

III.1 Introduction :

Les poutres d'une structure en béton armés sont soumises de différentes charges (les actions et les sollicitations).

On appelle **actions** les forces appliquées à une construction soit directement (charges permanentes, d'exploitation, climatiques, etc.). Soit indirectement, résultant de déformations imposées (retrait, fluage, variations de température, tassements, etc.).

On appelle **sollicitations** les efforts (effort normal, effort tranchant) et les moments (moment de flexion, moment de torsion) calculés à partir des actions par des méthodes appropriées.

III-2 les Actions : Les codes de conception distinguent :

- ✚ Les actions **permanentes**, notées **G**, dont l'intensité est constante ou très peu variable dans le temps, ou varie toujours dans le même sens en tendant vers une limite comme, par exemple, les actions dues aux déformations différées du béton (retrait, fluage) ;
- ✚ les actions **variables**, notées **Qi**, dont l'intensité varie fréquemment et de façon importante dans le temps ;
- ✚ les actions **accidentelles**, notées **F_A**, provenant de phénomènes rares (séisme, chocs, etc.).

Les valeurs des actions à introduire dans les calculs ont généralement un caractère nominal ; celles visées ci-après sont des valeurs forfaitaires et simplifiées, qui tiennent lieu de valeurs caractéristiques ou de valeurs représentatives telles qu'elles sont définies dans les Directives communes.

III-2-1 action permanentes (G):

Elles correspondent notamment au poids propre de la structure, à celui des équipements fixes (par exemple revêtements de sols et de plafonds, cloisons dans les bâtiments).

Aux efforts (poids, poussées, pressions) exercés par des terres ou par des liquides dont les niveaux varient peu, aux efforts dus aux déformations imposées en permanence à la construction.

En général, on introduit dans les calculs, en tant qu'actions de longue durée, les valeurs moyennes des charges permanentes (par exemple, pour le poids propre, le volume évalué d'après les dimensions prévues aux dessins d'exécution et la masse volumique du béton armé prise égale à $2,5 \text{ t/m}^3$). [17]

III-2-2 action variable (Q_i) :

✚ **la charge d'exploitation** : Ces charges sont normalement définies par les textes réglementaires ou normatifs en vigueur, et notamment :

- ✚ **Charges climatiques** :
 - a/ le Vent **W**.
 - b/ la Neige **S_n**.
 - c/ la glace **K**

✚ **Charges appliquées en cour d'exécution** : les charges connues en grandeur et en position et les charges de caractère aléatoire.

Les premières, si elles sont peu variables, sont assimilées, dans les calculs, à des charges permanentes, les secondes, au contraire, à des charges d'exploitation.

✚ **Température** : Pour un ouvrage à l'air libre en zone de climat tempéré, à défaut de justifications plus précises, les actions dues à la température sont déterminées en supposant que les variations de température sont comprises entre -40°C et $+30^{\circ}\text{C}$, [17] et en admettant forfaitairement un coefficient de dilatation du béton armé égal à 10^{-5}C^{-1} .

III-2-3 action accidentelles : Ce sont, par exemple, les chocs de véhicules ou de bateaux sur les appuis des ouvrages d'art, et les séismes.

Pour les chocs accidentels des ouvrages d'art, on se reportera au code utilisé pour définir les valeurs représentatives des actions (chocs frontaux ou latéraux).

Pour les effets des séismes, on se référera aux Règles parasismiques, l'application de ces Règles est imposée dans le calcul des structures des immeubles de grande hauteur (GH). [17]

III-3 combinaisons d'actions et sollicitations de calcul :

On est généralement conduit à considérer, en dehors des charges permanentes :

- une action variable dite de base, notée **Q_1** ;
- des actions variables dites d'accompagnement, notées **Q_i** avec (**Q_2, Q_3, \dots**).

Ces actions variables sont affectées, dans les calculs, de divers coefficients ψ :

ψ_0 : (valeur de combinaison) intervient dans les combinaisons fondamentales aux états-limites ultimes ou aux états-limites de service ;

ψ_1 : (valeur fréquente) n'intervient que dans les combinaisons accidentelles ;

ψ_2 : (valeur quasi permanente) intervient dans les combinaisons accidentelles et pour la vérification de la stabilité de forme.

III-3-1 Sollicitations de calcul dans les structures de bâtiment :

Les combinaisons d'actions à considérer dans les cas les plus courants sont les suivantes :

✓ **Vérification des états-limites ultimes de résistance :****Tableau III-1 :** Vérification des états-limites ultimes de résistance. [17]

| Actions permanentes | Actions variables | |
|----------------------------|-------------------|---|
| | De base | D'accompagnement |
| $1,35 G_{\max} + G_{\min}$ | $\gamma_{Q1} Q$ | $1,3 \psi_{02} Q_2$ |
| $1,35 G \text{ ou } G$ | $1,5 Q_B$ | 0 ou W ou S_n ou $W + S_n$ |
| | $1,5 W$ | 0 ou $1,3 \psi_0 Q_B$ ou S_n ou $1,3 \psi_0 Q_B + S_n$ |
| | $1,5 S_n$ | 0 ou $1,3 \psi_0 Q_B$ ou W ou $1,3 \psi_0 Q_B + W$ |

✓ **Vérification des états-limites de service :****Tableau III-2 :** Vérification des états-limites de service. [17]

| Actions permanentes | Actions variables | |
|-----------------------|-------------------|-----------------------------|
| | De base | D'accompagnement |
| $G_{\max} + G_{\min}$ | Q_I | $\psi_{02} Q_2$ |
| G | Q_B | 0 ou $0,77 W$ ou $0,77 S_n$ |
| | W | 0 ou $\psi_0 Q_B$ |
| | S_n | 0 ou $\psi_0 Q_B$ |

III-3-2 Combinaisons accidentelles :

Elles s'écrivent symboliquement :

$$G_{\max} + G_{\min} + F_A + \psi_{11} Q_1 + \Sigma \psi_{2i} Q_i$$

Avec F_A valeur représentative de l'action accidentelle.

III-4 Renforcement a l'effort tranchant d'une poutre :

Le renforcement aux effort tranchant discutée ici traite des dispositions des deux normes canadiennes reliées à la réhabilitation aux effort tranchant d'éléments en béton au moyen de PRF.

La conception porte principalement sur la contribution des systèmes de renforcement en PRF, parce que la résistance aux effort tranchant d'un élément est évaluée en faisant la somme de la contribution de ses matériaux constitutifs.

Les PRF sont installés perpendiculairement ou à angle par rapport à l'axe longitudinale de la poutre ou de la colonne afin d'en augmenter la résistance à l'effort tranchant.

Dans de tels cas, les renforts de cisaillement en PRF agissant comme des étriers supplémentaires et peuvent aussi bien être collés en surface ou encastrés près de la surface.

III-4-1 Principes de renforcement :

La résistance à l'effort tranchant d'un élément en béton dépend de diverses interactions entre le béton et les armatures.

La pratique courant pour les normes et le codes de conception consiste malgré tout à exiger que la résistance à l'effort tranchant d'un élément soit calculée en faisant la somme de la résistance à l'effort tranchant attribuée à chacun de ses constituants, qui sont le béton, l'acier, et les PRF.

La résistance à l'effort tranchant attribuée aux étriers en PRF est fonction de θ , l'angle des fissures dans le béton, et de la direction et de la déformation effective du PRF, β et ϵ_{PRFe} , respectivement. [16]

Lorsque une poutre supportent une dalle, il n'est pas pratique de ceinturer la section avec des PRF pour améliorer la résistance aux effort tranchant.

Dans de tels cas ou la section est rectangulaire, la meilleur option consiste à coller des bandes de PRF continues sur les deux faces latérales et le dessous de la poutre, et ainsi former des étriers en PRF en U.

Les étriers en U et le collage latéral sont des systèmes de renforcement aux effort tranchant en PRF nécessitant une liaison. Toutefois, la longueur disponible pour transférer les contraintes de ces systèmes de PRF au substrat de béton par l'adhésif est limitée.

La fixation des extrémités libres constitue une préoccupation majeur pour assurer les meilleures performances possibles des systèmes de PRF nécessitant une liaison.

Au Canada, il y a deux la norme pour le calcul du renforcement, la norme S6-06 pour les ponts et la norme S806-02 pour les bâtiments.

Dans ce travail en renforce une poutre d'un bâtiment en béton armé, en utilisant la norme S806-02 pour les bâtiments.

III-4-1-1 Norme S806-02 pour les bâtiments :

La norme S806-02 pour les bâtiments édicte des équations différentes pour calculer la résistance pondérée à l'effort tranchant de différents types d'éléments en béton renforcés avec des étriers en PRF [16].

La résistance pondérée à l'effort tranchant V_r d'un élément de béton renforcé au moyen d'étriers en PRF est la somme des résistances attribuées à ses matériaux constitutifs calculée de la manière suivante : $V_r = V_c + V_s + V_{PRF}$. (4)

- V_c : la résistance attribuée au béton.
- V_s : la résistance attribuée à l'acier.
- V_{PRF} : la résistance attribuée au PRF.

✚ Résistance attribuée au béton :

Selon la norme au S806-02 pour les bâtiments, la résistance pondérée à l'effort tranchant attribuée au béton d'une poutre est calculée de la manière suivante : [16]

$$V_c = 0.2\lambda\phi_c\sqrt{f'_c} b_v d \quad (1)$$

- V_c : la résistance spécifiée en compression du béton.
- b_v : la largeur de l'âme de la poutre.
- λ : l'introduit pour tenir compte de la masse volumique du béton, tel que : [16]

$\lambda = 1,0$ pour le béton de masse volumique normale.

$\lambda = 0,85$ pour le béton semi-léger.

$\lambda = 0,75$ pour le béton léger.

✚ Résistance attribuée à l'acier :

La résistance pondérée à l'effort tranchant attribuée à l'armature de cisaillement en acier calculée de la manière suivante : [16]

$$V_s = \frac{\phi_s f_y A_v d}{s} \quad (2)$$

- ϕ_s : le coefficient de tenue.
- f_y : la contrainte à la limite élastique de l'acier de la poutre.
- A_v : l'aire de la section transversale de l'acier
- S : l'espacement étriers en acier placés perpendiculairement à l'axe de la poutre rectangulaire

- d : la distance entre la face extrême en compression et le centroïde des armatures de tension en acier.

✚ Résistance attribuée au PRF :

La norme S806-02 pour les bâtiments couvre presque toutes les configurations de renfort en cisaillement en PRF, section ceinturée, étriers en U et collage latérale continus ou espaces.

La résistance pondérée à l'effort tranchant attribuée à l'armature de cisaillement en PRF dont les fibres sont perpendiculairement à l'axe longitudinal de l'élément est calculée de la manière suivante : [16]

$$V_{PRF} = \frac{\phi_{PRF} E_{PRF} \epsilon_{PRFe} A_{PRF} d_{PRF}}{S_{PRF}} \quad (3)$$

- ϕ_{PRF} : coefficient de tenue,
- E_{PRF} : le module élastique,
- ϵ_{PRFe} : la déformation effective,
- A_{PRF} : l'aire de la section transversale,
- d_{PRF} : la hauteur effective,
- S_{PRF} : l'espacement du renfort de cisaillement en PRF.

Pour les éléments prismatiques en béton, A_{PRF} est la somme de l'aire de la section transversale du renfort de cisaillement en PRF sur les deux faces opposées.

Lorsque le renfort de cisaillement est continu suivant l'axe de l'élément, la largeur des feuilles de PRF mesurée perpendiculairement à la direction principale des fibres, w_{PRF} , est supposée être égale à S_{PRF} pour la détermination de A_{PRF} . [16]

Comme la montre la **figure III-1**, S_{PRF} est la distance mesurée entre le début d'un étrier en PRF au début du suivant.

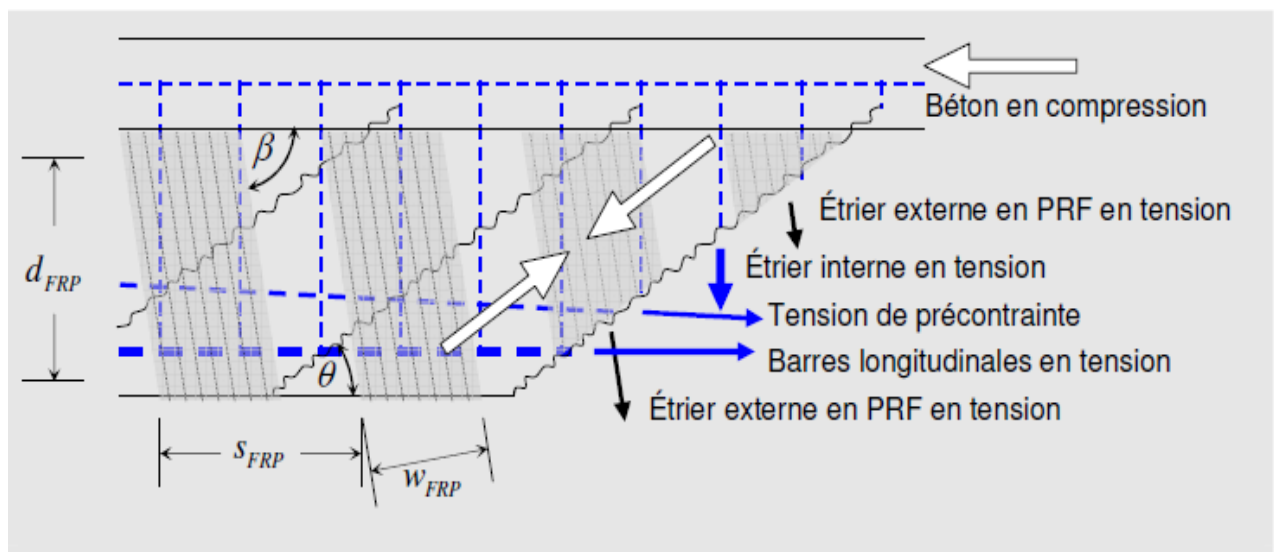


Figure III-1 : théorie des champs de compression modifier avec des étriers en PRF. [16]

La valeur de ϵ_{PRFe} utilisée dans l'équation (3) ne doit pas excéder la résistance du PRF de l'équation (4) et doit être assez petite pour permettre la mobilisation de la résistance en cisaillement du béton en limitant la largeur des fissures (5).

$$\epsilon_{PRFe} \leq \phi_{PRF} \epsilon_{PRFu} \quad (4)$$

$$\epsilon_{PRFe} \leq 0,004 \quad (5)$$

Dans l'équation (4), ϵ_{PRFu} est la déformation ultime du PRF.

Dans certains cas spéciaux ou une longueur de développement suffisante ne peut être assurée pour une application nécessitant une liaison, il faut utiliser $\epsilon_{PRFe} = 0.002$. [16]

Cette valeur plutôt faible est parfois utilisée pour poutre de faible hauteur renforcée au moyen d'étriers en PRF en forme de U ou par collage de PRF sur les faces latérales.

Puisque la norme S806-02 pour les bâtiments ne donne pas de définition de la longueur de développement requise, cette valeur doit être évaluée par des essais ou déterminée à partir de l'expérience de l'ingénieur concepteur.

La valeur de d_{PRF} à utiliser dans l'équation (3) est liée au type de l'élément en béton considéré :

– Pour les poutres, la distance entre la face extrême en compression et le centre de gravité des armatures de tension en PRF définit d_{PRF} , selon la norme S806-02 pour les bâtiments. [16]

Pour les poutres n'ayant pas d'armatures de tension en PRF, il est suggéré d'utiliser $d_{PRF} = d$, la distance entre la face extrême en compression et le centre de gravité des armatures de tension en acier.

De plus, d_{PRF} ne doit pas être supérieur à h_{PRF} , la longueur du PRF collé sur la face latérale de la poutre.

Pour les poutres et les colonnes ayant un renfort de cisaillement en PRF dont les fibres sont orientées à un angle β différent de 90° par rapport à l'axe longitudinal, l'équation suivante est suggérée: [16]

$$V_{PRF} = \frac{\phi_{PRF} E_{PRF} \epsilon_{PRFe} A_{PRF} d_{PRF} (\cos \beta + \sin \beta)}{S_{PRF}} \quad (6)$$

✚ Procédure de dimensionnement :

Puisque la contribution du renfort de cisaillement en PRF est ajoutée à la contribution des autres matériaux, une bonne partie du dimensionnement peut être complétée avant de faire quelque hypothèse que ce soit sur le système de PRF qui sera utilisé.

Les étapes pour le dimensionnement d'un renforcement à l'effort tranchant en PRF en utilisant les équations de la norme S806-02 pour les bâtiments sont :

- calculer V_s avec l'équation (2) et V_c avec l'équation (1) appropriée ;
- réarranger l'équation (4) comme suit pour déterminer V_{PRF} .

$$V_{PRF} \geq V_f - (V_c - V_s) \quad (7)$$

– sélectionner le matériau des étriers en PRF et la géométrie (section ceinturée, étriers en U ou collage latéral) de poutre.

- calculer la déformation effective ϵ_{PRFe} avec les équations (4) ;
- déterminer l'espacement S_{PRF} , ou l'épaisseur t_{PRF} , requise avec l'équation (3) ;

III-4-1-2 installation des renforts de cisaillement en PRF :

L'installation d'un renfort en PRF doit être effectuée conformément aux instructions du fabricant du système, de conception et des situations particulières sont présentées ici :

Qualité du béton :

Pour les étriers en U et le collage latéral, la longueur sur laquelle le PRF peut être ancré est habituellement limitée par les dimensions de la section transversale de l'élément.

Le béton existant doit être d'une qualité acceptable, la surface du béton doit être préparée ou réparée si nécessaire, conformément aux exigences du matériau de PRF utilisé. [16]

Système d'ancrage :

La norme S806-02 pour les bâtiments exige d'assurer une longueur d'ancrage suffisante ou d'installer un ancrage mécanique.

Ces dispositions sont volontairement très générales de manière à accepter tous les systèmes convenables, en autant que les performances ont été démontrées avec succès.

Les sections ceinturées sont évidemment fixées dans la zone de compression sans possibilité de décollement, le principal enjeu étant de fournir une longueur de chevauchement suffisante à l'extrémité libre.

La longueur de chevauchement requise dépend du système choisi et aucune valeur n'est édictée par les deux normes canadiennes, il est suggéré de stipuler une longueur de chevauchement d'au moins 150mm. [16]

Le chevauchement recommandé pour le confinement est adéquat pour les renforts de cisaillement en PRF qui ceinturent la section.

Le collage de bandes de PRF horizontales sur les extrémités des étriers en PRF en U, près de la semelle en compression, constitue un système d'ancrage.

Le but premier de ces bandes longitudinales en PRF consiste à augmenter la surface collée aux extrémités des étriers en PRF, ce qui permet à ces derniers d'atteindre des déformations supérieures et ultimes, de reprendre des charges plus grandes.

Les bandes longitudinales en PRF sont bénéfiques seulement pour les étriers en PRF espacés, qu'ils soient en forme de U ou collés sur les faces latérales.

Il s'agit d'une application nécessitant une liaison et l'efficacité de la configuration proposée devrait être démontré par des essais ou d'autre méthodes fiables.

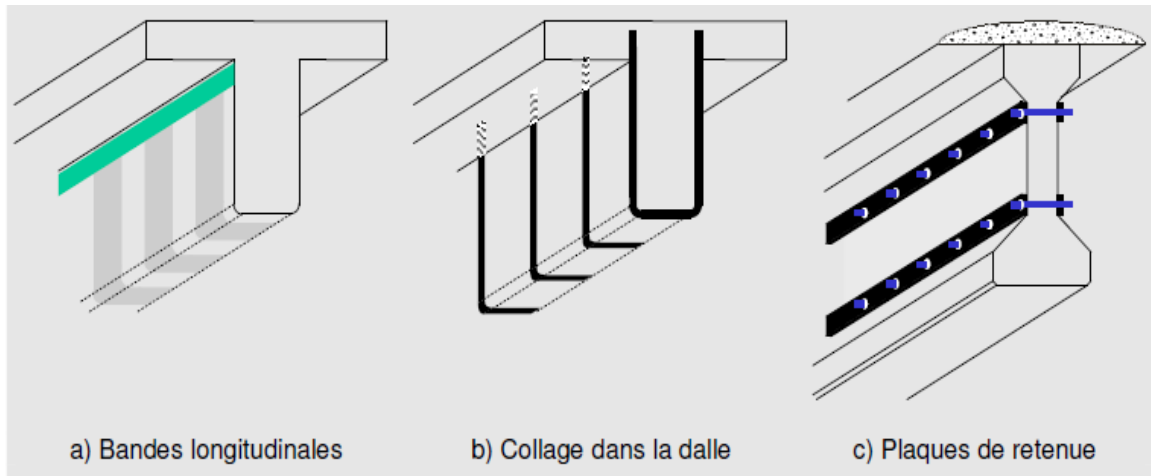


Figure III-2 système d'ancrage typique pour les étriers en PRF. [16]

Il existe des systèmes d'ancrage mécanique pour les PRF collés en surface, ils peuvent être ancrés dans la dalle par collage (figure III-2b) ou des plaques rigides boulonnées au travers de L'âme peuvent retenir des étriers continus (figure III-2-c).

Actuellement aucune norme ou lignes directrices n'a été publiée sur les méthodes et les valeurs minimales d'approbation des systèmes d'ancrages mécaniques.

Certains systèmes d'ancrage mécaniques pourraient être utilisés avec des bétons de mauvaise qualité.

Arrondissement des arêtes :

Afin de réduire la concentration des contraintes et ainsi éviter une rupture prématurée du renfort de cisaillement en PRF, les arêtes vives du béton doivent être arrondies.

Le rayon des arêtes doit être suffisamment grand pour favoriser un contact continu des étriers en PRF avec le béton lors de l'installation. [16]

La norme S806-02 pour les bâtiments exige un rayon minimum de 20 mm seulement.

III-5 : limitation concernant le renforcement aux efforts tranchants en PRF :

III-5-1 Espacement des étriers en PRF :

La norme S806-02 pour les bâtiments n'impose pas de limites à S_{PRF} , la limite ci-dessus peut être utilisée pour éviter une rupture par cisaillement entre les étriers en PRF.

$$S_{PRF} \leq w_{PRF} + \frac{d_{PRF}}{4} \quad (8)$$

III-5-2 Renforcement maximum :

Les valeurs maximales imposées à V_r par la norme S806-02 pour les bâtiments sont établies en fonction du type d'élément en béton de la manière suivante :

$$V_r \leq V_c + 0,6\lambda\phi_c\sqrt{f'_c} b_v d \quad (9)$$

III-5-3 Renforcement pour l'effort tranchant minimum :

La norme S806-02 pour les bâtiments ne contient aucune disposition concernant l'armature de cisaillement minimale qui doit être fournie sous forme d'étriers externes en PRF.

L'armature minimale de cisaillement, exigée lorsque l'effort tranchant excède une proportion donnée de la résistance du béton seul, est habituellement installée sous forme d'étriers internes.

III -6 Méthode de calcul : selon la norme canadienne S806.

Le calcul consiste à l'élaboration d'un chiffrier Excel qui calcule la section du composite nécessaire pour le renforcement d'une poutre en béton armé simplement appuyée par deux type de matériaux composites (SIKA Wrap HEX103C et sika Wrap HEX430G) et sollicitée en effort tranchant.

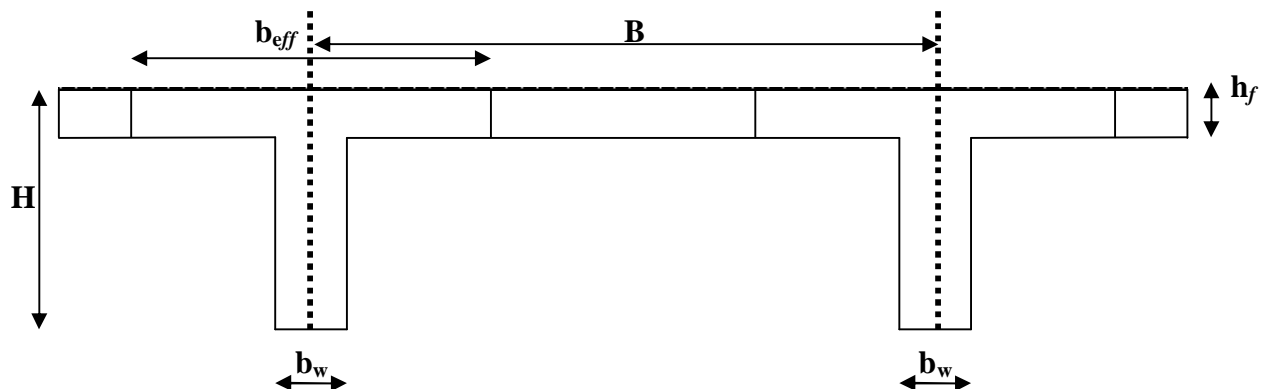
Le chiffrier est constitué des procédures principales

- Saisie des données de calcul
- Choix du type de composite
- Choix du type de section de la poutre renforcée
- Options de calcul
- Résultats

III -6-1 Etude d'une poutre en béton armé :

Cet exemple présent et comparé diverses analyses de la résistance à l'effort tranchant d'une poutre de 12 m de longueur.

La géométrie de la section transversale de la poutre est représentée à la figure **III-3**, tandis que les sections et les propriétés des différents matériaux résumé dans le **tableau III-3**:



Figures III-3 : Section transversale d'une poutre en béton armée

III-6-1-1 Calcul de la résistance pondérée à l'effort tranchant avec deux cas de charges vives différents sur la poutre :

1^{ère} cas : charge $Q = 1,25 \text{ KN/m}$

Tableau III-3 représenter les résultats de V_f et V_r

| Les données | |
|--|--------|
| Géométrie de la section | |
| H : la hauteur en «mm » | 600 |
| b_{eff} : largeur effective de la table en "mm" | 3130 |
| b_w : largeur de l'âme en "mm" | 250 |
| d : la distance entre la face extrême de compression et le centre des d'armatures en acier en "mm" | 540 |
| d_v : la hauteur effective de cisaillement des étriers) en "mm" | 486 |
| h_f : la hauteur de la table en «mm » | 120 |
| B : largeur tribulaire en "mm" | 4000 |
| L : longueur en "mm" | 12000 |
| c : enrobage en "mm" | 30 |
| γ : La masse volumique du béton en "KN/m ³ " | 24 |
| Q : La charge vive en "kN/m ² " | 1,25 |
| W_D : la charge permanente en "KN/m" | 14,4 |
| W_L : la charge d'exploitation en "KN/m" | 5 |
| caractéristique du béton | |
| type du béton | Normal |
| λ : introduit pour tenir compte de la masse volumique du béton | 1 |
| ϕ_c : le coefficient de tenue du béton) | 0,6 |
| f'_c : la résistance spécifiée en compression du béton en "Mpa" | 44 |
| F_{cr} : la résistance à la fissuration du béton en "Mpa" | 2,65 |
| caractéristique d'acier | |
| ϕ_s : le coefficient de tenue de l'acier | 0,85 |
| F_y : la contrainte à la limite élastique spécifiée en "Mpa" | 400 |
| s : l'espacement étriers en acier placés perpendiculairement à l'axe des éléments en "mm" | 400 |
| N : nombre des lignes des barres d'armature | 2 |

| | |
|---|--------|
| g : L'enter-axe des lignes des barres d'armature en "mm" | 60 |
| D : diamètre des barres en "mm" | 6 |
| Av : l'aire de la section transversale en "mm ² " | 100 |
| Calcule | |
| V _c : la résistance attribuée du béton en "KN" | 107,46 |
| V _s : la résistance attribuée de l'acier en "KN" | 45,9 |
| V _r : la résistance au cisaillement de la poutre en "KN" | 153,36 |
| V _f : la résistance à l'effort tranchant pondéré en "KN" | 140,61 |

On a remarque que la résistance au cisaillement de la poutre est supérieure à l'effort tranchant pondéré ($V_r > V_f$) donc cette poutre résiste aux charges extérieurs appliqué de point de vie de cisaillement.

2^{ème} cas : on augmente la charge vive appliquée sur la poutre de **1,25 KN/m²** à **Q=5KN/m²**.

Tableau III-4 représenter les résultats de V_f et V_r a une charge vive **Q=5KN/m²**

| Les données | |
|--|-------|
| Géométrie de la section | |
| H : la hauteur en "mm" | 600 |
| b _{eff} : largeur effective de la table en "mm" | 3130 |
| b _w : largeur de l'âme en "mm" | 250 |
| d : la distance enter la face extrême de compression et le cent-roide des armatures en acier en « mm » | 540 |
| d _v : la hauteur effective de cisaillement des étriers) en "mm" | 486 |
| h _f : la hauteur de la table en "mm" | 120 |
| B : largeur tributaire en "mm" | 4000 |
| L : longueur en "mm" | 12000 |
| c : enrobage en "mm" | 30 |
| γ : La masse volumique du béton en "KN/m ³ " | 24 |
| Q : La charge vive en "KN/m ² " | 5 |
| W _D : la charge permanente en "KN/m" | 14,4 |
| W _L : la charge d'exploitation en "KN/m" | 20 |

| caractéristique du béton | |
|---|--------|
| type du béton | Normal |
| λ : introduit pour tenir compte de la masse volumique du béton | 1 |
| ϕ_c : le coefficient de tenue du béton | 0,6 |
| f'_c : la résistance spécifiée en compression du béton en "Mpa" | 44 |
| F_{cr} : la résistance à la fissuration du béton en "Mpa" | 2,65 |
| caractéristique d'acier | |
| ϕ_s : le coefficient de tenue de l'acier | 0,85 |
| F_y : la contrainte à la limite élastique spécifiée en "Mpa" | 400 |
| s : l'espacement étriers en acier placés perpendiculairement à l'axe des éléments en "mm" | 400 |
| N : nombre des lignes des barres d'armature | 2 |
| g : L'enter-axe des lignes des barres d'armature en "mm" | 60 |
| D : diamètre des barres en "mm" | 6 |
| A_v : l'aire de la section transversale en "mm ² " | 100 |
| Calcul | |
| V_c : la résistance attribuée du béton en "KN" | 107,46 |
| V_s : la résistance attribuée de l'acier en "KN" | 45,9 |
| V_r : la résistance au cisaillement de la poutre en "KN" | 153,36 |
| V_f : la résistance à l'effort tranchant pondéré en "KN" | 264,7 |

III-6-1-2 calcul de la résistance de la poutre après le renforcement :

On a remarque que la résistance au cisaillement de la poutre est inférieure à l'effort tranchant pondéré ($V_r < V_f$) donc cette poutre ne résiste pas aux charges qui sont appliquées de point de vue de cisaillement.

Quand on augmente la charge vive de **1,25** jusqu'à **5KN/m²** nous avons un manque de résistance

Afin d'augmenter la résistance au cisaillement de la poutre on la renforcée par des matériaux composites en utilisant (les tissu SIKA Wrap ; HEX103C ; et SIKA Wrap 430G).

- **SIKA Wrap ; HEX103C** : est un tissu de fibre de carbone unidirectionnelle à haute résistance et haut module. Il est imprégné sur le chantier avec l'époxy Sikadur® 300, Sikadur® Hex 300 ou Sikadur® Hex 306 pour former un polymère renforcé de fibre de carbone (PRFC) qui servira à renforcer des éléments structuraux.

Le manque de la résistance au cisaillement de la poutre est corrigé par le renforcement avec le produit SIKA. Plusieurs configurations de l'installation du produit sont étudiées.

1 –Espacement de renfort de PRF $S_{PRF}= 300\text{mm}$ axe à axe

Tableau III-5 : représente les valeurs de résistance V_f et V_g , avec $S_{PRF}= 300\text{mm}$

| | |
|--|--------|
| SiKa-Wrape;HEX 103C | |
| Les Données | |
| Géométrie de la section | |
| H : l'hauteur de la poutre en "mm" | 600 |
| b_{eff} : largeur effective de la table en "mm" | 3130 |
| b_w : largeur de l'âme en "mm" | 250 |
| d : la distance entre la face extrême de compression et le centre des armatures en acier en "mm" | 540 |
| d_v : l'hauteur effective de cisaillement des étriers en "mm" | 486 |
| h_f : l'hauteur de la table en "mm" | 120 |
| B : largeur tribulaire en "mm" | 4000 |
| L : la longueur en "mm" | 12000 |
| c : enrobage en "mm" | 30 |
| γ : La masse volumique du béton en " KN/m^3 " | 24 |
| Q : La charge vive en " kN/m^2 " | 5 |
| W_D : la charge permanente en " KN/m " | 14,4 |
| W_L : la charge d'exploitation en " KN/m " | 20 |
| caractéristique du béton | |
| type du béton | Normal |
| λ : introduit pour tenir compte de la masse volumique du béton | 1 |
| ϕ_c : le coefficient de tenue du béton | 0,6 |
| f'_c : la résistance spécifiée en compression du béton en "Mpa" | 44 |
| f_{cr} : la résistance à la fissuration du béton en "Mpa" | 2,65 |
| caractéristique d'acier | |
| ϕ_s : le coefficient de tenue de l'acier | 0,85 |
| F_y : la contrainte à la limite élastique spécifiée en "mm" | 400 |
| s : l'espacement étriers en acier placés perpendiculairement à l'axe des éléments en "mm" | 400 |

| | |
|--|--------|
| N : nombre des lignes des barres d'armature | 2 |
| g : L'enter-axe des lignes des barres d'armature en "mm" | 60 |
| A_v : l'aire de la section transversale en "mm ² " | 100 |
| caractéristique du PRF | |
| d_{prf} : la hauteur effective en "mm" | 480 |
| S_{PRF} : l'espacement de bandes de PRF axe à axe en "mm" | 300 |
| t_{prf} : l'épaisseur de la bande de PRF en "mm" | 1,016 |
| largeur de bandes de PRF en "mm" | 300 |
| E_{prf} : le module élastique de PRF en "Mpa" | 65087 |
| ϕ_{prf} : le coefficient de tenue de PRF | 0,75 |
| ξ_{prfu} : la déformation effective de PRF | 0,0098 |
| ξ_{prf} : la déformation effective de PRF | 0,0073 |
| ξ_{prfe} : la déformation effective de PRF | 0,004 |
| Calcul | |
| V_c : la résistance attribuée du béton en "KN" | 107,46 |
| V_s : la résistance attribuée de l'acier en "KN" | 45,9 |
| V_r : la résistance au cisaillement de la poutre en "KN" | 153,36 |
| V_f : la résistance à l'effort tranchant pondéré en "KN" | 264,7 |
| V_{prf} : la valeur nécessaire de la résistance du PRF en "KN" | 111,31 |
| A_{prf} : l'aire nécessaire de section transversale de PRF en "mm ² " | 356,3 |
| N_1 : le nombre des couches de bandes | 1 |
| A_{prf} : l'aire de la section transversale de PRF en "mm ² " | 609,6 |
| V_{prf} : la résistance attribuée en PRF en "KN" | 190,45 |
| V_g : la résistance au cisaillement de la poutre renforcé en "KN" | 343,81 |
| La vérification entre V_f et V_g | Ok |

2 – Espacement de renfort de PRF $S_{PRF} = 450\text{mm}$ axe à axeTableau III-6: représente les valeurs de résistance V_f et V_g . avec $S_{PRF} = 450\text{mm}$

| | |
|--|--------|
| SiKa-Wrape;HEX 103C | |
| Les Données | |
| Géométrie de la section | |
| H : l'hauteur de la poutre en "mm" | 600 |
| b_{eff} : largeur effective de la table en "mm" | 3130 |
| b_w : largeur de l'âme en "mm" | 250 |
| d : la distance entre la face extrême de compression et le cent-roide des armatures en acier en "mm" | 540 |
| d_v : la hauteur effective de cisaillement des étriers) en "mm" | 486 |
| h_f : la hauteur de la table en "mm" | 120 |
| B : largeur tributaire en "mm" | 4000 |
| L : longueur en "mm" | 12000 |
| c : enrobage en "mm" | 30 |
| γ : La masse volumique du béton en "KN/m ³ " | 24 |
| Q : La charge vive en "kN/m ² " | 5 |
| W_D : la charge permanente en "KN/m" | 14,4 |
| W_L : la charge d'exploitation en "KN/m" | 20 |
| caractéristique du béton | |
| type du béton | Normal |
| λ : introduit pour tenir compte de la masse volumique du béton | 1 |
| ϕ_c : le coefficient de tenue du béton | 0,6 |
| f'_c : la résistance spécifiée en compression du béton en "Mpa" | 44 |
| f_{cr} : la résistance à la fissuration du béton en "Mpa" | 2,65 |
| caractéristique d'acier | |
| ϕ_s : le coefficient de tenue de l'acier | 0,85 |
| F_y : la contrainte à la limite élastique spécifiée en "mm" | 400 |
| S : l'espacement étriers en acier placés perpendiculairement à l'axe des éléments en "mm" | 400 |
| N : nombre des lignes des barres d'armature | 2 |
| g : L'entre-axe des lignes des barres d'armature en "mm" | 60 |
| A_v : l'aire de la section transversale en "mm ² " | 100 |

| caractéristiques PRF | |
|--|-------------|
| d_{prf} : la hauteur effective en "mm" | 480 |
| S_{prf} : l'espacement de bandes de PRF axe à axe en "mm" | 450 |
| t_{prf} : l'épaisseur de la bande de PRF en "mm" | 1,016 |
| largeur de bandes de PRF en "mm" | 300 |
| E_{prf} : le module élastique de PRF en "Mpa" | 65087 |
| ϕ_{prf} : le coefficient de tenue de PRF | 0,75 |
| ξ_{prfu} : la déformation effective de PRF | 0,0098 |
| ξ_{prf} : la déformation effective de PRF | 0,0073 |
| ξ_{prfe} : la déformation effective de PRF | 0,004 |
| Calcul : | |
| V_c : la résistance attribuée du béton en "KN" | 107,46 |
| V_s : la résistance attribuée de l'acier en "KN" | 45,9 |
| V_f : la résistance au cisaillement de la poutre en "KN" | 153,36 |
| V_f : la résistance à l'effort tranchant pondéré en "KN" | 264.7 |
| V_{prf} : la valeur nécessaire de la résistance du PRF en "KN" | 111,31 |
| A_{prf} : l'aire nécessaire de section transversale de PRF en "mm ² " | 534,44 |
| N1: le nombre des couches de bandes | 1 |
| A_{prf} : l'aire de la section transversale de PRF en "mm ² " | 609.2 |
| V_{prf} : la résistance attribuée en PRF en "KN" | 126,97 |
| V_g : la résistance au cisaillement de la poutre renforcé en "KN" | 280,3251558 |
| La vérification entre V_f et V_g | Ok |

3 –Espaceiment de renfort de PRF $S_{PRF}= 600\text{mm}$ axe à axe :**Tableau III-7 :** représente les valeurs de résistance V_f et V_g , avec $S_{PRF}= 600\text{mm}$

| | |
|--|--------|
| SiKa-Wrape;HEX 103C | |
| Les Données | |
| Géométrie de la section | |
| H : l'hauteur de la poutre en "mm" | 600 |
| b_{eff} : largeur effective de la table en "mm" | 3130 |
| b_w : largeur de l'âme en "mm" | 250 |
| d : la distance enter la face extrême de compression et le cent-roide des armatures en acier en "mm" | 540 |
| d_v : la hauteur effective de cisaillement des étriers) en "mm" | 486 |
| h_f : la hauteur de la table en "mm" | 120 |
| B : largeur tributaire en "mm" | 4000 |
| L : la longueur en "mm" | 12000 |
| c : enrobage en "mm" | 30 |
| γ : La masse volumique du béton en "KN/m ³ " | 24 |
| Q : La charge vive en "kN/m ² " | 5 |
| W_D : la charge permanente en "KN/m" | 14,4 |
| W_L : la charge d'exploitation en "KN/m" | 20 |
| caractéristique du béton | |
| type du béton | Normal |
| λ : introduit pour tenir compte de la masse volumique du béton | 1 |
| ϕ_c : le coefficient de tenue du béton | 0,6 |
| f'_c : la résistance spécifiée en compression du béton en "Mpa" | 44 |
| f_{cr} : la résistance à la fissuration du béton en "Mpa" | 2,65 |
| caractéristique d'acier | |
| ϕ_s : le coefficient de tenue de l'acier | 0,85 |
| F_y : la contrainte à la limite élastique spécifiée en "mm" | 400 |
| s : l'espacement étriers en acier placés perpendiculairement à l'axe des éléments en "mm" | 400 |
| N : nombre des lignes des barres d'armature | 2 |

| | |
|--|-------------|
| g : L'enter-axe des lignes des barres d'armature en "mm" | 60 |
| A_v : l'aire de la section transversale en "mm ² " | 100 |
| caractéristique du PRF | |
| d_{prf} : l'hauteur effective en "mm" | 480 |
| S_{prf} : l'espacement de bandes de PRF axe à axe en "mm" | 600 |
| t_{prf} : l'épaisseur de la bande de PRF en "mm" | 1,016 |
| largeur de bandes de PRF en "mm" | 300 |
| E_{prf} : le module élastique de PRF en "Mpa" | 65087 |
| \emptyset_{prf} : le coefficient de tenue de PRF | 0,75 |
| ξ_{prfu} : la déformation effective de PRF | 0,0098 |
| ξ_{prf} : la déformation effective de PRF | 0,00735 |
| ξ_{prfe} : la déformation effective de PRF | 0,004 |
| Calcul | |
| V_c : la résistance attribuée du béton en "KN" | 107,46 |
| V_s : la résistance attribuée de l'acier en "KN" | 45,9 |
| V_f : la résistance au cisaillement de la poutre en "KN" | 153,36 |
| V_f : la résistance à l'effort tranchant pondéré en "KN" | 264,7 |
| V_{prf} : la valeur nécessaire de la résistance du PRF en "KN" | 111,31 |
| A_{prf} : l'aire nécessaire de section transversale de PRF en "mm ² " | 712,6 |
| N_1 : le nombre des couches de bandes | 2 |
| A_{prf} : l'aire de la section transversale de PRF en "mm ² " | 1219,2 |
| V_{prf} : la résistance attribuée en PRF en "KN" | 190,45 |
| V_g : la résistance au cisaillement de la poutre renforcé en "KN" | 343,8084122 |
| La vérification entre V_f et V_g | ok |

- **SIKA Wrap ; HEX430G** : est un tissu de fibre de verre de type E unidirectionnelle. Lorsque mis en place par superposition d'épaisseurs du tissu sur la résine d'imprégnation époxyde Sikadur® 330, il forme un système de renforcement composite.

1 –Espacement de renfort de PRF $S_{PRF} = 300\text{mm}$ axe à axe.

Tableau III-8 : représente les valeurs de résistance V_f et V_g , avec $S_{PRF} = 300\text{mm}$

| | |
|--|--------|
| Sika-Wrape : HEX430G | |
| Les Données | |
| Géométrie de la section | |
| H : l'hauteur de la poutre en "mm" | 600 |
| b_{eff} : largeur effective de la table en "mm" | 3130 |
| b_w : largeur de l'âme en "mm" | 250 |
| d : la distance entre la face extrême de compression et le centre des armatures en acier en "mm" | 540 |
| d_v : la hauteur effective de cisaillement des étriers en "mm" | 486 |
| h_f : la hauteur de la table en "mm" | 120 |
| B : largeur tribulaire en "mm" | 4000 |
| L : la longueur en "mm" | 12000 |
| c : enrobage en "mm" | 30 |
| γ : La masse volumique du béton en "KN/m ³ " | 24 |
| Q : La charge vive en "kN/m ² " | 5 |
| W_D : la charge permanente en "KN/m" | 14,4 |
| W_L : la charge d'exploitation en "KN/m" | 20 |
| caractéristique du béton | |
| type du béton | Normal |
| λ : introduit pour tenir compte de la masse volumique du béton | 1 |
| ϕ_c : le coefficient de tenue du béton | 0,6 |
| f'_c : la résistance spécifiée en compression du béton en "Mpa" | 44 |
| F_{cr} : la résistance à la fissuration du béton en "Mpa" | 2,65 |
| caractéristique d'acier | |
| ϕ_s : le coefficient de tenue de l'acier | 0,85 |

| | |
|---|--------|
| F_y : la contrainte à la limite élastique spécifiée en "Mpa" | 400 |
| s : l'espacement étriers en acier placés perpendiculairement à l'axe des éléments en "mm" | 400 |
| N : nombre des lignes des barres d'armature | 2 |
| g : L'enter-axe des lignes des barres d'armature en "mm" | 60 |
| A_v : l'aire de la section transversale en "mm ² " | 100 |
| caractéristique du PRF | |
| d_{prf} : la hauteur effective en "mm" | 480 |
| t_{prf} : l'épaisseur de la bande de PRF en "mm" | 0,508 |
| S_{PRF} : l'espacement de bandes de PRF axe à axe en "mm" | 300 |
| largeur de bandes de PRF en "mm" | 300 |
| E_{prf} : le module élastique de PRF en "Mpa" | 24591 |
| ϕ_{prf} : le coefficient de tenue de PRF | 0,75 |
| ξ_{prfu} : la déformation effective de PRF | 0,019 |
| ξ_{prf} : la déformation effective de PRF | 0,0145 |
| ξ_{prfe} : la déformation effective de PRF | 0,004 |
| Calcul | |
| V_c : la résistance attribuée du béton en "KN" | 107,46 |
| V_s : la résistance attribuée de l'acier en "KN" | 45,9 |
| V_r : la résistance au cisaillement de la poutre en "KN" | 153,36 |
| V_f : la résistance à l'effort tranchant pondéré en "KN" | 264,7 |
| V_{prf} : la valeur nécessaire de la résistance du PRF en "KN" | 111,31 |
| A_{prf} : l'aire nécessaire de section transversale de PRF en "mm ² " | 943,04 |
| N_1 : le nombre des couches de bandes | 4 |
| A_{prf} : l'aire de la section transversale de PRF en "mm ² " | 1219,2 |
| V_{prf} : la résistance attribuée en PRF en "KN" | 143,91 |
| V_g : la résistance au cisaillement de la poutre renforcé en "KN" | 279,27 |
| La vérification entre V_f et V_g | ok |

2 - Espacement de renfort de PRF $S_{PRF} = 450\text{mm}$ axe à axeTableau III-9 : représente les valeurs de résistance V_f et V_g , avec $S_{PRF} = 450\text{mm}$

| | |
|---|--------|
| Sika-Wrape : HEX430G | |
| Les Données | |
| Géométrie de la section | |
| H : l'hauteur de la poutre en "mm" | 600 |
| b_{eff} : largeur effective de la table en "mm" | 3130 |
| b_w : largeur de l'âme en "mm" | 250 |
| d : la distance entre la face extrême de compression et le centre de gravité des armatures en acier en "mm" | 540 |
| d_v : la hauteur effective de cisaillement des étriers en "mm" | 486 |
| h_f : l'hauteur de la table en "mm" | 120 |
| B : largeur tribulaire en "mm" | 4000 |
| L : la longueur en "mm" | 12000 |
| c : enrobage en "mm" | 30 |
| γ : La masse volumique du béton en "KN/m ³ " | 24 |
| Q : La charge vive en "kN/m ² " | 5 |
| W_D : la charge permanente en "KN/m" | 14,4 |
| W_L : la charge d'exploitation en "KN/m" | 20 |
| caractéristique du béton | |
| type du béton | Normal |
| λ : introduit pour tenir compte de la masse volumique du béton | 1 |
| ϕ_c : le coefficient de tenue du béton | 0,6 |
| f'_c : la résistance spécifiée en compression du béton en "Mpa" | 44 |
| F_{cr} : la résistance à la fissuration du béton en "Mpa" | 2,65 |
| caractéristique d'acier | |
| ϕ_s : le coefficient de tenue de l'acier | 0,85 |
| F_y : la contrainte à la limite élastique spécifiée en "Mpa" | 400 |
| s : l'espacement étriers en acier placés perpendiculairement à l'axe des éléments en "mm" | 400 |

| | |
|---|--------|
| N : nombre des lignes des barres d'armature | 2 |
| g : L'enter-axe des lignes des barres d'armature en "mm" | 60 |
| Av : l'aire de la section transversale en "mm ² " | 100 |
| caractéristique du PRF | |
| d _{prf} : la hauteur effective en "mm" | 480 |
| t _{prf} : l'épaisseur de la bande de PRF en "mm" | 0,508 |
| S _{PRF} : l'espacement de bandes de PRF axe à axe en "mm" | 450 |
| largeur de bandes de PRF en "mm" | 300 |
| E _{prf} : le module élastique de PRF en "Mpa" | 24591 |
| Ø _{prf} : le coefficient de tenue de PRF | 0,75 |
| ξ _{prfu} : la déformation effective de PRF | 0,0193 |
| ξ _{prf} : la déformation effective de PRF | 0,0145 |
| ξ _{prfe} : la déformation effective de PRF | 0,004 |
| Calcul | |
| V _c : la résistance attribuée du béton en "KN" | 107,46 |
| V _s : la résistance attribuée de l'acier en "KN" | 45,9 |
| V _r : la résistance au cisaillement de la poutre en "KN" | 153,36 |
| V _f : la résistance à l'effort tranchant pondéré en "KN" | 264,7 |
| V _{prf} : la valeur nécessaire de la résistance du PRF en "KN" | 111,31 |
| A _{prf} : l'aire nécessaire de section transversale de PRF en "mm ² " | 1414,6 |
| N1: le nombre des couches de bandes | 5 |
| A _{prf} : l'aire de la section transversale de PRF en "mm ² " | 1524 |
| V _{prf} : la résistance attribuée en PRF en "KN" | 119,92 |
| V _g : la résistance au cisaillement de la poutre renforcé en "KN" | 273,28 |
| La vérification entre V _f et V _g | ok |

3 - Espacement de renfort de PRF $S_{PRF} = 600\text{mm}$ axe à axeTableau III-10 : représente les valeurs de résistance V_f et V_g . avec $S_{PRF} = 600\text{mm}$

| | |
|---|--------|
| Sika-Wrape : HEX430G | |
| Les Données | |
| Géométrie de la section | |
| H : l'hauteur de la poutre en "mm" | 600 |
| b_{eff} : largeur effective de la table en "mm" | 3130 |
| b_w : largeur de l'âme en "mm" | 250 |
| d : la distance entre la face extrême de compression et le centroïde des armatures en acier en "mm" | 540 |
| d_v : la hauteur effective de cisaillement des étriers en "mm" | 486 |
| h_f : la hauteur de la table en "mm" | 120 |
| B : largeur tribulaire en "mm" | 4000 |
| L : la longueur en "mm" | 12000 |
| c : enrobage en "mm" | 30 |
| γ : La masse volumique du béton en "KN/m ³ " | 24 |
| Q : La charge vive en "kN/m ² " | 5 |
| W_D : la charge permanente en "KN/m" | 14,4 |
| W_L : la charge d'exploitation en "KN/m" | 20 |
| caractéristique du béton | |
| type du béton | Normal |
| λ : introduit pour tenir compte de la masse volumique du béton | 1 |
| ϕ_c : le coefficient de tenue du béton | 0,6 |
| f'_c : la résistance spécifiée en compression du béton en "Mpa" | 44 |
| F_{cr} : la résistance à la fissuration du béton en "Mpa" | 2,65 |
| caractéristique d'acier | |
| ϕ_s : le coefficient de tenue de l'acier | 0,85 |
| F_y : la contrainte à la limite élastique spécifiée en "Mpa" | 400 |
| s : l'espacement étriers en acier placés perpendiculairement à l'axe des éléments en "mm" | 400 |

| | |
|---|---------|
| N : nombre des lignes des barres d'armature | 2 |
| g : L'enter-axe des lignes des barres d'armature en "mm" | 60 |
| Av : l'aire de la section transversale en "mm ² " | 100 |
| caractéristique du PRF | |
| d _{prf} : la hauteur effective en "mm" | 480 |
| t _{prf} : l'épaisseur de la bande de PRF en "mm" | 0,508 |
| S _{PRF} : l'espacement de bandes de PRF axe à axe en "mm" | 600 |
| largeur de bandes de PRF en "mm" | 300 |
| E _{prf} : le module élastique de PRF en "Mpa" | 24591 |
| Ø _{prf} : le coefficient de tenue de PRF | 0,75 |
| ξ _{prfu} : la déformation effective de PRF | 0,0193 |
| ξ _{prf} : la déformation effective de PRF | 0,0145 |
| ξ _{prfe} : la déformation effective de PRF | 0,004 |
| Calcul | |
| V _c : la résistance attribuée du béton en "KN" | 107,46 |
| V _s : la résistance attribuée de l'acier en "KN" | 45,9 |
| V _r : la résistance au cisaillement de la poutre en "KN" | 153,36 |
| V _f : la résistance à l'effort tranchant pondéré en "KN" | 264,7 |
| V _{prf} : la valeur nécessaire de la résistance du PRF en "KN" | 111,31 |
| A _{prf} : l'aire nécessaire de section transversale de PRF en "mm ² " | 1886,08 |
| N1: le nombre des couches de bandes | 7 |
| A _{prf} : l'aire de la section transversale de PRF en "mm ² " | 2133,6 |
| V _{prf} : la résistance attribuée en PRF en "KN" | 125,92 |
| V _g : la résistance au cisaillement de la poutre renforcé en "KN" | 279,28 |
| La vérification entre V _f et V _g | Ok |