux câbles de première famille après les pertes instantanées : rentrée d'ancrage frottement et déformation instantanée des bétons dus au hourdis.
  
- Phase III : Age : 28 jours (câbles de la deuxième famille mises en tension)
  - Section résistante : section de la poutre + hourdis (section nette)
  - Efforts considérés : poids propre de la poutre et du hourdis, actions dues aux câbles de précontrainte (1<sup>ère</sup> famille et 2<sup>ème</sup> famille) et les pertes de tensions suivantes :

#### Pertes de tension instantanées

- Frottement : 1<sup>ère</sup> famille et 2<sup>ème</sup> famille de câbles ;
- Recul d'ancrage : 1<sup>ère</sup> famille et 2<sup>ème</sup> famille de câbles ;
- Déformation instantanée du béton due à la mise en tension des câbles de la deuxième famille.

#### Chutes de tension différée

- Retrait à 28 jours : pour les câbles de la première famille ;

- Relaxation des aciers et fluage du béton : on suppose que les câbles de la première famille ont effectué 25% de ces pertes. Il n’y a pas encore de pertes de tension différées pour les câbles de deuxième famille.
- Phase IV : Après mise en place de la superstructure (après mise en tension des câbles de la deuxième famille)
  - La section résistante et pertes de précontrainte identiques à la phase III et avec la déformation instantanée du béton, due à la superstructure, qui provoque des pertes de tension dans les câbles de deux familles ;
  - les contraintes admissibles : celles de la phase III.
- Phase V : Exploitation de l’ouvrage.
  - Section résistante : section nette de la poutre et hourdis pour les charges permanente et sections homogènes de la poutre et de l’hourdis pour les charges d’exploitation.
  - Efforts considérés : poids propre de l’ouvrage et surcharges d’exploitation avec les forces de précontraintes après les pertes de tensions instantanées et différées totales.

*b) Sections de référence*

▪ Section nette

C’est la surface propre du béton en enlevant l’air de trou de gaine de précontrainte.

- Aire de la section nette

$$A_n = A - n \frac{\pi \phi^2}{4} \quad (XII.213)$$

$A$  : Aire de la section brute de la poutre

$n$  : Nombre de câbles de précontrainte au niveau de la section considérée

$\phi$  : Diamètre d’une gaine = 71 mm

- Centre de gravité par rapport à la fibre inférieure de la poutre

$$V'_n = \frac{AV' - n \frac{\pi \phi^2}{4} V'_c}{A - n \frac{\pi \phi^2}{4}} \quad (XII.214)$$

$V'$  : Position du centre de gravité de la section brute par rapport à la fibre inférieure de la poutre

$V'_c$  : Position du centre de gravité des câbles par rapport à la fibre inférieure de la poutre

- Moment d’inertie de la section par rapport à son centre de gravité

$$I_n = I + A(V' - V'_n)^2 - (V'_n - V'_c)^2 n \frac{\pi \phi^2}{4} \quad (XII.215)$$

**Tableau 108 : Caractéristiques de la section nette de la poutre seule**

X(m)	An (m <sup>2</sup> )	V'n(m)	Vn (m)	In (m <sup>4</sup> )
0.0000	1.159	1.218	1.182	0.832
1.9605	0.997	1.188	1.212	0.781
3.9210	0.993	1.193	1.207	0.776
5.8815	0.993	1.199	1.201	0.767
7.8420	0.989	1.201	1.199	0.766
9.8025	0.985	1.202	1.198	0.769
11.7630	0.985	1.207	1.193	0.759
13.7235	0.985	1.209	1.191	0.755
15.6840	0.985	1.209	1.191	0.755
17.6445	0.985	1.209	1.191	0.755
19.6050	0.985	1.209	1.191	0.755

**Tableau 109 : Caractéristiques de la section nette de la poutre et du hourdis**

X(m)	An (m <sup>2</sup> )	V'n(m)	Vn (m)	In (m <sup>4</sup> )
0.0000	1.609	1.573	1.007	1.357
1.9605	1.447	1.593	0.987	1.306
3.9210	1.443	1.598	0.982	1.297
5.8815	1.443	1.602	0.978	1.284
7.8420	1.439	1.604	0.976	1.280
9.8025	1.435	1.606	0.974	1.281
11.7630	1.435	1.609	0.971	1.268
13.7235	1.435	1.611	0.969	1.262
15.6840	1.435	1.611	0.969	1.261
17.6445	1.435	1.611	0.969	1.261
19.6050	1.435	1.611	0.969	1.261

- Section homogénéisée

C’est la section obtenue en ajoutant à section nette la section des armatures longitudinales adhérente multipliée par un coefficient d’équivalence  $k=5$ .

- Aire de la section homogénéisée

$$A_h = A_n + k n A_{cp} \quad (XII.216)$$

$A_{cp}$  : Section d'un câble de précontrainte (1130mm<sup>2</sup>)

- Centre de gravité par rapport à la fibre inférieure de la poutre :

$$V'_h = \frac{A_n V'_n + kn A_{cp} V'_c}{A_h} \quad (XII. 217)$$

- Moment d'inertie de la section par rapport à son centre de gravité :

$$I_h = I_n + A_n (V'_h - V'_n)^2 + kn A_{cp} (V'_h - V'_c)^2 \quad (XII. 218)$$

**Tableau 110 : Caractéristiques de la section homogénéisée de la poutre seule**

X(m)	Ah (m <sup>2</sup> )	V'h(m)	Vh (m)	Ih (m <sup>4</sup> )
0.0000	1.182	1.213	1.187	0.979
1.9605	1.019	1.177	1.223	0.952
3.9210	1.021	1.175	1.225	0.954
5.8815	1.021	1.172	1.228	0.958
7.8420	1.023	1.171	1.229	0.959
9.8025	1.024	1.171	1.229	0.958
11.7630	1.024	1.169	1.231	0.962
13.7235	1.024	1.168	1.232	0.964
15.6840	1.024	1.168	1.232	0.964
17.6445	1.024	1.168	1.232	0.964
19.6050	1.024	1.168	1.232	0.964

**Tableau 111 : Caractéristiques de la section homogénéisée de la poutre et du hourdis**

X(m)	Ah (m <sup>2</sup> )	V'h (m)	Vh (m)	Ih (m <sup>4</sup> )
0.0000	1.632	1.565	1.015	1.365
1.9605	1.469	1.579	1.001	1.325
3.9210	1.471	1.577	1.003	1.329
5.8815	1.471	1.576	1.004	1.335
7.8420	1.473	1.574	1.006	1.336
9.8025	1.474	1.574	1.006	1.336
11.7630	1.474	1.572	1.008	1.341
13.7235	1.474	1.572	1.008	1.344
15.6840	1.474	1.572	1.008	1.344
17.6445	1.474	1.572	1.008	1.344
19.6050	1.474	1.572	1.008	1.344

c) Contraintes admissibles

- Pour la première phase

$$\bar{\sigma}_{bc} = 0,6 f_{ct} = 0,6 \times 26,5 = 15,90 \text{ [MPa]}$$

$$\overline{\sigma}_{bt} = -0,6f_{t7} = -0,6 \times 2,19 = -1,31 \text{ [MPa]} : \text{ dans la section d'enrobage}$$

$$\overline{\sigma}_{bt} = -1,5f_{t7} = -3,28 \text{ [MPa]} : \text{ ailleurs}$$

- Pour la deuxième phase

$$\overline{\sigma}_{bc} = 0,6f_{c21} = 0,6 \times 37,86 = 22,716 \text{ [MPa]}$$

$$\overline{\sigma}_{bt} = -0,6f_{t21} = -0,6 \times 2,88 = -1,728 \text{ [MPa]} : \text{ dans la section d'enrobage}$$

$$\overline{\sigma}_{bt} = -1,5f_{t21} = -4,32 \text{ [MPa]} : \text{ ailleurs}$$

- Pour la troisième, quatrième et cinquième phase :

$$\overline{\sigma}_{bc} = 0,6f_{c28} = 0,6 \times 40 = 24 \text{ [MPa]}$$

$$\overline{\sigma}_{bt} = -0,6f_{t28} = -0,6 \times 3 = -1,8 \text{ [MPa]} : \text{ dans la section d'enrobage}$$

$$\overline{\sigma}_{bt} = -1,5f_{t28} = -4,5 \text{ [MPa]} : \text{ ailleurs}$$

d) Contraintes dans le béton

- Dans la fibre supérieure :

$$\sigma(x) = \frac{P}{A_n} + \frac{P e_p + M}{I} V \quad (XII. 219)$$

- Dans la fibre inférieure :

$$\sigma(x) = \frac{P}{A_n} + \frac{P e_p + M}{I} V' \quad (XII. 220)$$

$P$  : Force de précontrainte obtenue avec les câble à la section  $x$

$e_p$  : Excentricité du câble équivalent par rapport au centre de gravité de la section  $x$

$M$  : Moment fléchissant dû à la charge prise en compte

$I$  : Moment d'inertie de la section  $x$

$V$  : Centre de gravité de la section  $x$  par rapport à la fibre supérieure

$V'$  : Centre de gravité de la section  $x$  par rapport à la fibre inférieure

**Tableau 112 : Contraintes dans le béton durant la phase 1**

X(m)	An (m <sup>2</sup> )	I (m <sup>4</sup> )	P (MN)	ep (m)	M(MNm)	V (m)	V' (m)	$\sigma(x)$ (MPa)	
								Fibre sup	Fibre inf
0.0000	1.159	0.832	6.054	-0.253	0.000	1.182	1.218	3.042	2.978
1.9605	0.997	0.781	6.030	-0.526	1.074	1.212	1.188	2.792	2.854
3.9210	0.993	0.776	6.006	-0.669	2.034	1.207	1.193	2.964	2.998
5.8815	0.993	0.767	5.982	-0.954	2.882	1.201	1.199	1.601	1.609
7.8420	0.989	0.766	5.959	-0.901	3.616	1.199	1.201	3.289	3.283
9.8025	0.985	0.769	5.935	-0.782	4.238	1.198	1.202	5.399	5.397

X(m)	An (m <sup>2</sup> )	I (m <sup>4</sup> )	P (MN)	ep (m)	M(MNm)	V (m)	V' (m)	$\sigma(x)$ (MPa)	
								Fibre sup	Fibre inf
11.7630	0.985	0.759	5.912	-0.981	4.747	1.193	1.207	4.349	4.330
13.7235	0.985	0.755	5.889	-1.050	5.142	1.191	1.209	4.342	4.318
15.6840	0.985	0.755	5.865	-1.064	5.425	1.191	1.209	4.665	4.644
17.6445	0.985	0.755	5.842	-1.064	5.594	1.191	1.209	4.947	4.932
19.6050	0.985	0.755	5.819	-1.064	5.651	1.191	1.209	5.052	5.039

**Tableau 113 : Contraintes dans le béton durant la phase 2**

X(m)	An (m <sup>2</sup> )	I (m <sup>4</sup> )	P (MN)	ep (m)	M(MNm)	V (m)	V' (m)	$\sigma(x)$ (MPa)	
								Fibre sup	Fibre inf
0.0000	1.159	0.832	6.054	-0.253	0.000	1.182	1.218	3.042	2.978
1.9605	0.997	0.781	6.043	-0.526	1.772	1.212	1.188	3.878	3.920
3.9210	0.993	0.776	5.996	-0.669	3.358	1.207	1.193	5.020	5.032
5.8815	0.993	0.767	6.014	-0.954	4.756	1.201	1.199	4.519	4.522
7.8420	0.989	0.766	6.009	-0.901	5.969	1.199	1.201	6.949	6.951
9.8025	0.985	0.769	5.996	-0.782	6.995	1.198	1.202	9.684	9.694
11.7630	0.985	0.759	6.002	-0.981	7.834	1.193	1.207	9.154	9.190
13.7235	0.985	0.755	5.991	-1.050	8.487	1.191	1.209	9.550	9.602
15.6840	0.985	0.755	5.976	-1.064	8.953	1.191	1.209	10.159	10.223
17.6445	0.985	0.755	5.957	-1.064	9.233	1.191	1.209	10.613	10.684
19.6050	0.985	0.755	5.936	-1.064	9.326	1.191	1.209	10.774	10.848

**Tableau 114 : Contraintes dans le béton durant la phase 3**

X(m)	An (m <sup>2</sup> )	I (m <sup>4</sup> )	P (MN)	ep (m)	M(MNm)	V (m)	V' (m)	$\sigma(x)$ (MPa)	
								Fibre sup	Fibre inf
0.0000	1.609	1.357	5.737	-0.609	0.000	1.007	1.573	0.973	-0.484
1.9605	1.447	1.306	5.726	-0.931	1.772	0.987	1.593	1.269	-0.384
3.9210	1.443	1.297	7.152	-1.074	3.358	0.982	1.598	1.684	-0.367
5.8815	1.443	1.284	7.161	-1.357	4.756	0.978	1.602	1.782	-1.127
7.8420	1.439	1.280	8.610	-1.304	5.969	0.976	1.604	1.979	-0.603
9.8025	1.435	1.281	10.031	-1.186	6.995	0.974	1.606	3.264	0.849
11.7630	1.435	1.268	10.020	-1.383	7.834	0.971	1.609	2.370	-0.667
13.7235	1.435	1.262	9.987	-1.451	8.487	0.969	1.611	2.348	-0.705
15.6840	1.435	1.261	9.947	-1.466	8.953	0.969	1.611	2.608	-0.258
17.6445	1.435	1.261	9.902	-1.466	9.233	0.969	1.611	2.842	0.153
19.6050	1.435	1.261	9.853	-1.466	9.326	0.969	1.611	2.935	0.330

**Tableau 115 : Contraintes dans le béton durant la phase 4**

X(m)	An (m <sup>2</sup> )	I (m <sup>4</sup> )	P (MN)	ep (m)	M(MNm)	V (m)	V' (m)	$\sigma(x)$ (MPa)	
								Fibre sup	Fibre inf
0.0000	1.609	1.357	5.571	-0.609	0.000	1.007	1.573	0.945	-0.470
1.9605	1.447	1.306	5.560	-0.931	1.772	0.987	1.593	1.271	-0.310
3.9210	1.443	1.297	6.969	-1.074	3.358	0.982	1.598	1.706	-0.251
5.8815	1.443	1.284	6.977	-1.357	4.756	0.978	1.602	1.745	-1.043

X(m)	An (m <sup>2</sup> )	I (m <sup>4</sup> )	P (MN)	ep (m)	M(MNm)	V (m)	V' (m)	$\sigma(x)$ (MPa)	
								Fibre sup	Fibre inf
7.8420	1.439	1.280	8.405	-1.304	5.969	0.976	1.604	2.040	-0.411
9.8025	1.435	1.281	9.805	-1.186	6.995	0.974	1.606	3.310	1.027
11.7630	1.435	1.268	9.789	-1.383	7.834	0.971	1.609	2.453	-0.423
13.7235	1.435	1.262	9.751	-1.451	8.487	0.969	1.611	2.446	-0.432
15.6840	1.435	1.261	9.704	-1.466	8.953	0.969	1.611	2.712	0.027
17.6445	1.435	1.261	9.652	-1.466	9.233	0.969	1.611	2.949	0.447
19.6050	1.435	1.261	9.594	-1.466	9.326	0.969	1.611	3.046	0.634

**Tableau 116 : Contraintes dans le béton durant la phase 5**

X(m)	An (m <sup>2</sup> )	I (m <sup>4</sup> )	P (MN)	ep (m)	M(MNm)	V (m)	V' (m)	$\sigma(x)$ (MPa)	
								Fibre sup	Fibre inf
0.0000	1.609	1.357	5.519	-0.609	0.000	0.987	1.593	0.986	0.516
1.9605	1.447	1.306	5.506	-0.931	2.558	0.982	1.598	1.874	0.663
3.9210	1.443	1.297	6.805	-1.074	4.815	0.978	1.602	2.837	1.639
5.8815	1.443	1.284	6.795	-1.357	6.687	0.976	1.604	2.784	1.542
7.8420	1.439	1.280	8.097	-1.304	8.559	0.974	1.606	4.108	3.123
9.8025	1.435	1.281	9.368	-1.186	9.897	0.971	1.609	5.610	5.004
11.7630	1.435	1.268	9.316	-1.383	11.234	0.969	1.611	5.229	4.393
13.7235	1.435	1.262	9.237	-1.451	12.037	0.969	1.611	5.386	4.689
15.6840	1.435	1.261	9.145	-1.466	12.839	0.969	1.611	5.937	5.648
17.6445	1.435	1.261	9.040	-1.466	13.107	0.969	1.611	6.188	6.114
19.6050	1.435	1.261	8.923	-1.466	13.374	0.000	0.000	6.219	6.219

D'après ces tableaux, les contraintes normales dans le béton sont en tous points admissibles.

### XII.3.9. Justification des contraintes tangentielles

Le but de cette vérification est de montrer que l'effet des efforts tranchant cumulé à l'effet des moments fléchissants et de l'effort normal ne compromet pas la sécurité de l'ouvrage.

#### a) Contraintes admissibles

Les poutres précontraintes soumises à des efforts de cisaillement ont deux modes de rupture du béton :

- Le premier par fissuration, pour lequel la contrainte admissible a pour expression :

$$\bar{\tau}_1^2 = \sigma_x \sigma_t + 0.4 f_{tj} \left[ f_{tj} + \frac{2}{3} \sigma_x + \sigma_t \right] \quad (XII.221)$$

- Le second par compression cisaillement, pour lequel la contrainte admissible a pour expression :

$$\bar{\tau}_2^2 = \sigma_x \sigma_t + 2 \frac{f_{tj}}{f_{cj}} (0.6 f_{cj} - \sigma_x) \left[ f_{tj} + \frac{2}{3} \sigma_x + \sigma_t \right] \quad (XII.222)$$

Dans ces expressions :

$\sigma_t$  : Contrainte normale transversale. Elle est nulle dans notre cas car nous n'utilisons pas d'armatures transversales de précontrainte.

$\sigma_x = \frac{\sum P_i}{A_n}$  : Contrainte normale dû aux actions extérieures à la précontrainte. An représente la section de la poutre seule

b) Contraintes tangentielles dans une section

La contrainte tangentielle au niveau d'une section suit la loi de JOURAVSKI :

$$\tau = \frac{V_{red} S_A}{I_n b_n} \quad (XII.223)$$

$S_A$  : Moment statique de la partie située au-dessus du centre de gravité G par rapport à l'axe horizontal passant par G

$I_n$  : Moment d'inertie de la section nette par rapport à l'axe horizontal passant par G

$b_n$  : Largeur de la section nette au niveau du centre de gravité

$V_{red}$  : Effort tranchant réduit

$$V_{red} = |V - \sum P_i \sin \alpha_i| \quad (XII.224)$$

Où V est l'effort tranchant au niveau de la section et  $\alpha_i$  l'angle de relevage du câble i

c) Vérification des sections particulières

- Section d'about (x=0m)

$$A_n = 1.159 \text{ m}^2$$

$$I_n = 0.832 \text{ m}^2$$

$$b_n = 0.229 \text{ m}$$

$$S_A = 0.3375 \text{ m}^3$$

$$V_{red} = |1.364 - 1.770|$$

$$V_{red} = 0.406 \text{ MN}$$

$$\tau = \frac{0.406 \times 0.3375}{0.832 \times 0.229}$$

$$\tau = 0.720 \text{ MPa}$$

$$\sigma_x = \frac{5.519}{1.159}$$

$$\sigma_x = 4.761 \text{ MPa}$$

$$\bar{\tau}_1 = \sqrt{4.761 \times 0 + 0.4 \times 3 \left[ 3 + \frac{2}{3} 4.761 + 0 \right]}$$

$$\bar{\tau}_1 = 2.272 \text{ MPa}$$

$$\bar{\tau}_2 = \sqrt{4.761 \times 0 + 2 \frac{3}{40} (0.6 \times 40 - 4.761) \left[ 3 + \frac{2}{3} 4.761 + 0 \right]}$$

$$\bar{\tau}_2 = 4.221 \text{ MPa}$$

$$\text{Ainsi } \tau \leq \min(\bar{\tau}_1; \bar{\tau}_2)$$

▪ Section d'arrêt du câble n°5 (x=3.333m)

$$A_n = 0.993 \text{ m}^2$$

$$I_n = 0.776 \text{ m}^2$$

Les méthodes de calcul sont les mêmes, nous trouvons :

$$\tau = 1.209 \text{ MPa}$$

$$\bar{\tau}_1 = 3.014 \text{ MPa}$$

$$\bar{\tau}_2 = 4.412 \text{ MPa}$$

$$\text{Ainsi } \tau \leq \min(\bar{\tau}_1; \bar{\tau}_2)$$

▪ Section d'arrêt du câble n°6 (x=6.667m)

$$A_n = 0.990 \text{ m}^2$$

$$I_n = 0.767 \text{ m}^2$$

Les méthodes de calcul sont les mêmes, nous trouvons :

$$\tau = 1.386 \text{ MPa}$$

$$\bar{\tau}_1 = 2.851 \text{ MPa}$$

$$\bar{\tau}_2 = 4.32 \text{ MPa}$$

$$\text{Ainsi } \tau \leq \min(\bar{\tau}_1; \bar{\tau}_2)$$

▪ Section d'arrêt du câble n°7 (x=10m)

$$A_n = 0.985 \text{ m}^2$$

$$I_n = 0.755 \text{ m}^2$$

Les méthodes de calcul sont les mêmes, nous trouvons :

$$\tau = 1.005 \text{ MPa}$$

$$\bar{\tau}_1 = 3.552 \text{ MPa}$$

$$\bar{\tau}_2 = 4.489 \text{ MPa}$$

$$\text{Ainsi } \tau \leq \min(\bar{\tau}_1; \bar{\tau}_2)$$

Les contraintes tangentielles dans les sections critiques sont donc toutes admissibles.

XII.3.10. Ferrailage passif de la poutre

a) Armatures longitudinales de peau

Sur toute la périphérie de la section de la poutre, il faut prévoir 3 cm<sup>2</sup> d'armature par mètre de parement. Soit des HA10 tous les 25 cm sur toute la périphérie

b) Armatures de non fragilité

Nous avons vu dans la vérification de contraintes normales que ces dernières sont toutes admissibles. Néanmoins nous remarquons des contraintes de traction modérées dans la fibre inférieure. Les règles BPEL stipulent que pour ce cas il faut prévoir des armatures minimales passives telles que :

$$A_s = \frac{B_t}{1000} + \frac{N_{Bt}}{f_e} \times \frac{f_{tj}}{\sigma_{bt}} \quad (XII.227)$$

$B_t$ : Aire du béton tendu

$$B_t = b y'_t \quad (XII.228)$$

$N_{Bt}$  : Résultante des efforts de traction dans la section

$$N_{Bt} = \frac{b y'_t \sigma_{bt}}{2} \quad (XII.229)$$

Alors finalement :

$$A_s = b y'_t \left( \frac{1}{1000} + \frac{1}{2} \times \frac{f_{tj}}{f_e} \right) \quad (XII.230)$$

Où :

$$y'_t = h_t \frac{\sigma_{bt}}{\sigma_{bt} + \sigma_{bc}} \quad (XII.231)$$

$\sigma_{bt}$ : Valeur absolue de la contrainte maximale de traction observée durant les 5 phases

$\sigma_{bc}$ : Contrainte de compression dans la fibre supérieure de la section considérée

AN : Nous avons comme contrainte de traction maximale dans la fibre inférieure :

$\sigma_{bt} = -1.127 \text{ MPa}$  à la phase 3,  $x = 5.88 \text{ m}$ , alors :

$$y'_t = 0.35 \times \frac{1.127}{1.127 + 1.782}$$

$$y'_t = 0.136 \text{ m}$$

$$A_s = 0.80 \times 0.136 \times \left( \frac{1}{1000} + \frac{1}{2} \times \frac{3}{400} \right)$$

$$A_s = 5.15 \text{ cm}^2$$

Prenons :

$$A_s = 5 \text{ HA12} = 5.65 \text{ cm}^2$$

c) Armatures transversales

$$\frac{A_t}{s_t} \geq \frac{0.6 b_0 \gamma_s}{f_e} \quad (\text{XII. 232})$$

$b_0$  : Epaisseur minimale de l'âme

$$s_t \leq \min(0.8h; 3b_0; 1\text{m}) \quad (\text{XII. 233})$$

AN :

$$\frac{A_t}{s_t} \geq \frac{0.6 \times 0.2 \times 1.15}{400}$$

$$\frac{A_t}{s_t} \geq 3.45 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Et

$$s_t \leq \min(0.8 \times 2.40; 3 \times 0.2; 1\text{m})$$

$$s_t \leq 0.6 \text{ m}$$

Ainsi :

$$A_t \geq 2.07 \text{ cm}^2$$

Soit :

$$A_t = 2\text{HA12} = 2.26 \text{ cm}^2 = \text{cadre HA12 tous les } 0.5 \text{ m}$$

▪ Vérification des armatures transversales

La contrainte de cisaillement doit rester admissible.

$$\tau_{u,red} = \frac{T_{red,u} S_A}{I_n b_n} \quad (XII.234)$$

Avec :

$$T_{red,u} = |V_u - \Sigma P_i \sin \alpha_i| \quad (XII.235)$$

AN :

$$T_{red,u} = |1.837 - 1.770|$$

$$T_{red,u} = 0.117 \text{ MN}$$

$$\tau_{u,red} = \frac{0.066 \times 0.3375}{0.832 \times 0.229}$$

$$\tau_{u,red} = 0.117 \text{ MPa}$$

Et

$$\bar{\tau} = \frac{A_t f_e}{b_n S_A \gamma_s \tan \beta} + \frac{f_{t28}}{3} \quad (XII.236)$$

Avec

$$\beta = 0.5 \arctan \frac{2\tau_u}{\sigma_x} \quad (XII.237)$$

AN :

$$\beta = 0.5 \arctan \frac{2 \times 0.117}{0.986}$$

$$\beta = 0.1165$$

$$\bar{\tau} = \frac{2.26 \times 10^{-4} \times 400}{0.229 \times 0.3375 \times 1.15 \times 0.117} + \frac{3}{3}$$

$$\bar{\tau} = 8.70 \text{ MPa}$$

$$\text{Ainsi } \tau_{u,red} \leq \bar{\tau}$$

▪ Vérification des bielles

La vérification des bielles de béton s'exprime par :

$$\tau_{u,red} \leq \frac{0.85 f_{c28}}{3 \gamma_b} \sin 2\beta \quad (XII.238)$$

AN :

$$\frac{0.85 f_{c28}}{3 \gamma_b} \sin 2\beta = \frac{0.85 \times 40}{3 \times 1.5} \sin(2 \times 0.1165)$$

$$\frac{0.85 f_{c28}}{3 \gamma_b} \sin 2\beta = 1.745 \text{ MPa} \geq \tau_{u,red} = 0.117 \text{ MPa}$$

Ainsi la condition est satisfaite.