

IX.3. Principe de justification

Les calculs justificatifs sont établis suivant la méthode des états limites. Un état limite est un état pour lequel une condition pour une structure est strictement satisfaite et cesserait de l'être en cas de modification défavorable d'une action.

IX.3.1. Les Etats Limites Ultimes (ELU) :

Ce sont des états limites qui mettent en jeu la sécurité des biens et des personnes. Cela correspond à l'attente maximale ; à la capacité portante de l'ouvrage ou de l'un de ses éléments avant dépassement par :

- La perte d'équilibre statique ;
- La rupture de section par déformation excessive ;
- Instabilité de forme ou flambement ;
- La transformation de La structure en mécanisme.

Les critères de calculs pour les ELU sont :

- Déformation limite ;
- Calcul à la rupture.

IX.3.2. Les Etats Limites de Service (ELS)

Ce sont des états limites qui considèrent les conditions normales d'exploitation et de durabilité, en particulier les fissures et les déformations. Ils correspondent aux phénomènes suivants :

- Ouverture excessive des fissures à la déformation des éléments porteurs ;
- Compression excessive du béton ;
- Vibration excessive ;
- perte d'étanchéité.

Les critères de calculs pour les ELS sont :

- la contrainte limite
- le calcul de type élastique

IX.4. Caractéristiques physico-mécaniques des matériaux

IX.4.1. Béton

- Charges permanentes du béton : 25 kN/ m^3
- Grosseur maximal des granulats : 2,5 cm.

→ Cas de fissuration: Préjudiciable

→ Enrobage : 4 cm

Sable : Nous utilisons des sables bien propres provenant de concassage ou de sable de la rivière mais leurs caractéristiques sont préconisées pour garantir la résistance du béton.

L'eau de gâchage : L'eau de gâchage du béton doit être propre, potable si possible. Le dosage en eau est en général compris entre 140 à 240 litres pour une mètre cube de béton.

Adjuvants : Les adjuvants entrant dans la composition du béton doivent être conformes à la norme NF P 18-103. Les adjuvants à utiliser selon les cas sont répertoriées dans le tableau suivant :

Désignation	Propriétés	Dosage
Le produit de démoulage à haute performance	- Destiné au démoulage des bétons vibrés ;	Un litre permet de couvrir environ 20m ² de surface
	- a un rôle d'antirouille sur coffrage métallique ;	
	- Permet également d'empêcher ou de réduire l'adhérence du béton dans les équipements de fabrication et de transport et en facilite le nettoyage.	
Plastifiant, réducteur d'eau	- Améliore la plasticité et la résistance du béton ;	0,3 à 1,2% du poids de ciment
	- facilite la mise en œuvre du béton et les opérations de la finition.	
Hydrofuge de masse	Confère aux bétons une forte résistance, aux remontées d'eau par absorption capillaire et réduit les pénétrations d'eau sous pression.	1,5% du poids de ciment
Retardateur	Ralentit les réactions d'hydratation en colmatant momentanément la surface des grains de ciment.	0,2 à 1 Kg pour 100 Kg de ciment

Tableau 66. Quelques principaux adjuvants

Béton armé :

→ Dosage : 350 kg de CEM I de classe 42,5 par m³ de béton ;

→ Résistance caractéristique à priori du béton : $f_{c28} = 25\text{MPa}$

→ Résistance à la compression du béton à j jours :

$$f_{cj} = \frac{j}{4,76+0,83j} f_{c28} \text{ pour } f_{c28} \leq 40\text{MPa} \text{ et } f_{cj} = \frac{j}{1,40+0,95j} f_{c28} \text{ pour } f_{c28} > 40\text{MPa}$$

→ Résistance caractéristique à la traction : $f_{tj} = 0,6 + 0,06f_{cj}$

→ Module de déformation longitudinal instantané du béton : $E_{ij} = 11000 \sqrt[3]{f_{cj}}$

→ Module de déformation longitudinale à long terme : $E_{vj} = E_{ij}/3$

→ La résistance limite à la compression relative à l'ELS :

En phase de construction : $\bar{\sigma}_{bc} = 0,5 \cdot f_{c28}$

En phase de service : $\bar{\sigma}_{bc} = 0,6 \cdot f_{c28}$

→ Résistance limite à la compression relative à l'ELU : $f_{bu} = 0,85 \frac{f_{c28}}{\theta \cdot \gamma_b}$

Où le coefficient : $\theta=1$ si la durée d'application des charges est supérieures à 24h ;

$\theta=0,9$ si la durée d'application des charges varie entre 1h et 24h ;

$\theta=0,85$ si la durée d'application des charges est inférieur à 1 h

$\gamma_b=1,15$ pour les combinaisons accidentelles.

$\gamma_b=1,5$ pour les combinaisons fondamentales

→ Coefficient de poisson :

$\nu=0,2$ pour le béton non fissuré ;

$\nu=0$ en cas de fissuration.

→ A ELU, le raccourcissement relatif du béton est limité à 2% en compression simple et à 3,5% en flexion

Béton précontraint :

→ Dosage : 400kg de CEM I de classe 42,5 par m^3 de béton ;

→ Résistance caractéristique à priori du béton : $f_{c28} = 40\text{MPa}$

Les autres caractéristiques sont les mêmes qu'en béton armée.

IX.4.2. Aciers d'armatures :

Armatures passives du BP et armatures de BA :

→ Type : barre à haute adhérence de classe FeE500 ;

→ Limite d'élasticité : $f_e=500\text{Mpa}$

→ Module de déformation longitudinale $E_s= 210000\text{Mpa}$

→ Contrainte de calcul à l'ELU :

$$\sigma_s = f_{ed} = \frac{f_e}{\gamma_s} \text{ si } \varepsilon_s \geq \varepsilon_{sl} \text{ et } \sigma_s = E_s \cdot \varepsilon_s \text{ si } \varepsilon_s < \varepsilon_{sl}$$

Avec : $\gamma_s = 1,15$: Coefficient de sécurité.

$\xi_s \leq 10\%$: Allongement relatif de l'acier tendu

ξ_{sl} : déformation limite de l'acier.

→ Contrainte à l'ELS : $\bar{\sigma}_{st} = \min \left\{ \frac{2}{3} f_e; \max(0,5f_e; 110\sqrt{\eta \cdot f_{t28}}) \right\}$

Avec : $\eta = 1,6$: Coefficient de fissuration

Aciers de précontrainte

Pour le cas de la post tension, nous pouvons opter pour des torons 12T13 à Très Basse relaxation (TBR) enfilés dans des gaines souples dont les caractéristiques sont les suivantes :

- Principe de précontrainte : Freyssinet ;
- Câbles : 12T13 ;
- Section d'une armature : 1130 mm² ;
- Diamètre d'une gaine : 71 mm ;
- L'aire d'encombrement de la gaine : 3959 mm² ;

Les caractéristiques mécaniques sont :

- La contrainte nominale de rupture garantie : $f_{prg} = 1810$ Mpa
- La contrainte nominale à la limite d'élasticité : $f_{peg} = 1590$ MPa
- Le module d'élasticité des armatures de précontrainte : $E_p = 190000$ MPa
- La contrainte de vérinage initiale : c'est la valeur maximale de la tension à l'origine en post tension : $\sigma_{sp0} = \min\{0,8 \cdot f_{prg}; 0,9 \cdot f_{peg}\}$

IX.5. Actions:

On appelle actions les forces et les couples dues aux charges appliquées et aux déformations imposées à une construction c'est-à-dire toute cause produisant un état de contrainte dans la construction. On distingue trois sortes d'actions :

IX.5.1. Actions permanentes G

Elles comprennent notamment :

- Le poids propre de la structure ;
- Le poids des équipements fixes ;
- Les poids, les poussées et les pressions dues à des terres ou des liquides lorsque les niveaux de ces derniers varient peu ;
- Les déformations imposées à La construction (retrait, tassement différentiel des appuis)
- La force de précontrainte.

IX.5.2. Actions Variables Qi

Ces actions sont celles dont l'intensité varie fréquemment et de façon importante dans le temps.

Elles comprennent en particulier :

- Les surcharges d'exploitation ;
- Les surcharges climatiques ;
- Les charges appliquées en cours d'exécution des travaux et qui proviennent en général des équipements et engins de chantiers.
- Les effets dus à la température.

Pour la conception des ponts à Madagascar, seules les charges d'exploitation correspondant à l'utilisation prévue de l'ouvrage et le vent seront prises en compte.

Les surcharges d'exploitation :Q

Les systèmes de surcharge A et B sont deux grandes catégories de surcharges de chaussée distinctes et indépendantes et à envisager successivement. On considère seulement le système B dans la justification de la stabilité des éléments des tabliers et, pour celle des autres éléments de l'ouvrage, on va prendre en compte les deux systèmes de surcharges, et puis, on retiendra celui dont les effets sont les plus défavorables.

Surcharges A

Ce système se compose des charges uniformément réparties d'intensité variable suivant la longueur surchargée et qui correspondent à une ou plusieurs files de véhicules à l'arrêt sur le pont.

Elles représentent un embouteillage ou un stationnement (pont urbain équipé de feux aux extrémités ou embouteillage d'ordre quelconque), ou bien tout simplement une circulation

continue à une vitesse à peu près uniforme d'un flot de véhicules composé de voitures légères et de poids lourds.

Ainsi, la chaussée des ponts de portées unitaires inférieures à 200 m est soumise à une surcharge uniformément répartie dont l'intensité est égale a : $A_2 = a_1 \cdot a_2 \cdot A(l)$ tel que

→ a_1 : Coefficient de dégression transversale donné suivant la classe du pont par:

Nombre de voies chargées		1	2	3	4	>5
Classe du pont	Première	1	1	0,9	0,75	0,7
	Deuxième	1	0,9	»	»	»
	Troisième	0,9	0,8	»	»	»

Source: Fascicule 61-Titre II du CPC Français
Tableau 67. Coefficient de dégression transversale

→ a_2 : Coefficient défini par : $a_2 = \frac{v_0}{v}$ dans laquelle

v_0 : 3,5m pour les ponts de classe I

3m pour les ponts de classe II

2,75m pour les ponts de classe III

$v = 3,5m$: La largeur d'une voie

→ $A(l) = 230 + \frac{36000}{l+12}$ en $[\frac{kg}{m^2}]$ tel que l est la longueur surchargée [m]

Les ponts routes sont divisés en trois classes en fonction de leur largeur roulable :

Classe	Largeur roulable en [m]
I	$\geq 7,00$
II	$5,50 < L_R < 7,00$
III	$\leq 5,50$

Source: Fascicule 61-Titre II du CPC Français
Tableau 68. Classes des ponts routes

Dans notre cas, la largeur roulable est $l_r = 7$ m

Donc le pont est de classe I, d'où: $A_2 = A(l)$

Ce système de surcharge n'est plus à être affecté du coefficient de majoration dynamique ou CMD car il a déjà été tenu compte de ce coefficient dans l'établissement de sa formule.

Systeme de surcharge B

Les surcharges B sont des surcharges roulantes dynamiques et ponctuelles.

Les charges routières sont conformes au Fascicule 61 titre II.

Il y a lieu d'examiner indépendamment les effets pour chaque élément des ponts:

- Le système Bc: se composant de camion type
- Le système Bt : se composant d'un tandem
- Le système Br: se composant d'une roue

☞ Le système B_c: se composant de camion type

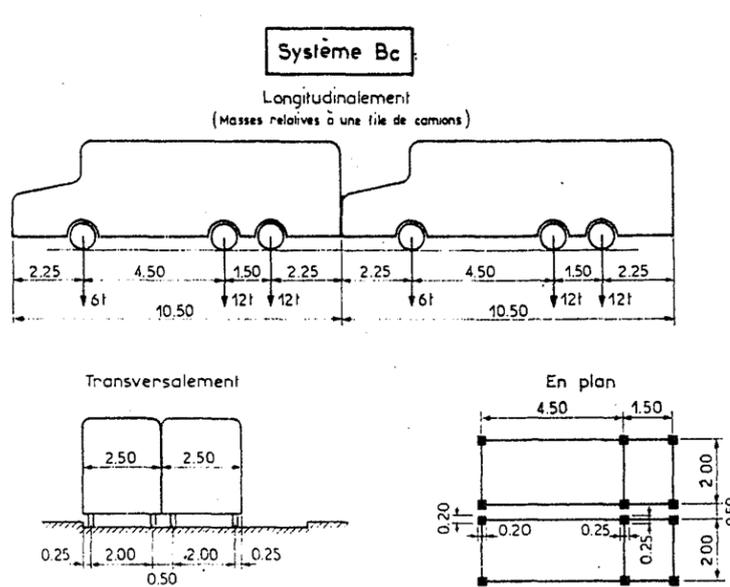


Figure 13. Systeme Bc₃₀

Un camion type du système Bc comporte trois essieux, tous trois à roues simples munies de pneumatiques, et répond aux caractéristiques suivantes :

- Masse totale 30 t ;
- Masse portée par chacun des essieux arrière 12 T ;
- Masse portée par l'essieu avant 6 T ;
- Longueur d'encombrement 10,50 m ;
- Largeur d'encombrement 2,50 m ;
- Distance des essieux arrière 1,50 m ;
- Distance de l'essieu avant au premier essieu arrière 4,50 m ;
- Distance d'axe en axe des deux roues d'un essieu 2 m ;

- Surface d'impact d'une roue arrière : carré de 0,25 m de côté ;
- Surface d'impact d'une roue avant : carré de 0,20 m de côté.

Pour le calcul des poutres maîtresses, l'axe de la file de roues la plus excentrée doit rester à une distance minimale du bord de la largeur roulable, égale à 0,75 m s'il s'agit d'un dispositif de sécurité, et égale à 0,25 m s'il s'agit d'une bordure.

Pour le calcul des éléments du tablier, les camions B_c peuvent circuler sur toute la largeur roulable, l'axe de la file de roues la plus excentrée devant rester à 0,25 m au moins du bord de la largeur roulable.

On dispose sur la chaussée au plus autant de files ou convois de camions que la chaussée comporte de voies de circulation et l'on placera toujours ces files dans la situation la plus défavorable pour l'élément considéré.

Suivant la classe du pont et le nombre de files de camions considérées, les valeurs des charges du système B_c à prendre en compte sont multipliées par un coefficient b_c dont les valeurs sont indiquées dans le tableau suivant :

Nombre de files de camions		1	2	3	4	>5
Classe du pont	Première	1,2	1,1	0,95	0,8	0,7
	Deuxième	1	1	»	»	»
	Troisième	1	0,8	»	»	»

Source: Fascicule 61-Titre II du CPC Français Page 31

Tableau 69. Coefficient b_c

☞ Le système B_t se composant d'un tandem

Le système B_e est supprimé et remplacé par le système B_t qui comporte deux essieux lourds rapprochés ; toutefois ce système n'est pas pris en considération pour les ponts de troisième classe.

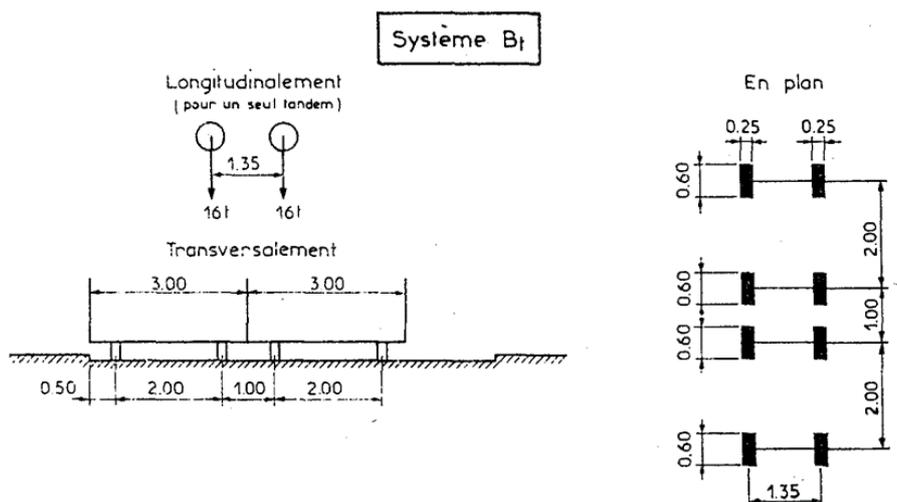


Figure 14. Système Bt

Un tandem du système Bt comporte deux essieux tous deux à roues simples munies de pneumatiques et répondant aux caractéristiques suivantes :

- Masse portée par chaque essieu 16 t.
- Distance des deux essieux 1,35 m.
- Distance d'axe en axe des deux roues d'un essieu 2 m.

Il en résulte que pour le calcul des poutres maîtresses, l'axe de la file de roues la plus excentrée doit rester à une distance minimale du bord de la largeur roulable, égale à 1,00 m s'il s'agit d'un dispositif de retenue, et 0,50 m s'il s'agit d'une bordure. Dans le sens longitudinal, un seul tandem est disposé par file.

Pour le calcul des éléments du tablier les tandems peuvent circuler sur toute la largeur roulable, l'axe de la file de roues la plus excentrée devant rester à 0,50 m au moins du bord de la largeur roulable.

Suivant la classe du pont, les valeurs des charges du système Bt à prendre en compte sont multipliées par un coefficient b_t dont les valeurs sont indiquées dans le tableau suivant :

Classe du pont	Première	Deuxième	Troisième
Coefficient b_t	1	0,9	»

Source: Fascicule 61-Titre II du CPC Français Page 31

Tableau 70. Coefficient b_t

☞ Le système B_r se composant d'une roue

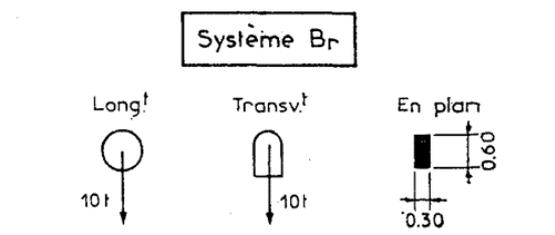


Figure 15. Système Br

Les caractéristiques du système B_r sont:

- Une masse portée par la roue : 10 T ;
- Une surface d'impact de la roue : carrée de 0,30 m de côté.

La surface d'impact de la roue B_r disposé normalement à l'axe longitudinal de la chaussée, peut être placée n'importe où sur la largeur roulable.

Les charges du système B sont frappées de majorations dynamiques.

☞ Coefficient de majoration dynamique :

$$C \text{ est défini par : } \delta = 1 + \alpha + \beta = 1 + \frac{0,4}{1+0,2.L} + \frac{0,6}{1+\frac{4P}{S}}$$

Dans cette expression, L représente la longueur de l'élément exprimée en mètres, G sa charge permanente, et S sa charge B maximale.

La valeur de S à introduire dans la formule est celle obtenue après multiplication par le coefficient b_c ou b_t fonction de la classe du pont.

Surcharge de trottoirs

Les surcharges de trottoir n'ont pas être affectées d'un coefficient de majoration dynamique. Les trottoirs et les pistes cyclables supportent deux sortes de surcharge selon la nature et le rôle de l'élément structural que l'on considère.

☞ La surcharge locale:

Une charge uniforme de 450 kg/m² est supportée par les trottoirs de tous les ouvrages, y compris les bandes éventuelles de séparation des chaussées et des pistes cyclables. Elle est prise en compte pour le calcul de tous les éléments des couvertures et des tabliers, dalles, longerons, pièces de pont, suspentes, entretoises, mais non pour celui des fermes principales.

Une roue isolée de 3T (sur les trottoirs en bordure des chaussées seulement) avec surface d'impact carrée de 0,20 m de côté et qui sera disposée dans la position la plus défavorable. Les effets de cette roue ne se cumuleront pas avec ceux des autres surcharges de chaussée ou de trottoir.

☞ La surcharge générale:

Pour la justification des fermes maîtresses (poutre principale) qui supportent à la fois une chaussée et un ou deux trottoirs, il y a lieu d'appliquer sur les trottoirs une charge uniforme de 150 kg/m² de façon à produire l'effet maximal envisagé.

Dans le sens de la largeur, chaque trottoir est chargé dans sa totalité, mais les deux trottoirs peuvent n'être pas chargés simultanément. Dans le sens de la longueur, les zones chargées sont choisies de la manière la plus défavorable.

IX.5.3. Actions accidentelles F_A

Elles proviennent des phénomènes se produisant rarement et avec une faible durée d'application. A titre d'exemple, on peut citer les chocs des bateaux sur les piliers implantés dans les cours d'eau d'une voie navigable, les chocs des véhicules routiers sur une pile d'un pont franchissant une voie de circulations, les séismes.

Les actions accidentelles ne sont à considérer que pour les ELU.

Ces actions ne sont pas prise en charge dans notre cas puisque la rivière n'est pas navigable par bateau donc il n'y aura pas de risque à ce point.

IX.6. Combinaisons d'actions :

On note :

- ☞ G : ensemble des actions permanentes ;
- ☞ Q : charge d'exploitation sans caractère particulier,
Q est composée de :

Q_r : système de charge A et B du Fascicule n°61 titre II ;

T_r : charges sur les trottoirs

Dans le cas des surcharges de chaussée : ELS : $Q = 1,20(Q_r + T_r)$

ELU : $Q = 1,07(Q_r + T_r)$

- ☞ W : action du vent définie par le Fascicule n°61 titre II ;

- ☞ T : action de la température ;
- ☞ $\Delta\theta$: action due au retrait et au fluage.

Les combinaisons à considérer pour les ouvrages en béton sont :

$$\text{A l'ELS: } G + \left\{ \frac{Q}{W} + \{0,5[T + \Delta\theta]\} \right\}$$

$$\text{A l'ELU: } 1,35G + 1,5 \left\{ \frac{Q}{W} + 1,6\{0,5[T + \Delta\theta]\} \right\}$$