

# Annales Béton précontraint appliqué aux structures - ENTPE

## Épreuve 2013-2014

On considère une dalle précontrainte isostatique de largeur 10 m avec une partie en porte à faux.



Vue en élévation

Coupe transversale

*Pour les calculs, on utilise la force moyenne de la force de précontrainte et les caractéristiques des sections brutes. Toutes les contraintes sont calculées en section non fissurée.*

**Béton :** Le béton est de classe C45 ( $f_{ck} = 45 \text{ Mpa}$ ) ;

**Précontrainte :** Câbles 12 T 15s de classe 1860 TBR, ancrés aux extrémités, avec les caractéristiques suivantes :

Force utile probable pour un câble : 2,00 MN ( $P_m$ ).

$\phi_g$  (diamètre de gaine) = 80 mm

### Actions, en situation d'exploitation

La dalle est soumise aux charges réparties suivantes :

Poids propre :  $g = 25 \text{ kN/m}^3$

Superstructures :  $g_s = 0,008 \text{ MN/m}^2$  soit  $0,08 \text{ MN/m}$

Charges variables :  $q_k = 0,010 \text{ MN/m}^2$  soit  $0,10 \text{ MN/m}$

### Combinaisons d'actions ELS

Quasi permanente	$P_m + G$
Fréquente	$P_m + G + 0,6Q$
Caractéristique	$P_m + G + Q$

### Limites de contrainte :

Sous combinaison quasi-permanente :  $0 \leq \sigma \leq 0,45 f_{ck}$

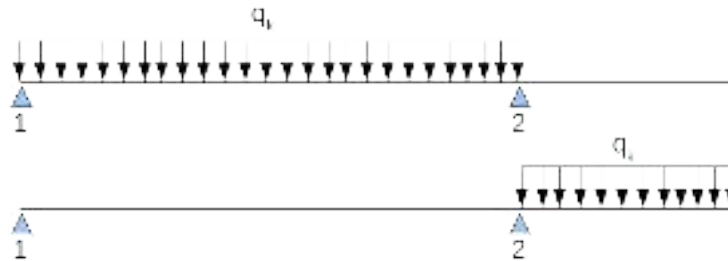
Sous combinaison fréquente (non déterminant ici):  
 $0 \leq \sigma \leq 0,6 f_{ck}$

Sous combinaison caractéristique :  $0 \leq \sigma \leq 0,6 f_{ck}$

### Question 1 (3 points)

Calculer les moments à mi-travée et sur l'appui 2 sous l'effet du poids propre, des superstructures et des charges variables, en fonction de h. Calculer les moments correspondants sous les différentes combinaisons, ELS QP et ELS caractéristique.

On considérera les deux cas de charge suivants pour déterminer  $M_{q_{max}}$  et  $M_{q_{min}}$  en travée et sur l'appui 2.



Corrigé :

A mi-travée

$$M_g \quad 11,75h \text{ MN.m}$$

$$M_{g'} \quad 3,76 \text{ MN.m}$$

$$M_{qk,min} \quad -2,5 \text{ MN.m}$$

$$M_{qk,max} \quad 7,2 \text{ MN.m}$$

Sur appui 2

$$M_g \quad -12,5h \text{ MN.m}$$

$$M_{g'} \quad -4 \text{ MN.m}$$

$$M_{qk,min} \quad -5 \text{ MN.m}$$

$$M_{qk,max} \quad 0 \text{ MN.m}$$

### Question 2 (3 points)

Déduire des conditions de coffrage la hauteur  $h$  minimum.

Dans la suite nous prendrons  $h = 0,6 \text{ m}$ .

Corrigé :

cas déterminant, ELS cara,max et ELS car,min à mi-travée,  $h_{\text{minimum}} = 0,464 \text{ m}$

### Question 3 (2 points)

Calculer les caractéristiques de la section ( $A_c$ ,  $v$ ,  $v'$ ,  $I$ ,  $\rho$ ,  $I/v$  et  $I/v'$ ).

Calculez les moments à mi-travée et sur l'appui 2 sous les différentes combinaisons de chargement ELS QP et ELS caractéristique avec la hauteur  $h$  fournie ci-dessus.

Corrigé : en prenant  $h = 0,6 \text{ m}$

$$\text{Aire :} \quad 6 \quad \text{m}^2$$

$$v : \quad 0,3 \quad \text{m}$$

$$v' : \quad 0,3 \quad \text{m}$$

$$I : \quad 0,18 \quad \text{m}^4$$

$$\rho : \quad 0,333$$

$$I/V : \quad 0,6 \text{ m}^3$$

$$I/v' : \quad 0,6 \text{ m}^3$$

Corrigé :

A mi-travée

$$M_{qp} \quad 10,81 \text{ MN.m}$$

$$M_{cara,min} \quad 8,31 \text{ MN.m}$$

$$M_{cara,max} \quad 18,01 \text{ MN.m}$$

Sur appui 2

$$M_{qp} \quad -11,5 \text{ MN.m}$$

$$M_{cara,min} \quad -16,5 \text{ MN.m}$$

$$M_{cara,max} \quad -11,5 \text{ MN.m}$$

**Question 4 (4 points)**

Déterminer la valeur minimale de la force de précontrainte pour respecter les limites de contrainte en service définies ci-dessus avec  $P = P_m$

On calculera les valeurs  $P_I$  et  $P_{II}$  à mi-travée et sur l'appui 2.

En déduire le nombre de câbles nécessaires. En déduire  $P$  et l'excentricité  $e_0$  à mi-travée et sur l'appui 2.

Corrigé :

*A mi-travée*

$$P_I = 48,5 \text{ MN}$$

$$P_2 = 64,3 \text{ MN}$$

*Sur appui 2*

$$P_I = 25,0 \text{ MN}$$

$$P_2 = 58,9 \text{ MN}$$

$$P \text{ choisi} = 66 \text{ MN}$$

$$e_0 = -0,18 \text{ m}$$

**Question 5 (2,5 points)**

Vérifier les contraintes en fibre supérieure et inférieure pour les combinaisons ELS QP, et ELS caractéristique.

Corrigé : contraintes en MPa

*Mi-travée*

	QP	Cara,min	Cara,max
<i>Sigma_sup</i>	9,22	5,05	21,22
<i>Sigma_inf</i>	12,78	16,95	0,78

*Appui 2*

	QP	Cara,min	Cara,max
<i>Sigma_sup</i>	11,63	3,30	11,63
<i>Sigma_inf</i>	12,78	18,70	10,37

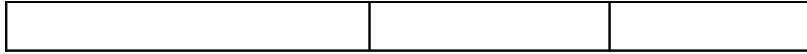
**Question 6 (2,5 points)**

Représenter les fuseaux de passage en traction.

On indiquera les valeurs de  $e_{\max}$  et  $e_{\min}$  sur les appuis, et à mi-travée.

Corrigé :

	Mi-travée	Appui
<i>e<sub>min</sub> QP</i>	-0,264 m	0,074 m
<i>e<sub>min</sub> cara,min</i>	-0,226 m	0,150 m
<i>e<sub>max</sub> cara,max</i>	-0,173 m	0,274 m



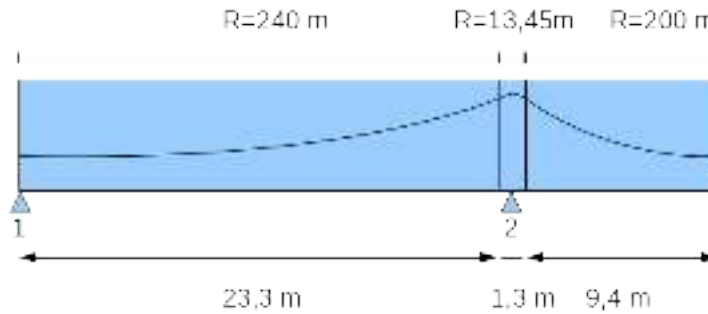
**Question 7 (indépendante des questions précédentes) (3 points)**

On considère un câble ayant le tracé suivant :

\*le câble suit un tracé parabolique sur 23,3m avec un rayon de courbure de 240m,

\*puis le câble suit un tracé parabolique sur 1,3m avec un rayon de courbure de 13,45m

\*enfin, le câble suit un tracé parabolique sur 9,4m avec un rayon de courbure de 200m.



1: Donner la répartition de contrainte le long du câbles avant et après rentrée d'ancrage.

2: Est-il intéressant de tendre des deux côtés?

3 : Calculer l'allongement du câble à la mise en tension, supposée effectuée par une seule extrémité.

*On rappelle qu'un câble est tendu à 0,8 fois sa force caractéristique, soit une contrainte de  $0,8 \times 1860 = 1488 \text{ MPa}$  au niveau du vérin de mise en tension.*

*Les pertes par frottement sont évalués grâce à la formule :*

$$\Delta P_{\mu}(x) = P_{\max}(1 - e^{-\mu(\theta + kx)})$$

où :

$\theta$  est la somme des déviations angulaires sur la distance  $x$  (quels que soient leur direction et leur signe)

$\mu$  est le coefficient de frottement =  $0,19 \text{ rad}^{-1}$

$k$  est une déviation angulaire parasite prise égale à  $0,01 \text{ rad/m}$

$x$  est la distance le long de l'armature depuis le point où la force de précontrainte est égale à  $P_{\max}$ , force à l'extrémité active pendant la mise en tension.

*On donne également les valeurs suivantes :*

$g$  : rentrée d'ancrage =  $4 \text{ mm}$

$E_p$  : module d'Young de la précontrainte,  $195 \text{ Gpa}$ .

Remarque : on pourra utiliser l'approximation au premier ordre pour simplifier les calculs !

Corrigé :

$x$	0	14,1	23,3	24,6	34
$\delta x$	0	14,1	9,2	1,3	9,4
$\delta \theta$	0	0,05875	0,03833	0,09665	0,047
$\sigma$ avant recul	1488	1433	1398	1369	1333
$\sigma$ après recul	1249	1305	1397		

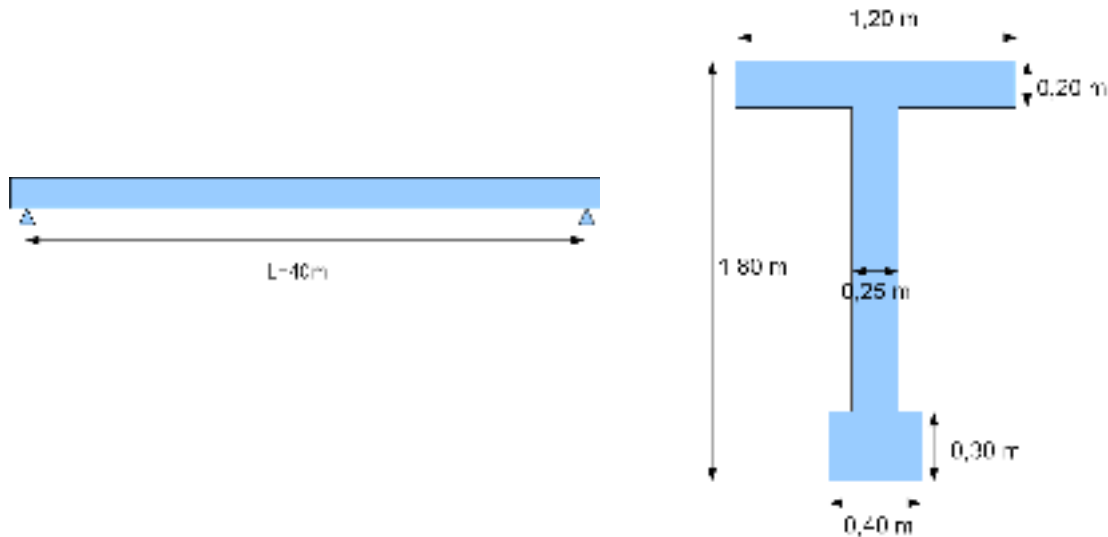
$X$  : longueur de recul d'ancrage = 24,6 m

Pas intéressant de tendre des 2 côtés

Allongement global du câble avant rentrée d'ancrage : 0,247 m

## Épreuve 2012-2013

On considère une poutre précontrainte de portée 40 m.



Vue en élévation

Coupe transversale

*Pour les calculs, on utilise la force moyenne de la force de précontrainte et les caractéristiques des sections brutes. Toutes les contraintes sont calculées en section non fissurée.*

**Béton :** Le béton est de classe C50 ( $f_{ck} = 50 \text{ Mpa}$ ) ;

**Précontrainte :** Câbles 12 T 15s de classe 1860 TBR, ancrés aux extrémités, avec les caractéristiques suivantes :

Force utile probable pour un câble : 2,00 MN ( $P_m$ ).

$\phi_g$  (diamètre de gaine) = 80 mm

### Actions, en situation d'exploitation

La dalle est soumise aux charges réparties suivantes :

Poids propre :  $g = 25 \text{ kN/m}^3$

Superstructures :  $g_s = 0,015 \text{ MN/m}$

Charges variables :  $q_k = 0,02 \text{ MN/m}$

### Combinaisons d'actions ELS

Quasi permanente	$P_m + G$
Fréquente	$P_m + G + 0,6Q$
Caractéristique	$P_m + G + Q$

### Limites de contrainte :

Sous combinaison quasi-permanente :  $0 \leq \sigma \leq 0,45 f_{ck}$

Sous combinaison fréquente :  $0 \leq \sigma \leq 0,6 f_{ck}$

Sous combinaison caractéristique :  $0 \leq \sigma \leq 0,6 f_{ck}$

**Question 1**

Calculer les caractéristiques de la section ( $A_c$ ,  $v$ ,  $v'$ ,  $I$ ,  $\rho$ ,  $I/v$  et  $I/v'$ ).

Corrigé :

$$Aire : 0,685 \text{ m}^2$$

$$v : 0,727 \text{ m}$$

$$v' : 1,073 \text{ m}$$

$$I : 0,249 \text{ m}^4$$

$$\rho : 0,466$$

$$I/V : 0,342 \text{ m}^3$$

$$I/v' : 0,232 \text{ m}^3$$

**Question 2**

Calculer les moments à mi-travée sous l'effet du poids propre, des superstructures et des charges variables.

En déduire les moments en QP, fréquent et caractéristique.

Corrigé :

$$M_g \quad 3,425 \text{ MN.m}$$

$$M_{g'} \quad 3 \text{ MN.m}$$

$$M_{qk} \quad 4 \text{ MN.m}$$

$$M_{QP} \quad 6,425 \text{ MN.m}$$

$$M_{freq} \quad 8,825 \text{ MN.m}$$

$$M_{cara} \quad 10,425 \text{ MN.m}$$

**Question 3**

Vérifier les conditions de coffrage à mi-travée.

Corrigé :

combinaisons cara-qp en fibre sup :

$$\Delta M^*v/I = 11,69 \text{ MPa} \quad \text{pour } 30 \text{ MPa autorisé}$$

combinaisons cara-qp en fibre inf :

$$\Delta M^*v'/I = 17,23 \text{ MPa} \quad \text{pour } 22,5 \text{ MPa autorisé}$$

combinaisons freq-qp en fibre inf : (non déterminantes)

$$\Delta M^*v'/I = 10,34 \text{ MPa} \quad \text{pour } 22,5 \text{ MPa autorisé}$$

**Question 4**

Déterminer la valeur minimale de la force de précontrainte pour respecter les limites de contrainte en service définies ci-dessus avec  $P = P_m$

On calculera les valeurs  $P_I$  et  $P_{II}$ .

On prendra garde au fait que les gaines doivent être séparées par une distance d'au moins une gaine horizontalement et que verticalement, on peut regrouper les gaines par paquet de 2 gaines (distance d'au moins une gaine entre deux paquets).

En déduire le nombre de câbles nécessaires. En déduire P et l'excentricité à mi-travée  $e_0$ .

*Corrigé :*

$d' = 0,16 \text{ m}$  (on prend 2 lits de gaines de précontrainte)

Combinaisons QP-freq : (non déterminantes)

$$M_{min}^* = 6,425 \quad MN.m$$

$$M_{max}^* = 8,825 \quad MN.m$$

$$P1 = 2,86MN$$

$$P2 = 7,79 MN$$

Combinaisons QP-cara :

$$M_{min}^* = 6,425 \quad MN.m$$

$$M_{max}^* = 10,425 \quad MN.m$$

$$P1 = 4,77 MN$$

$$P2 = 9,21 MN$$

→ conclusion, on doit prendre  $P > 9,21MN$ . On choisit de mettre 5 câbles 12T15, placés le plus bas possible. Deux câbles sont placés côte à côte dans le talon, puis un groupe de 2 câbles (placé à la verticale l'un de l'autre) dans l'âme et encore un câble au-dessus. Ainsi, les 2 premiers câbles sont  $1,5 \phi_g$  du bord inférieur, le 3ème câble est à  $3,5 \phi_g$ , le 4ème câble est à  $4,5 \phi_g$  et le 5ème câble à  $6,5 \phi_g$ . Le câble moyen est donc à  $3,5 \phi_g$  du bord inférieur.

### **Question 5**

Vérifier les contraintes en fibre supérieure et inférieure pour les combinaisons ELS QP, fréquent et caractéristique.

*Corrigé : contraintes en MPa*

	QP	Fréq	caractéristique
$\sigma_{sup}$	10,21	17,22	21,9
$\sigma_{inf}$	21,07	10,73	3,83

### **Question 6**

Représenter les fuseaux de passage en traction.

On indiquera les valeurs de  $e_{max}$  et  $e_{min}$  sur appui, et à mi-travée.

*Corrigé :*



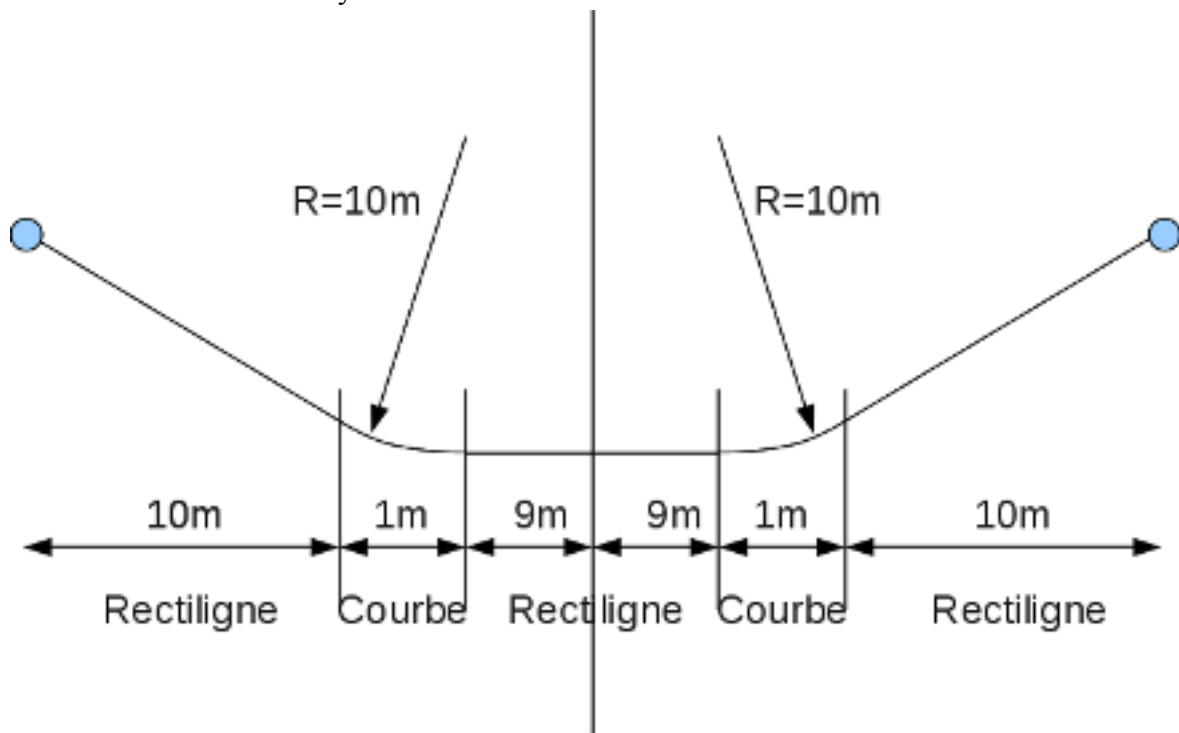
	<i>appui</i>	<i>Mi-travée</i>
<i>emin</i>	-0,500	-1,142
<i>emax freq</i>	0,339	-0,544
<i>emax cara</i>	0,339	-0,704

**Question 7**

Tracer avec soin et à l'échelle les sections à mi-travée et sur appui en indiquant la position des gaines de précontrainte ainsi que le principe de ferrailage.

**Question 8 (indépendante des questions précédentes)**

On considère un câble ayant le tracé suivant :



Le câble suit un tracé rectiligne sur 5m, puis une parabole de rayon 10m sur 1m, puis un tracé rectiligne jusqu'à la mi-travée.

- 1: Donner la répartition de contrainte le long du câbles avant et après rentrée d'ancrage.
- 2: Est-il intéressant de tendre des deux côtés?
- 3 : Calculer l'allongement du câble à la mise en tension, supposée effectuée par une seule extrémité.

*On rappelle qu'un câble est tendu à 0,8 fois sa force caractéristique, soit une contrainte de  $0,8 \times 1860 = 1488 \text{ MPa}$  au niveau du vérin de mise en tension.*

*Les pertes par frottement sont évalués grâce à la formule :*

$$\Delta P_{\mu}(x) = P_{max}(1 - e^{-\mu(\theta + kx)})$$

où :

$\theta$  est la somme des déviations angulaires sur la distance  $x$  (quels que soient leur direction et leur signe)

$\mu$  est le coefficient de frottement =  $0,19 \text{ rad}^{-1}$

$k$  est une déviation angulaire parasite prise égale à  $0,01 \text{ rad/m}$

$x$  est la distance le long de l'armature depuis le point où la force de précontrainte est égale à  $P_{\max}$ , force à l'extrémité active pendant la mise en tension.

On donne également les valeurs suivantes :

$g$  : rentrée d'ancrage =  $4 \text{ mm}$

$E_p$  : module d'Young de la précontrainte,  $195 \text{ Gpa}$ .

Remarque : on pourra utiliser l'approximation au premier ordre pour simplifier les calculs !

Corrigé :

$x$	0	10	10,795	11	20	29	30	40
$\Delta x$	0	10	0,795	0,205	9	9	1	10
$\Delta \theta$	0	0	0,0795	0,0205	0	0	0,1	0
$\sigma$ avant recul	1488	1460	1436	1430	1406	1382	1353	1328
$\sigma$ après recul	1372	1400	1436					

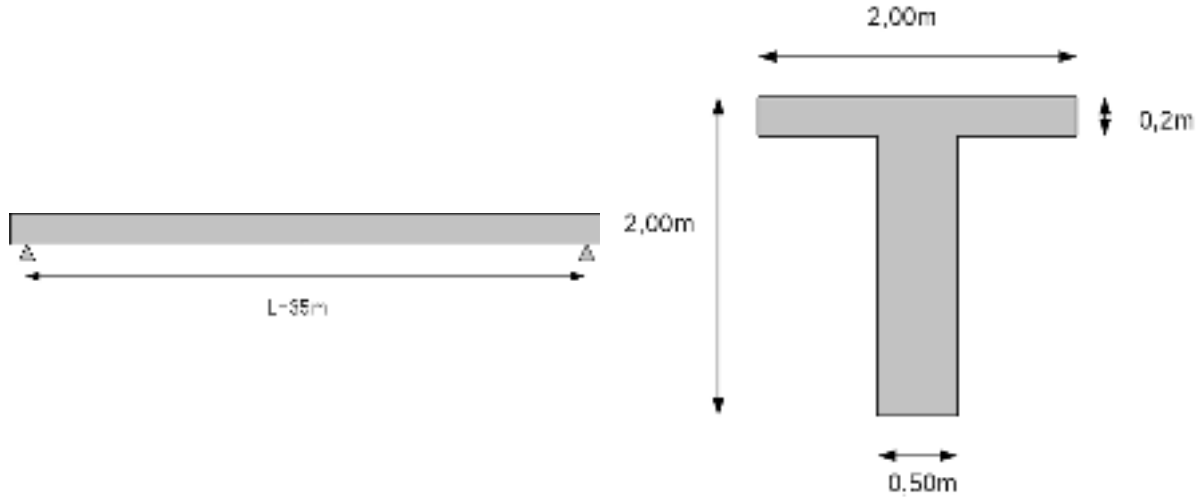
$X$  : longueur de recul d'ancrage =  $10,795 \text{ m} \approx 10,80 \text{ m}$

Intéressant de tendre des 2 côtés

Allongement global du câble avant rentrée d'ancrage :  $0,288 \text{ m}$

## Epreuve 2011-2012

On considère une poutre précontrainte de portée 35 m.



Vue en élévation

Coupe transversale

Pour les calculs, on utilise la force moyenne de la force de précontrainte et les caractéristiques des sections brutes. Toutes les contraintes sont calculées en section non fissurée.

**Précontrainte** : Câbles 12 T 15s de classe 1860 TBR, ancrés aux extrémités, avec les caractéristiques suivantes :

Force utile probable pour un câble : 2,00 MN ( $P_m$ ).

$\phi_g$  (diamètre de gaine) = 80 mm

### Actions, en situation d'exploitation

la dalle est soumise aux charges réparties suivantes :

Poids propre :  $g = 25 \text{ kN/m}^3$

Superstructures :  $g_s = 0,02 \text{ MN/m}$

Charges variables :  $q_k = 0,05 \text{ MN/m}$

### Combinaisons d'actions ELS

Quasi permanente	$P_m + G$
Fréquente	$P_m + G + 0,6Q$
Caractéristique	$P_m + G + Q$

### Limites de contrainte :

Sous combinaison quasi-permanente :	$0 \leq \sigma \leq 0,45 f_{ck}$
Sous combinaison fréquente :	$0 \leq \sigma \leq 0,6 f_{ck}$
Sous combinaison caractéristique :	$-f_{ctm} \leq \sigma \leq 0,6 f_{ck}$

### Question 1

Calculer les caractéristiques de la section ( $A_c$ ,  $v$ ,  $v'$ ,  $I$ ,  $\rho$ ,  $I/v$  et  $I/v'$ ).

Corrigé :

B	1,3	m <sup>2</sup>
v	0,792	m
v'	1,208	m
I	0,521	m <sup>4</sup>
rho	0,4190	
I/v	0,658	m <sup>3</sup>
I/v'	0,432	m <sup>3</sup>

### **Question 2**

Calculer les moments à mi-travée sous l'effet du poids propre, des superstructures et des charges variables.

En déduire les moments en QP, fréquent et caractéristique.

Corrigé :

$$Mg = 4,98 \text{ MN.m}$$

$$Mg' = 3,06 \text{ MN.m}$$

$$Mqk = 7,66 \text{ MN.m}$$

$$MQP = 8,04 \text{ MN.m}$$

$$M_{\text{freq,min}} = 8,04 \text{ MN.m}$$

$$M_{\text{freq,max}} = 12,63 \text{ MN.m}$$

$$M_{\text{freq,min}} = 8,04 \text{ MN.m}$$

$$M_{\text{cara,max}} = 15,70 \text{ MN.m}$$

### **Question 3**

Quelle doit être la classe minimale de résistance du béton pour vérifier les conditions de coffrage à mi-travée.

Le tableau ci-dessous donne les résistances caractéristiques en compression  $f_{ck}$  et les résistances moyennes en traction  $f_{ctm}$  associée. Ces contraintes sont données en MPa.

$f_{ck}$	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	MPa
$f_{ctm}$	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5	MPa

Corrigé :

*cara qp en fibre sup*

$$\Delta M^*_{v/I} = 11,64 \text{ MPa}, \quad \text{pour une limite à } 0,6 f_{ck}$$

*cara qp en fibre inf*

$$\Delta M^*_{v/I} = 17,74 \text{ MPa} \quad \text{pour une limite à } 0,45 f_{ck} + f_{ctm}$$

*freq qp fibre inf*

$$\Delta M^*_{v/I} = 10,64 \text{ MPa} \quad \text{pour une limite à } 0,45 f_{ck}$$

*il faut au moins du C35 !*

**Dans la suite, on prendra un béton de classe C45.**

#### **Question 4**

Déterminer la valeur minimale de la force de précontrainte pour respecter les limites de contrainte en service définies ci-dessus avec  $P = P_m$

On calculera les valeurs  $P_I$  et  $P_{II}$  et on étudiera les deux conditions en fréquent et en caractéristique.

On prendra garde au fait que les gaines doivent être séparées par une distance d'au moins une gaine horizontalement et que verticalement, on peut regrouper les gaines par paquet de 2 gaines (distance d'au moins une gaine entre deux paquets).

En déduire le nombre de câbles nécessaires. En déduire  $P$  et l'excentricité à mi-travée  $e_0$ .

*Corrigé :*

*on dispose 3 lits de 2 câbles. Premier lit à 1,5 phi, deuxième lit à 2,5 phi, et troisième lit à 4,5 phi, soit une distance moyenne à la fibre inf de 2,83 phi c'est à dire :  $d' = 0,226 \text{ m}$ .*

*Combinaisons QP-freq :*

$$M_{min}^* = 8,04 \text{ MN.m}$$

$$M_{max}^* = 12,63 \text{ MN.m}$$

$$P_I = 5,48 \text{ MN}$$

$$P_{II} = 9,62 \text{ MN}$$

*Combinaisons QP-cara :*

$$M_{min}^* = 8,04 \text{ MN.m}$$

$$M_{max}^* = 14,06 \text{ MN.m}$$

$$P_I = 7,18 \text{ MN}$$

$$P_{II} = 10,70 \text{ MN}$$

*On choisit de placer 6 câbles le plus près possible de la fibre inférieure soit :*

$$P = 12 \text{ MN} \text{ et } e_0 = -0,981 \text{ m}$$

#### **Question 5**

Vérifier les contraintes en fibre supérieure et inférieure pour les combinaisons ELS QP, fréquent et caractéristique.

Corrigé : (résultats en MPa)

	QP	Fréq	Cara
$\sigma_{sup}$	3,55	10,53	15,19
$\sigma_{inf}$	17,89	7,24	0,15

### Question 6

Représenter les fuseaux de passage en traction.

On indiquera les valeurs de  $e_{max}$  et  $e_{min}$  sur appui, et à mi-travée.

Corrigé :

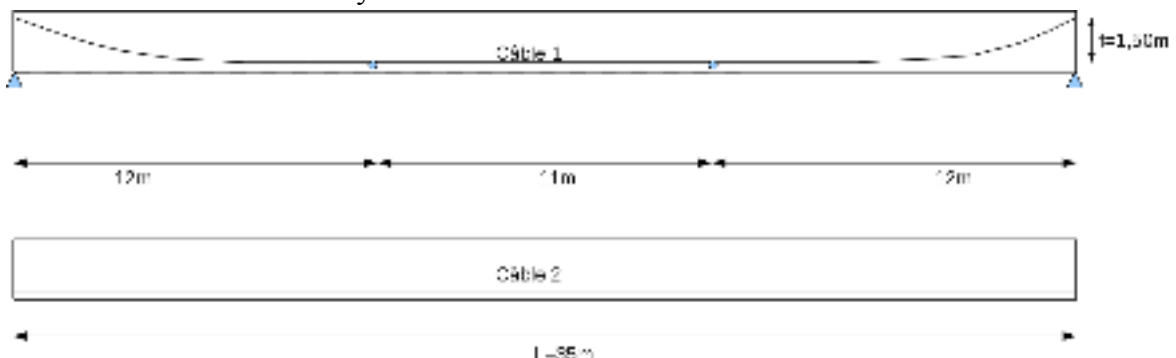
	appui	mi-travée
$e_{min} (m)$	-0,506	-1,176
$e_{max, freq} (m)$	0,332	-0,721
$e_{max, cara} (m)$	0,469	-0,839

### Question 7

Tracer avec soin et à l'échelle la section à mi-travée en indiquant la position des gaines de précontrainte ainsi que le principe de ferrailage.

### Question 8 (indépendante des questions précédentes)

On considère deux câbles ayant le tracé suivant :



Les câbles suivent un tracé parabolique et rectiligne. On tend d'un seul côté.

\* Le coefficient de transmission est de 0,875 pour le premier câble et de 0,957 pour le deuxième câble. En déduire les coefficients  $\mu$  et  $k$ .

(le coefficient de transmission est le rapport entre la force au niveau de l'ancrage passif et la force exercée par le vérin côté ancrage actif).

\* Calculer l'allongement des câbles à la mise en tension.

\* calculer et donner la courbe de contrainte après rentrée d'ancrage ( $g = 4 \text{ mm}$ , voir ci-dessous), pour les deux câbles.

On rappelle qu'un câble est tendu à 0,8 fois sa force caractéristique, soit une contrainte de  $0,8 \times 1860 = 1488 \text{ MPa}$  au niveau du vérin de mise en tension.

Les pertes par frottement sont évalués grâce à la formule :

$$P(x) = P_{max} e^{-\mu(\theta+kx)}$$

où :

$\theta$  est la somme des déviations angulaires sur la distance  $x$  (quels que soient leur direction et leur signe)

$\mu$  est le coefficient de frottement

$k$  est le coefficient de déviation angulaire parasit

$x$  est la distance le long de l'armature depuis le point où la force de précontrainte est égale à  $P_{max}$ , force à l'extrémité active pendant la mise en tension.

On donne également les valeurs suivantes :

$g$  : rentrée d'ancrage = 4 mm

$E_p$  : module d'Young de la précontrainte, 195 Gpa.

Corrigé :

$$\mu = 0,18$$

$$k = 0,007$$

Pour câble courbe :

$R$  : rayon de courbure = 48 m pour le câble courbe

$X$  : longueur de recul d'ancrage = 10,85 m

X (m)	0	10,35	12	23	35
delta x (m)		10,35	1,65	11	12
delta théta (rad)	0	0,215625	0,034375	0	0,25
sigma avant recul (MPa)	1488,00	1412,81	1401,18	1381,89	1301,26
sigma après recul (MPa)	1341,42	1412,81			

Allongement : 0,250 m

Pour câble rectiligne

$X$  : longueur de recul d'ancrage = 20,53 m

X (m)	0	20,53	35
delta x (m)		20,53	14,47
delta théta (rad)	0	0	0
sigma avant	1488,00	1450,00	1423,81

recul (MPa)			
sigma après recul (MPa)	1412,97	1450,00	

*Allongement : 0,261 m*