

CORRIGÉ

1. VÉRIFIER AUX ELS LA SECTION DE LA POUTRE C À MI-TRAVÉE

Sollicitations à mi-travée :

- Moment dû au poids propre $M_g = 10,64 \text{ MN.m}$
- Moment dû aux équipements $M_{ge} = 4,48 \text{ MN.m}$
- Moment dû aux charges variables $M_q = 6,73 \text{ MN.m}$

Combinaisons

- ELS Quasi-permanent $M_{QP} = 15,12 \text{ MN.m}$
- ELS Fréquent $M_{freq} = 19,16 \text{ MN.m}$
- ELS Caractéristique $M_{cara} = 21,85 \text{ MN.m}$

Contraintes élastiques en service :

- $A_p = 931,2 \text{ mm}^2$
- $d' = 0,01225 \text{ m}$, soit $e_0 = -1,784 \text{ m}$

Données initiales

- Tension à l'origine $\sigma_p = 1100 \text{ MPa}$
- $P_u = 10,243 \text{ MN}$

	<i>QP</i>	<i>Fréquent</i>	<i>Cara</i>
<i>Fibre supérieure</i>	5,2 MPa	7,8 MPa	9,5 MPa
<i>Fibre inférieure</i>	10,7 MPa	6,2 MPa	3,2 MPa

Les trois critères réglementaires sont satisfaits.

Avec tension « vraies mesurées »

- Tension moyenne mesurée $\sigma_p = 950 \text{ MPa}$
- $P_u = 8,846 \text{ MN}$

	<i>QP</i>	<i>Fréquent</i>	<i>Cara</i>
<i>Fibre supérieure</i>	6,6 MPa	9,1 MPa	10,8 MPa
<i>Fibre inférieure</i>	2,0 MPa	-2,5 MPa	-5,5 MPa

Le critère réglementaire pour les combinaisons fréquentes et caractéristiques ne sont pas satisfaits.

Avec tension « vraies mesurées » et pertes de 30 fils

- Tension moyenne mesurée $\sigma_p = 750 \text{ MPa}$
- $P_u = (1-30/240) \times 8,846 = 7,740 \text{ MN}$

	<i>QP</i>	<i>Fréquent</i>	<i>Cara</i>
<i>Fibre supérieure</i>	7,0 MPa	9,5 MPa	11,2 MPa
<i>Fibre inférieure</i>	-0,4 MPa	-4,9 MPa	-7,8 MPa

Le critère réglementaire pour les combinaisons fréquentes et caractéristiques ne sont pas satisfaits.

2. CALCULER ET PROPOSER LA PRÉCONTRAINTE ADDITIONNELLE

De façon à recomprimer la fibre inférieure jusqu'à sa limite autorisée, il convient d'ajouter une force de précontrainte P tel que :

$$-f_{ctm} \leq \sigma_{cara}(z = -v') + P \left(\frac{1}{A_c} + \frac{e_0}{I_G} \times -v' \right)$$

Soit $P \geq 1,70$ MN, en supposant que la précontrainte additionnelle sous-bandée en cette section est située à 20 cm sous le talon de la poutre.

En retenant 2 câbles 7T15 (de force utile après perte de 1,16 MN), la force totale est $P = 2,32$ MN.

Alors les contraintes sont :

	QP	Fréquent	Cara
Fibre supérieure	5,7 MPa	8,2 MPa	9,9 MPa
Fibre inférieure	6,3 MPa	1,9 MPa	-1,1 MPa

Les trois critères réglementaires sont alors satisfaits.

Schématiquement parlant, la solution proposée est :

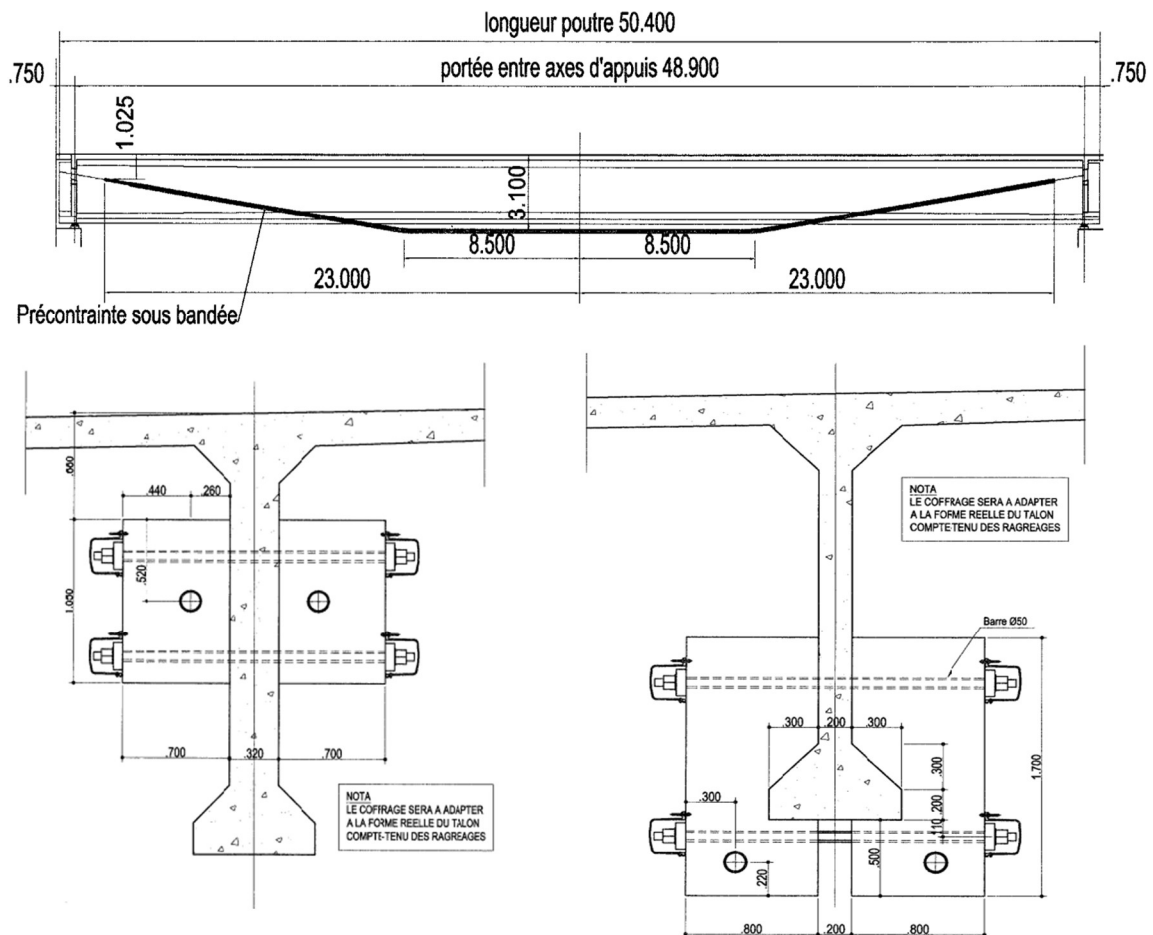


FIGURE 14 - PROPOSITION DE RENFORCEMENT

3. ÉTUDIER LE CLOUAGE DES MASSIFS D'ANCRAGE

A. CLOUAGE DES MASSIFS D'ANCRAGE (BLOCHETS)

Exemple de barre de brêlage :

Diamètre nominal mm	Diamètre extérieur maximum mm	Section nominale mm ²	Masse par mètre kg/m	Pas mm	Charge de rupture kN	Limite Elastique kN
26	30,43	531	4,56	6	547	443
32	36,20	804	6,66	6	830	670
36	40,20	1018	8,45	6	1050	850
40	45,27	1257	10,41	8	1295	1050
50	54,81	1963	16,02	8	2020	1640
75	76,50	4185	33,2	8	4310	3495

FIGURE 15 - EXTRAIT DE LA DOCUMENTATION FOURNISSEUR

En considérant un effort majoré par 1,2 et un coefficient de rugosité de 0,9, il sera retenu des barres de brêlage de type $\Phi 26$, de section utile 531 mm^2 . En supposant une tension moyenne après toutes pertes de 535 MPa (les armatures assurant le clouage des bossages des déviateurs étant en général de très faible longueur subissent des pertes de tension importantes par fluage local sous ancrage ou par défaut de calage. Pour les réduire, il faut effectuer au moins deux mises en tension successives), l'effort capable est de 284 kN .

Le nombre de barres $\phi 26$ nécessaires est donné par $n_b \geq \frac{1,05 \cdot m_{ext}}{\min(1,2 \times 0,9; 1,0) \cdot 0,95 \cdot P_{m,1barr}} = 5,63$

Aux ELS, il faut donc 6 barres de brêlage $\Phi 26$.

Il est proposé d'ajouter des aciers passifs afin de reprendre le complément d'efforts aux ELU tel que :

$$A_s \geq \frac{\gamma_{p,unfav} \cdot P_{m,ext} - \mu \cdot \gamma_{p,fav} \cdot n_b \cdot P_{m,barre}}{\mu \cdot f_{yd}} = 18,3 \text{ cm}^2$$

Il sera possible de mettre en place 10 HA16 ($20,10 \text{ cm}^2$),

Il est proposé l'implantation suivante (il conviendra de s'assurer du calepinage exact des barres après avoir réalisé un repérage précis des gaines existantes) :

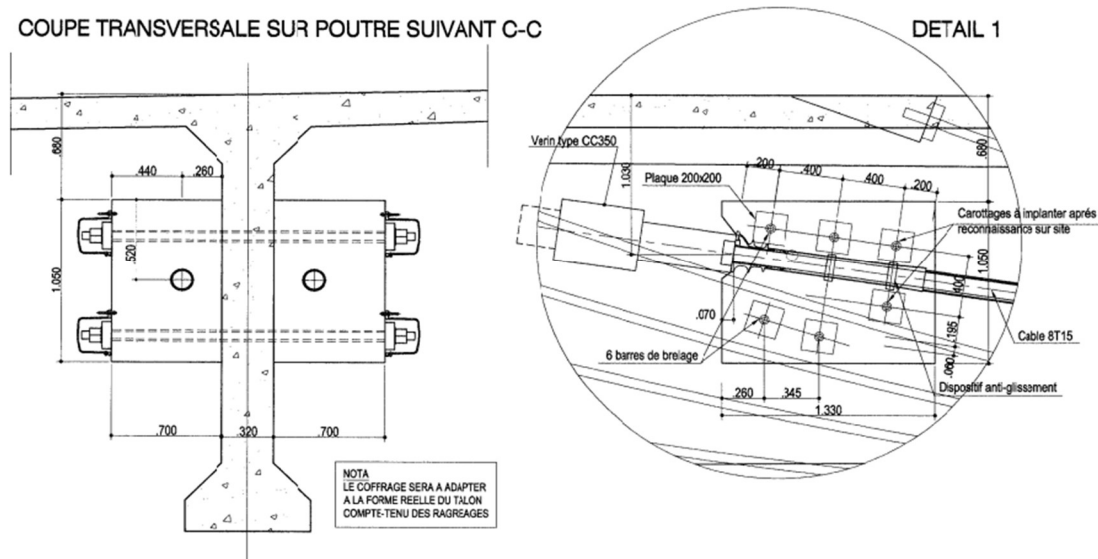


FIGURE 16 - PLAN DE RENFORCEMENT ET DÉTAILS DU BLOCHET

B. CLOUAGE DES DÉVIATEURS

Les déviateurs permettent la déviation du câble (et de la gaine). La position des câbles en dehors de la poutre, désaxée par rapport au massif, induit un moment de torsion du massif.

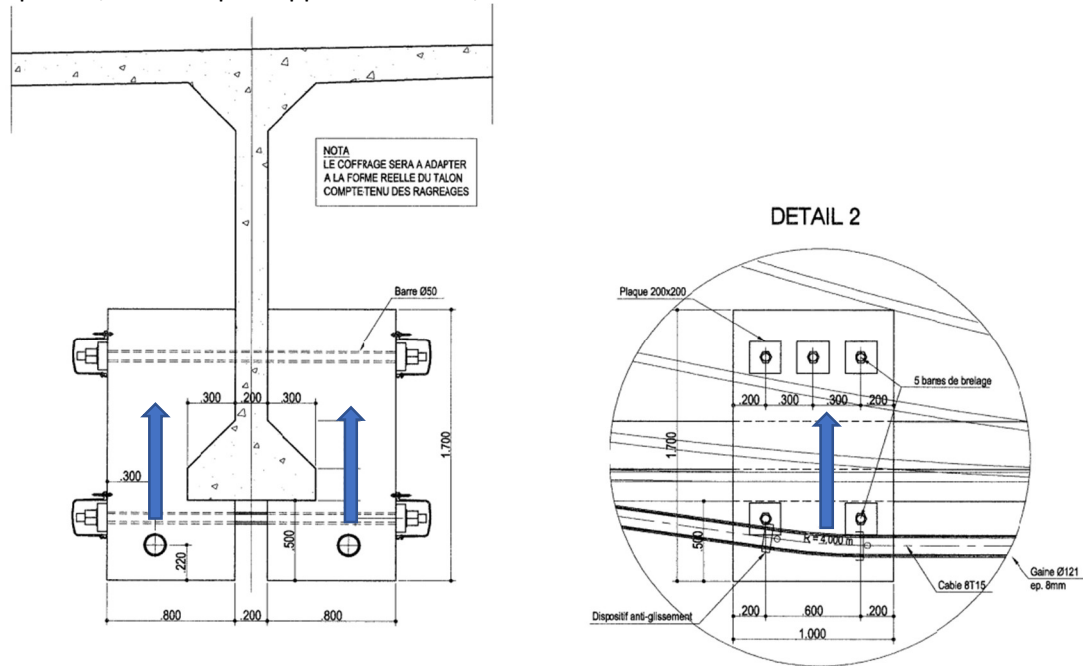


FIGURE 17 - PLAN DU DÉVIATEUR ET SCHÉMA DE POUSÉE AU VIDE

La force de poussée au vide au droit du déviateur, pour câble, est : $P = F/R \times L$

$$P = F \times \frac{L}{R} = 1,74 \text{ MN} \times \frac{1,0\text{m}}{4,0\text{m}} = 434 \text{ kN}$$

Le moment généré par la force P à l'axe de la poutre est donc :

$$C = 2 \times P \cdot \left(0,800 + \frac{0,200}{2} - 0,300 \right) = 521 \text{ kN.m}$$

Qui doit-être équilibré par les barres de brêlage.

L'effort de traction minimal que doit reprendre les barres inférieures est donc :

$$T = \frac{C}{0,110 + 1,200 - 0,400} = 673 \text{ kN} \leq 2 \times 521 = 1042 \text{ kN}$$

La disposition des barres de brêlage est donc acceptable.

4. ÉTUDIER DE LA DIFFUSION DES EFFORTS CONCENTRÉS

A. FERRAILLAGE D'ÉCLATEMENT DANS LE PRISME LOCAL

Le béton des blochets est supposé de type C45/50, avec une résistance caractéristique à 7 jours (moment de mise en précontrainte) de 32 MPa.

Pour un câble 7T15 (dont les dimensions de l'ancrage sont 220×220), une force de 1,74 MN à ancrer. L'aire minimale théorique de diffusion est donc de $1,74/(0,6 \times 32) = 905 \text{ cm}^2$. En gardant l'homothétie, les dimensions du prisme sont $c = c' = 301 \text{ mm}$. La longueur du prisme est donc $\delta = 361 \text{ mm}$.

Le blochet ayant une longueur de 1,330 m et une hauteur de 1,050 m, le prisme local est par conséquent à l'intérieur du blochet.

L'angle que forme le câble par rapport à l'horizontal est environ de -8° .

Par conséquent :

$$\xi = \sqrt{\frac{2}{d \times \left(\frac{3}{h} + \frac{1}{c}\right)}} = \sqrt{\frac{2}{\frac{2,820}{2} \times \left(\frac{3}{2,820} + \frac{1}{0,306}\right)}} = 0,569$$

Et, avec des aciers Fe E 500 B :

$$A_e = [0,15 \times \xi + \sin \alpha \times (\xi - 1)] \frac{F_d}{f_{yd}} = 5,8 \text{ cm}^2$$

Soit : $16,1 \text{ cm}^2/\text{m}$ sur une longueur δ .

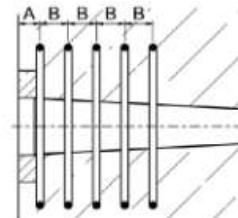
L'EN1992-2 NA annexe J donne pour le ferrailage minimum de non éclatement :

$$A_{s,min} = 0,15 \frac{P_{max}}{f_{yd}} \times \gamma_{p,unfav} = 0,15 \times \frac{1,74}{435} = 6,9 \text{ cm}^2 \text{ soit } 16,6 \text{ cm}^2/\text{m}$$

L'ATE du fournisseur préconise la mise en oeuvre de d'aciers « spirale » de diamètre 14 mm en 7 tours (frette) sur une longueur de 290 mm de donne

$$A_e = \frac{\pi \Phi^2}{\frac{4}{290}} = 26,2 \text{ cm}^2 \text{ soit } 37,2 \text{ cm}^2/\text{m}.$$

Ces aciers, fournis et conseillés par le fournisseur seront dans tous les cas mis en place.



Le ferrailage de peau est égal à $3\% \times F_d / f_{yd} = 1,4 \text{ cm}^2$ à positionner au voisinage de la zone chargée dans les deux directions. Soit $5,6 \text{ cm}^2/\text{ml}$ sur $a/4 = 25 \text{ cm}$.

On retiendra des HA 8 dans les deux directions en 3 nappes ($1,5 \text{ cm}^2$).

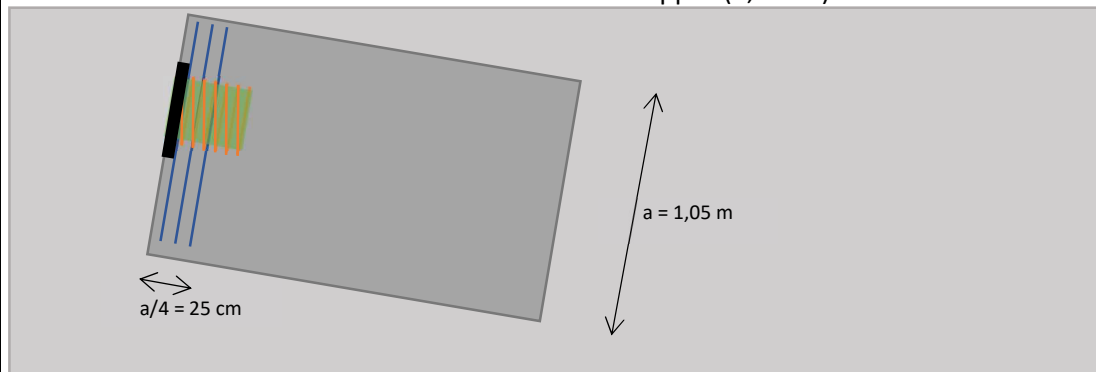


FIGURE 18 - SCHÉMA DE FERRAILLAGE D'ÉCLATEMENT À L'ARRIÈRE DE LA PLAQUE D'ANCRAGE

B. FERRAILLAGE DE DIFFUSION

Dans le cadre de ce TD, seule la diffusion verticale est regardée.

Nous avons fait l'hypothèse que la longueur de régularisation est fixée à h (simplification pédagogique mais ordre de grandeur pour un unique ancrage située à la moitié de la hauteur).

Donc : $L_R = 2,82$ m. La longueur de régularisation dépasse donc légèrement la taille du blochet.

Pour déterminer ces armatures d'équilibre, il est nécessaire de réaliser plusieurs coupes sur la hauteur de la section. En pratique, on constate souvent que les coupes dimensionnantes se trouvent souvent au niveau des plaques d'ancrage.

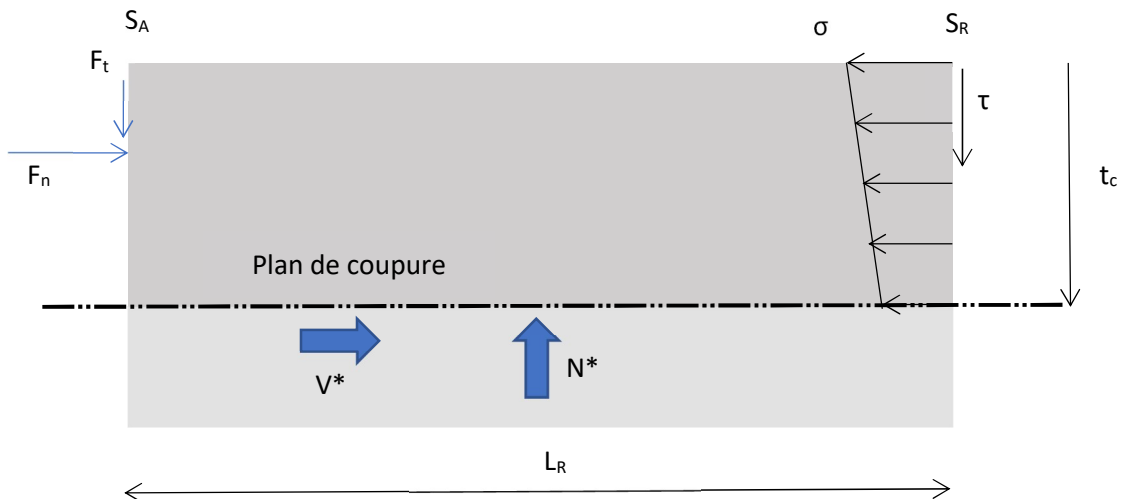


FIGURE 19 - SCHÉMA DE DIFFUSION DES EFFORTS

La section entière étant étudiée, il convient de prendre en compte la contribution des deux câbles.

Dans un premier temps, il convient de mettre à jours les propriétés mécaniques de la section, puisque l'ajout des blochets modifie le contour de la section :

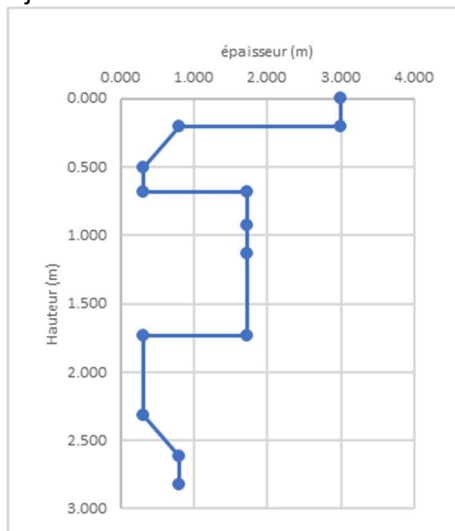


FIGURE 20 - ÉPAISSEUR DE LA SECTION SUR PILE LE LONG DE LA HAUTEUR

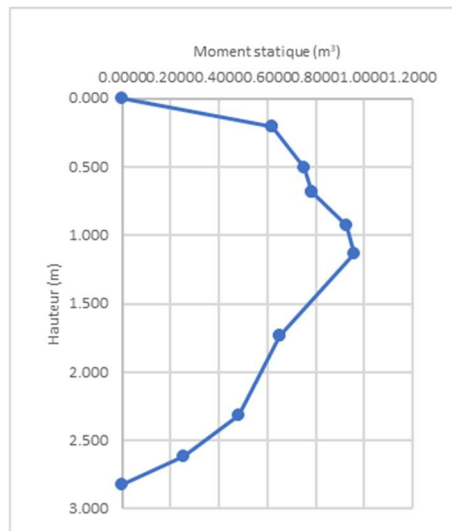


FIGURE 21 - MOMENT STATIQUE DE LA SECTION EN FONCTION DE LA HAUTEUR

$A = 1,148 \text{ m}^2$
 $v = 1,131 \text{ m}$
 $v' = 1,689 \text{ m}$
 $I_G = 3,888 \text{ m}^4$

La position des câbles par rapport au centre de gravité est donc :
 $e_0 = -0,07 \text{ m}$

Les contraintes normales et tangentielles en section S_R sont calculées le long de la hauteur de la section :

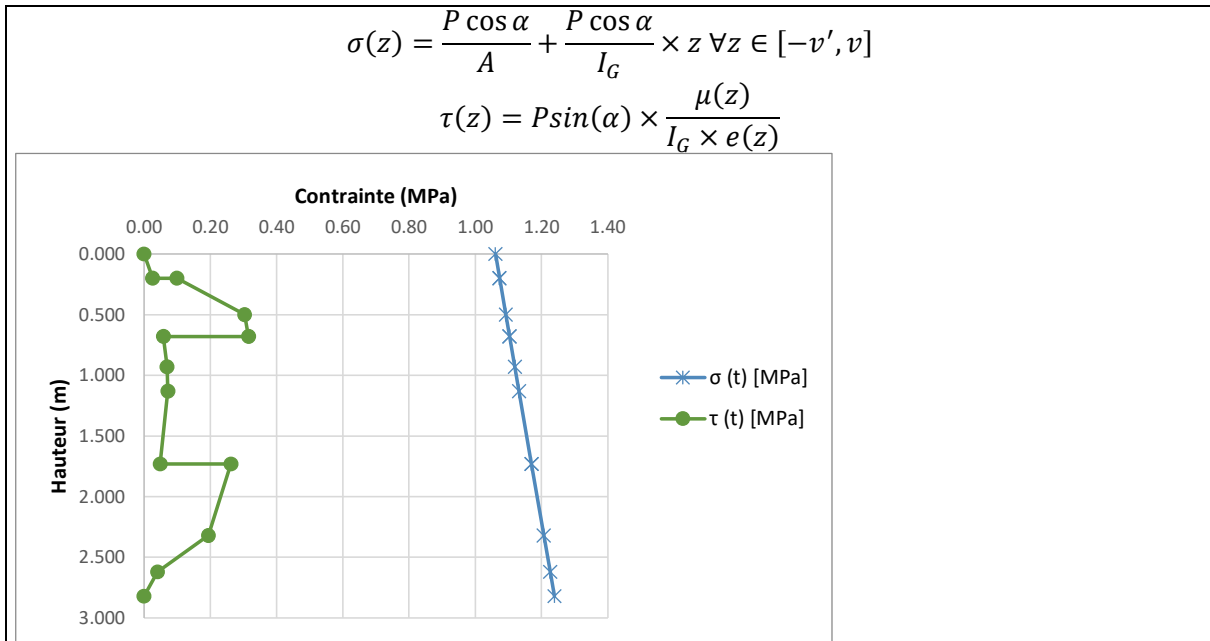


FIGURE 22 - CONTRAINTES CALCULÉES (NORMALES ET TANGENTIELLES) DANS LE PLAN DE LA SECTION RÉGULARISÉE S_R

On s'intéresse ici aux deux coupures suivantes :

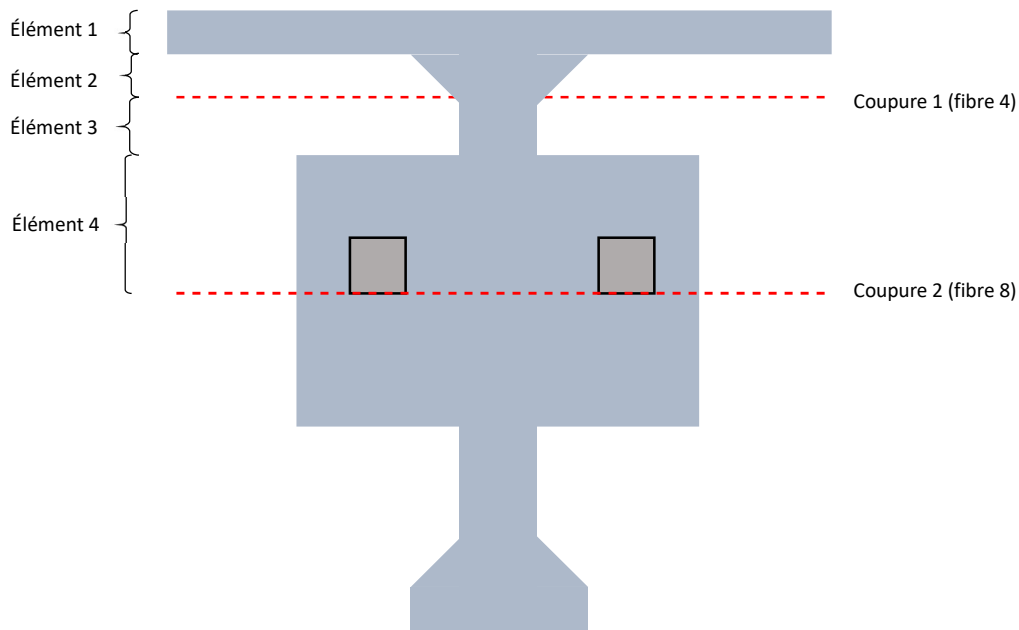


FIGURE 23 - SCHÉMA DES DEUX COUPURES

Il est nécessaire maintenant d'estimer les efforts qui transitent dans chacune des coupures. Aussi,

- Pour toutes les coupures qui se trouvent au-dessus du câble :
 - $V^* = \int_{z=-t_c}^{z=0} \sigma(z) \cdot e(t) dz$
 - $N^* = \int_{z=-t_c}^{z=0} \tau(z) \cdot e(t) dz$
- Pour toutes les coupures qui se trouvent en dessous du câble :
 - $V^* = -F_n + \int_{z=-t_c}^{z=0} \sigma(z) \cdot e(t) dz$
 - $N^* = F_t + \int_{z=-t_c}^{z=0} \tau(z) \cdot e(t) dz$

Les contraintes calculées par fibres sont :

	Fibre	z (m)	Largeur (m)	σ (MPa)	τ (MPa)
Point haut	1	0,000	3,000	1,06	0,0000
Fin hourdis sup	2	0,200	3,000	1,07	0,0266
Haut gousset sup	3	0,200	0,800	1,07	0,0997
Bas goussef sup	4	0,500	0,320	1,09	0,3035
Haut du blochet -	5	0,680	0,320	1,10	0,3160
Haut du blochet +	6	0,680	1,720	1,10	0,0588
Plaque haut	7	0,930	1,720	1,12	0,0693
Plaque bas	8	1,130	1,720	1,13	0,0719
Bas du blochet +	9	1,730	1,720	1,17	0,0488
Bas du blochet -	10	1,730	0,320	1,17	0,2623
Haut gousset inf	11	2,320	0,320	1,21	0,1944
Bas gousset inf	12	2,620	0,800	1,23	0,0409
Point bas	13	2,820	0,800	1,24	0,0000

TABLEAU 2 – CONTRAINTES CALCULÉES POUR CHAQUE FIBRE

Pour la coupure 1 :

$$V^* = X_R = \int_{z=-t_c}^{z=0} \sigma(z) \cdot e(z) dz$$

L'intégrale du produit de deux trapèzes donne, en supposant une variation linéaire de l'épaisseur :

Alors : $V^* = 0,822 MN$

$$N^* = Z_R = - \int_{z=-t_c}^{z=0} \tau(z) \cdot e(z) dz$$

Alors $N^* = 0,008 MN$

Pour la coupure 2 :

Alors : $V^* = -1,814 MN$

$$N^* = -Z_p + \int_{z=-t_c}^{z=0} \tau(z) \cdot e(z) dz$$

Alors $N^* = -0,392 MN$

Si l'on poursuit ce travail, il est possible tracer, pour toutes les coupures, les efforts calculés :

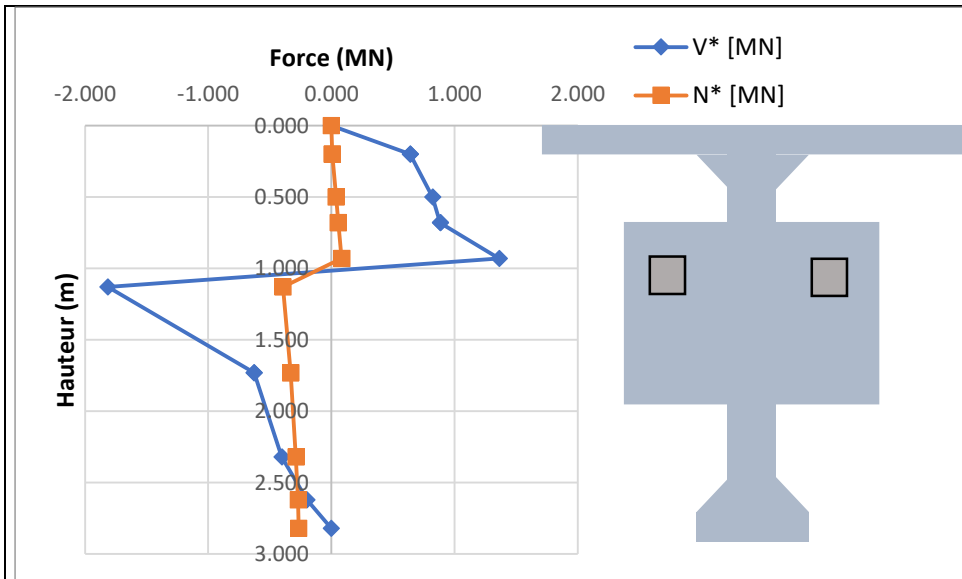


FIGURE 24 - EFFORTS AU DROIT DE CHAQUE COUPURE

Les contraintes le long du plan de coupure sont déduites :

- Contrainte de cisaillement : $\tau^* = \frac{V^*}{L_R \times e(t_c)}$
- Contrainte normale : $\sigma^* = \frac{N^*}{L_R \times e(t_c)}$

Pour la coupure 1 :

- $\tau^* = 0,911 \text{ MPa}$
- $\sigma^* = 0,044 \text{ MPa}$

L'intégrité du béton est vérifiée car $|\tau^*| - \sigma^* \leq f_{csd} = 2,2 \text{ MPa}$

Pour la coupure 2 :

- $\tau^* = 0,374 \text{ MPa}$
- $\sigma^* = 0,081 \text{ MPa}$

L'intégrité du béton est vérifiée car $|\tau^*| - \sigma^* \leq f_{csd} = 2,2 \text{ MPa}$

Ici, au niveau de toutes les coupure, l'intégrité du béton est vérifiée.

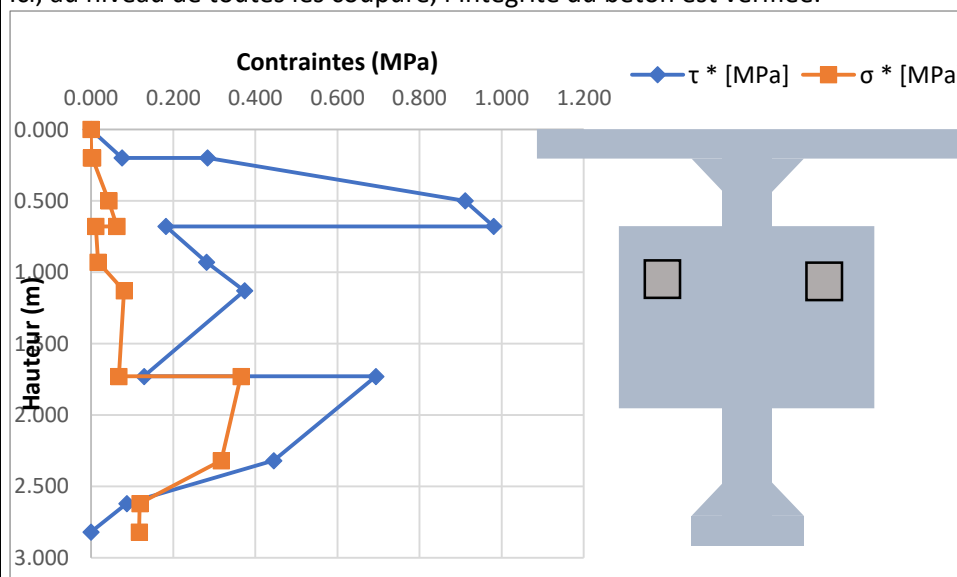


FIGURE 25 - CONTRAINTE AU DROIT DE CHAQUE COUPURE

Au final, la quantité d'acier de diffusion est donnée par :

$$A_{sc,red} = \frac{(|V^*| \tan \theta - N^*)_{red}}{f_{yd}}$$

Avec $\theta = 26,5^\circ$.

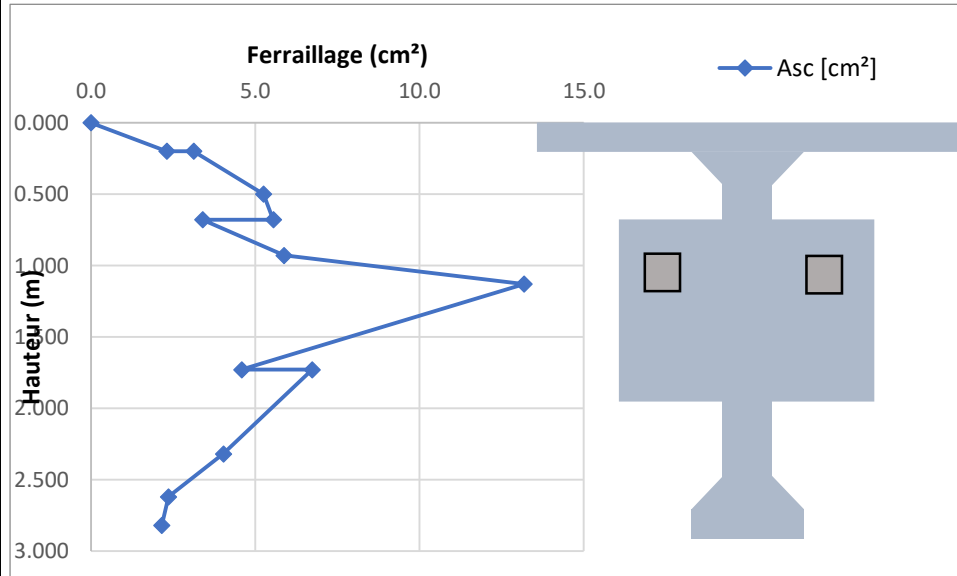


FIGURE 26 - QUANTITÉ D'ACIER CALCULÉE LE LONG DE LA HAUTEUR

La quantité maximale d'acier de diffusion à placer se situe sous la plaque d'ancrage, et la quantité d'acier à placer est 13,2 cm².

Les règles d'usage imposent de positionner 2/3 des aciers dans le 1/3 de L_R, soit 9,4 cm²/m sur 94 cm, puis, dans le second tiers le reste, soit 4,7 cm²/ml.

En résumé :

- Dans le 1^{er} tiers : cadre HA16 (deux brins) espacés de 180 mm
- Dans le second tiers : cadre HA16 (deux brins) espacés de 300 mm

Le second tiers dépasse la taille du blochet, il est donc nécessaire de vérifier que les aciers de reprise de cisaillement dans les âmes soient suffisants. Il faut donc cumuler leur taux de travail sous charges extérieures avec celui de la diffusion.

À noter qu'il est possible de décompter, pour le premier tiers, les aciers d'éclatement.

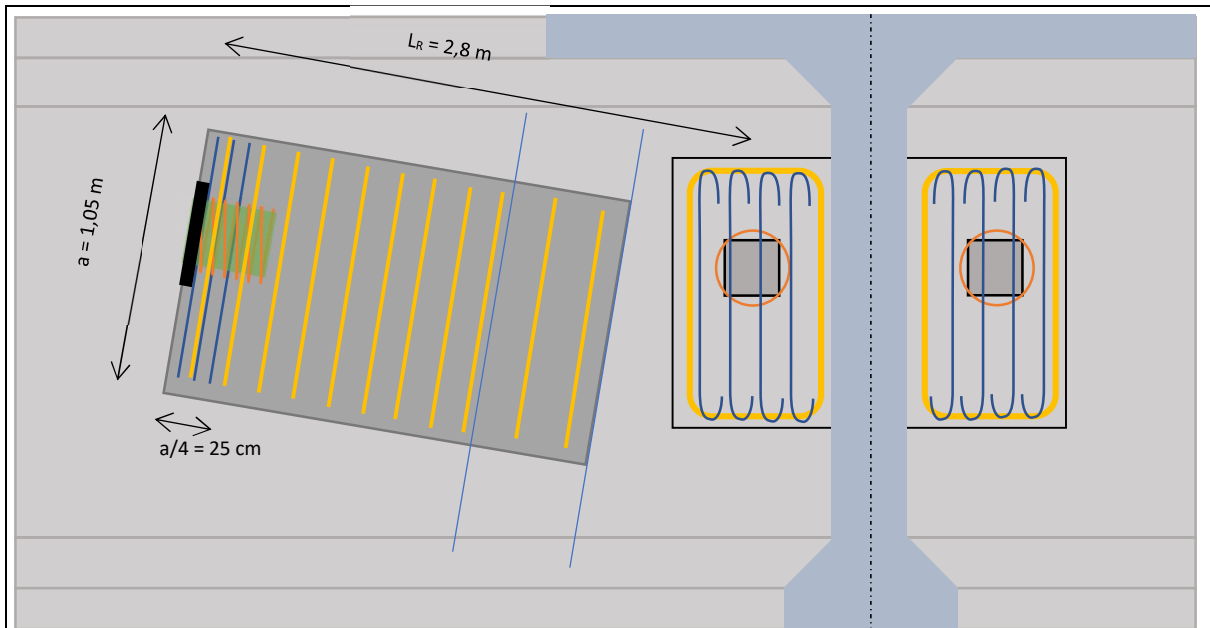
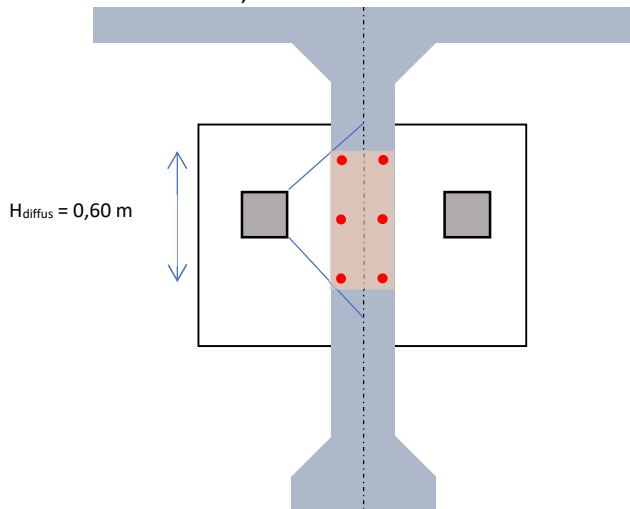


FIGURE 27 - SCHÉMA DE FERRAILLAGE PROPOSÉ

C. FERRAILLAGE D'ENTRAÎNEMENT

Les plans de ferrailage de l'époque indiquent la présence d'acier H14 Fe E 420 longitudinaux espacés de 20 cm dans l'âme, Ce qui revient à 2x3 aciers HA14 dans la zone d'entraînement, soit 9,2 cm², Pour des acier Fe E 420, la limite d'élasticité est de 420 MPa, Donc $f_{yd} = 365$ MPa,



Donc l'effort qui peut être repris par les acier existants est : $\Omega \cdot f_{yd} = 337$ kN,

$$A_l = \frac{\frac{F_d}{2} - \sigma \times \Omega}{f_{yd}} = \frac{\frac{2 \times 1,99 \text{ MN}}{2} - 0,337}{435} = 38 \text{ cm}^2$$