

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

***Ecole Nationale Polytechnique***

*Département : Génie civil*



المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات  
Ecole Nationale Polytechnique

Projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'état

En Génie Civil

*Thème :*

***ÉLABORATION D'UN PROGRAMME  
DE CALCUL D'UN TABLIER DE  
PONT À POUTRES EN BÉTON  
ARMÉ RENFORCÉ PAR  
MATÉRIAUX COMPOSITES***

**Proposé et dirigé par :**

*Dr.R. KETTAB*

*Mr. M.ABDESSEMED*

**Présenté par :**

*KHELFAOUI.R BASSAID*

*DABOUZ BACHIR*

*Promotion Juin 2010*

***ENP : 10 Avenue Hassen Badi, El Harrach, Alger***

## ملخص :

المنشأ الفني معرض طوال مدة استعماله إلى اضطرابات وظيفية أو مظهرية مما يتطلب إعادة تأهيله . في كثير من الأحيان يعتبر التدخل نافعا من أجل تحسين خدماته. و من بين تقنيات إعادة التأهيل تلك التي تسمى إلصاق المواد المركبة المصنوعة من ألياف الكربون التي برهنت بفضل بساطتها و فعاليتها و المواد المستعملة بمقاومتها العالية للشد، و الجيدة للتأكسد. يهدف هذا العمل إلى إنشاء برنامج رقمي بلغة فورتران من أجل حساب سطح جسر متوازن ذو روافد خراسانية مدعم بألياف الكربون . هذا البرنامج سيسمح لنا برقمنة كل خطوات الحسابات من حيث :

- حساب خصائص الجسر
  - حساب الأحمال الدائمة و أحمال الاستغلال
  - التوزيع الطولي و العرضي للقوى و العزوم
  - حساب مقاطع TFC اللازمة للتدعيم .
- الكلمات المفتاحية :** التقوية ، المركبة ، ألياف الكربون ، فورتران ، جسر

## Abstract:

A structure is likely to undergo along its lifespan, of the dice working orders or D ' aspect, which will require, thereafter its rehabilitation. It is by time useful to intervene to improve its state of service, its characteristic or its aspect. Among the techniques of recess that called joining of carbon fiber composites which showed its effectiveness thanks to its simplicity of implementation, and materials used by their tensile strength high and their good corrosion resistance. The goal of this project is to work out a program in language FORTRAN for the calculation of a bridge deck with isostatic reinforced concrete beams reinforced by composite a material which is in our case the carbon fiber fabric (TFC).

This calculation programme will enable us to automate all the stages of calculation such as:

- Characteristics of a bridge;
- Continued loads and overloads of exploitation;
- The distribution of longitudinal and transverse (method of J.Courbon) of the efforts;
- The calculation and checking of the constraints and finally
- Calcul of the sections with the TFC necessary for the reinforcement.

**Key Words:** reinforcement, composites, charbon fibres, FORTRAN, bridge

## Résumé :

Un ouvrage d'art, est susceptible de subir le long de sa durée de vie, des désordres de fonctionnement ou d'aspect, ce qui nécessitera, par la suite sa réhabilitation. Il est par fois utile d'intervenir pour améliorer son état de service, ses caractéristiques ou son aspect. Parmi les techniques de renforcement celle appelé collage de composites de fibres de carbone qui a montré son efficacité grâce à sa simplicité de mise en œuvre, et les matériaux utilisés par leur résistance à la traction élevée et leur bonne résistance à la corrosion. Le but de ce projet de fin d'étude est d'élaborer un programme en langage fortran pour le calcul d'un tablier de pont à poutres en béton armé isostatique renforcé par matériaux composites qui est dans notre cas le tissu de fibres de carbone (TFC).

Ce programme de calcul va nous permettre d'automatiser toutes les étapes de calcul tel que :

- Les caractéristiques d'un pont ;
- Les charges permanentes et surcharges d'exploitation ;
- La répartition des longitudinale et transversale (méthode de J.Courbon) des efforts ;
- Le calcul et vérification des contraintes et enfin
- Le calcul des sections avec le TFC nécessaire pour le renforcement.

**Mots clés :** renforcement, composites, fibres de carbone, Fortran, pont

## *Remerciements :*

*Au terme de cette étude, nous tenons tout d'abord*

*À remercier Dieu tout puissant pour nous avoir donné la force, la santé, la patience, les moyens et l'aide afin que nous puissions accomplir ce modeste travail.*

*Nous exprimons notre gratitude à nos promoteurs Madame R.KETTAB et Monsieur M. ABDESSEMED qui nous ont proposé le thème de notre projet de fin d'études, avoir éclairé notre chemin, et ont mis à notre disposition leurs compétences et leurs conseils constructifs afin de mener ce projet à bon terme.*

*Nous vifs remerciements s'adressent au président de jury et aux membres du jury, qui nous honorent de leur présence en acceptant d'examiner ce travail.*

*Que tous ceux qui nous ont aidés trouvent ici nos plus profonds remerciements.*

*Enfin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance et nos respects à tous les enseignants de l'ENP qui ont contribué à notre formation.*

## *Dédicace*

*A ma fierté mon père qui a été toujours présent pour moi par son soutien et ses encouragements.*

*A la source de ma vie, la meilleure des mères, ma mère qui m'a appris l'éducation avant le savoir et qui n'a pas cessé de me soutenir durant toutes mes études.*

*Que ce travail soit pour eux le symbole de ma reconnaissance pour leur amour qu'ils m'ont apporté durant toute ma vie et qui ont porté un grand intérêt à mes études.*

*A mes promoteurs Mr Mouloud Abdessemed et Madame Ratiba KETTAB et mes enseignants depuis le primaire*

*A mon frère Bachir et sa famille*

*A mes grands parents*

*A mes chers frères et sœurs*

*A toute ma grande famille sans exception*

*A tous ceux qui m'aiment*

*Je dédie ce modeste travail*

*Saïd*

# *Dédicaces*

*J*e dédie ce travail...

*À la personne qui m'a indiqué la bonne voie en me rappelant que la volonté fait toujours les grands hommes ...*

*À mes parents qui ont attendu avec patience les fruits de leur bonne éducation...*

*À mon frère et mes sœurs en les félicitant tous pour leur réussite cette année à leurs examens de BAC, BEM et fin de cycle primaire  
Vous êtes ce que j'ai de plus cher au monde...ma famille !*

*À tous mes chers amis*

*À mes promoteurs Mr Mouloud ABDESSEMED et Mme Ratiba KETTAB et tous mes enseignants*

*À toi Said mon cher ami ainsi qu'à toute ta famille*

*A tous ceux que je n'ai pu citer dans ce minuscule espace...!*

*Bachir*

# Table des matières

## INTRODUCTION GENERALE

1 Introduction.....	I
---------------------	---

## CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Introduction.....	1
I.2 Définition des matériaux composites.....	1
I.3 Composition et caractéristiques des matériaux composites.....	2
I.4 Classification des matériaux composites.....	4
I.5 Quelques avantages et inconvénients des matériaux composites.....	4
I.6 Différents types de fibres.....	5
I.7 Fibres de carbone.....	7
I.7.1 Généralités .....	7
I.7.2 Composites à fibres de carbone.....	8
I.8 Composites dans le génie civil.....	9
I.8.1 Historique des composites.....	9
I.8.2 Quelques exemples d'applications.....	9
I.8.3 Utilisation dans différents pays .....	11
I.9 Conclusion .....	17

## CHAPITRE II: Pathologies, réparation et renforcement des ouvrages

II.1 Introduction .....	18
II.2 Principales causes de dégradation.....	18
II.2.1 Causes physiques de dégradation.....	18
II.2.2 Causes chimiques de dégradation.....	19
II.2.3 Autres causes de dégradation des bétons.....	21
II.3 Principales méthodes de réparation ou de renforcement des ponts en béton armé.....	22
II.3.1 Introduction.....	22
II.3.2 Béton projeté .....	22
II.3.3 tôles collées.....	23
II.3.4 Adjonction d'armatures complémentaires.....	24
II.3.5 Précontrainte additionnelle.....	25
II.4 Réparation et/ou renforcement des ponts par matériaux composites à fibres de carbone.....	25
II.4.1 Pour quoi renforcé par fibres de carbone ?.....	26
II.4.2 Techniques de renforcement.....	27
II.4.3 Application du composite TFC.....	29
II.4.3.1 Définition de procédé TFC.....	29
II.4.3.2 Domaine d'application.....	29
II.4.3.3 Résine de la matrice du composite TFC .....	30
II.4.3.4 Préparation des supports en béton .....	31
II.4.3.5 Application du TFC .....	31
II.5 Conclusion .....	34

## CHAPITRE III : CALCUL ANALYTIQUE D'UN TABLIER DE PONT A POUTRES ISOSTATIQUE

III.1 Introduction.....	35
III.2 Caractéristiques d'un pont à poutres.....	35
III.3 Cas d'étude .....	36
III.3.1 Présentation descriptive de l'ouvrage.....	36

III.3.2 Calcul des charges permanentes (CP).....	36
III.3.3 Calcul des charges permanentes complémentaires (CCP).....	37
III.3.4 Les caractéristiques du pont à étudié.....	37
III.3.5 calcul des surcharges d'exploitation.....	38
III.3.5.1 Système de charges A.....	38
III.3.5.2 Système de charge B .....	40
III.3.5.3 Convois militaires .....	42
III.3.5.4 Charges exceptionnelles.....	43
III.3.5.5 Surcharges sur trottoirs .....	44
III.3.6 Répartition longitudinale des moments.....	44
III.3.6.1 Moments fléchissants dus au poids propre du tablier.....	44
III.3.6.2 Moments fléchissants dus aux surcharges d'exploitation.....	45
III.3.7 Répartition transversale des moments.....	48
III.3.8 Etude d'une poutre du tablier réparée par TFC.....	50
III.3.8.1 Condition de conception et de calcul.....	50
III.3.8.2 Condition de mise en œuvre .....	51
III.3.8.3 Dimensionnement dans le cas du béton armé .....	52
III.3.8.4 Calcul du TFC .....	57
III.4 Conclusion.....	58

#### **CHAPITRE IV : PROGRAMMATION NUMERIQUE**

IV.1 Introduction .....	59
IV.2 Généralités.....	59
IV.2.1 Présentation du langage FORTRAN .....	59
IV-2-2 Structure d'un programme.....	59
IV-3 Organigramme de calcul.....	61
IV-4 Etapes de programmation pour l'élaboration du programme de calcul .....	74
IV-5 Cas d'étude.....	79
IV-3 Conclusion.....	95

#### **CONCLUSION GENERALE**

Références bibliographiques

Annexes

# LISTE DES FIGURES

N°	<i>Titre de la figure</i>	Page
<b>Figure 1-1</b>	<i>Matériaux composites, renfort et matrice.....</i>	1
<b>Figure 1-2</b>	<i>Arborescence des matériaux de synthèse.....</i>	2
<b>Figure 1-3</b>	<i>Principaux matériaux de renfort.....</i>	2
<b>Figure 1-4</b>	<i>Principales familles de matrices .....</i>	3
<b>Figure 1-5</b>	<i>Courbes contrainte-déformation de différentes fibres.....</i>	5
<b>Figure 1-6</b>	<i>Etapes de Production des fibres de carbone .....</i>	8
<b>Figure 1-7</b>	<i>Passerelle d'Aberfeldy, Écosse.....</i>	14
<b>Figure 2-1</b>	<i>Affouillement du pont (oued Dj dai à Biskra).....</i>	19
<b>Figure 2-2</b>	<i>Corrosions des armatures d'un tablier de pont.....</i>	20
<b>Figure 2-3</b>	<i>Carbonatation naturelle du béton.....</i>	20
<b>Figure 2-4</b>	<i>Dégradation du pont oued Djedi –Biskra.....</i>	20
<b>Figure 2-5</b>	<i>Technique de projection du béton.....</i>	21
<b>Figure 2-6</b>	<i>Réparation des poutres par béton projeté.....</i>	21
<b>Figure 2-7</b>	<i>Renforcement d'un pont tôles colées sur l'autoroute A6 près de Toutry..</i>	22
<b>Figure 2-8</b>	<i>Différents types de réparation par précontrainte additionnelle.....</i>	23
<b>Figure 2-9</b>	<i>Piles d'un pont renforcées par composites à fibres de carbone.....</i>	24
<b>Figure 2-10</b>	<i>Tissu de fibre de carbone.....</i>	25
<b>Figure 2-11</b>	<i>Renforcement des poteaux par T.F.C.....</i>	25
<b>Figure 2-12</b>	<i>Découpage de TFC (suivant la note de calcul).....</i>	29
<b>Figure 2-13</b>	<i>Différentes étapes d'application de TFC.....</i>	29
<b>Figure 3-1</b>	<i>Disposition du chargement Bc selon le fascicule 61 titre II.....</i>	30
<b>Figure 3-2</b>	<i>Disposition du chargement Bt selon le fascicule 61 titre II .....</i>	32
<b>Figure 3-3</b>	<i>Disposition du système MC120 selon le fascicule 61 titre II .....</i>	33
<b>Figure 3-4</b>	<i>Disposition du Convoi D240 selon le fascicule 61 titre II .....</i>	40

<b>Figure 3-5</b> Répartition longitudinale de la surcharge A .....	41
<b>Figure 3-6</b> Répartition longitudinale de la surcharge BC (1er cas).....	43
<b>Figure 3-7</b> Répartition longitudinale de la surcharge BC (2eme cas) .....	44
<b>Figure 3-8</b> Répartition longitudinale de la surcharge MC120.....	45
<b>Figure 3-9</b> Répartition de surcharge D240.....	46
<b>Figure 3-10</b> Loi de comportement du TFC.....	47
<b>Figure 3-11</b> Adhérences TFC –béton .....	47

# LISTE DES TABLEAUX

N°	Titre du tableau	Page
<b>Tableau 1-1</b>	<i>Avantages et inconvénients des matériaux composites</i>	4
<b>Tableau 1-2</b>	<i>Caractéristiques mécaniques de différentes fibres en fonction de leur type</i>	5
<b>Tableau 1-3</b>	<i>Constituants de la fibre de verre</i>	6
<b>Tableau 2-1</b>	<i>Principales caractéristiques des fibres</i>	26
<b>Tableau 3-1</b>	<i>Classes des ponts en fonction de la largeur roulable</i>	38
<b>Tableau 3-2</b>	<i>Valeurs de coefficient <math>a_1</math></i>	39
<b>Tableau 3-3</b>	<i>Valeurs de la surcharge A</i>	41
<b>Tableau 3-4</b>	<i>Valeurs du coefficient <math>bc</math></i>	42
<b>Tableau 3-5</b>	<i>Valeurs de la surcharge <math>B_t</math></i>	44
<b>Tableau 3-6</b>	<i>Valeurs du moment fléchissant du au poids propre dans différentes sections</i>	
<b>Tableau 3-7</b>	<i>Tableau récapitulatif représente les différentes valeurs des Coefficients <math>r_{kj}</math> dans chaque poutre</i>	45
<b>Tableau 3-8</b>	<i>Tableau récapitulatif représente les différentes valeurs des moments dans chaque poutre</i>	46

# *Introduction générale*

# INTRODUCTION GENERALE

L'informatique est une science récente, elle couvre à l'heure actuelle toutes les activités humaines.

Les sciences de l'informatique sont d'un grand apport à la recherche scientifique, grâce notamment à la rapidité d'accès et de traitement de l'information.

L'ordinateur n'est qu'un outil, il n'est doué ni d'intelligence, ni d'imagination, il est seulement capable d'exécuter « aveuglément » une série d'ordres donnés par l'ingénieur, lequel intervient en tant que constructeur et/ou utilisateur.

Un ingénieur en génie civil est souvent confronté à des calculs longs et fastidieux, il ne cernerait la solution optimale qu'après plusieurs itérations, il s'attarde donc sur des calculs qui s'avèrent parfois divergents. Avec l'informatique tous ces calculs sont effectués avec rapidité et précision, ce qui a pour effet un gain de temps considérable pour l'ingénieur et pour les entreprises. De plus il existe actuellement des programmes de plus en plus sophistiqués qui offrent d'importantes possibilités pour l'étude et /ou calcul d'un ouvrage quelconque.

Les ouvrages en béton armé peuvent être endommagés durant leur vie par vieillissement des matériaux ou par modification des conditions d'exploitation. Plusieurs facteurs font qu'il est parfois nécessaire de les renforcer ou de les réparer.

Le parc algérien est composé d'un nombre important d'anciens ouvrages d'art présentant des problèmes plus ou moins sévères nécessitant réhabilitation ou renforcement. Plus de 40 % de ces ouvrages ont plus de 40 ans et nécessitent par conséquent des réparations à court et moyen termes.

Le renforcement de ces ouvrages nécessite un savoir faire et un bon choix de la méthode de réhabilitation. Parmi les méthodes de renforcement existantes, nous avons choisi pour notre étude de cas celle appelée collage de matériaux composites par fibres de carbone (TFC).

Nous avons élaboré un programme de calcul en langage Fortran d'un tablier de pont à poutre isostatique en béton armé renforcé par TFC.

Notre travail s'articule autour de deux parties.

La première concerne une synthèse bibliographique sur l'état de l'art des matériaux composites et leur utilisation en génie civil en énumérant les différentes pathologies et leurs solutions de réparation et / ou de renforcement.

La seconde consiste à traiter analytiquement un cas de tablier de pont avant et après renforcement.

En second lieu, nous avons élaboré un programme de calcul pour le cas étudié.

# CHAPITRE I :

## *Etude bibliographique*

## I-1-introduction

Le développement de la science des matériaux a permis l'apparition du concept de « composite » et monde de la construction, non étranger à cette évolution, a employé très tôt ces matériaux composites au travers de ses technologies et techniques. Dans le domaine du renforcement et de la réhabilitation, le 'Fibres Reinforced Polymer' (FRP) est le matériau dont l'irruption a été la plus marquée. L'association de fibres (carbone, verre ou aramide) et d'une matrice mère permet d'obtenir de bons résultats en renforcement sans accroissement de poids ni de modifications excessives des éléments originaux.

Ce champ d'application s'élargit de plus en plus dans tous les types de structures comme des poutres et des dalles, où les bandes composites sont collées sur leur surface tendue dans l'espoir de réparer et d'améliorer leur capacité portante en flexion.

Ce chapitre est consacré essentiellement aux matériaux composites et leurs utilisations dans le génie civil. On y rappelle tout d'abord les définitions et les principales caractéristiques des matériaux composites et leurs procédés d'élaboration. Puis on passe également en revue leurs principaux avantages et inconvénients et les différents types de fibres de renforcement tel que la fibre de carbone, matériau auquel on s'intéresse dans notre étude, en citant à la fin des exemples d'utilisation dans des différents pays.

## I-2-Définition des matériaux composites:

Dans le sens large, le mot « composite » signifie « constitué de deux parties différentes ». Un matériau composite est donc un assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles (mais ayant une forte capacité d'adhésion); le nouveau matériau ainsi constitué possède des propriétés que les éléments seuls ne possèdent pas [7]. Dans le domaine du génie civil, les composites unidirectionnels sont les plus courants.

Un **matériau composite** est, aussi défini comme étant, tout alliage ou matière première comportant un renfort sous forme filamenteire. Il nécessite l'association intime d'au moins deux composants : **le renfort** et **la matrice**, qui doivent être compatibles entre eux et se solidariser, ce qui introduit la notion d'un agent de liaison, **l'interface**.

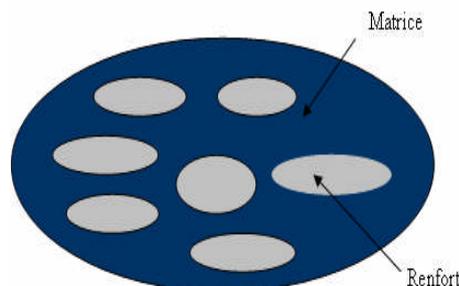


Figure 1-1 Matériaux composites, renfort et matrice.

### I-3-Composition et caractéristiques des matériaux composites

Contrairement aux matières premières classiques dont on connaît à l'avance les caractéristiques mécaniques, celles des composites ne sont réellement connues qu'après fabrication, car on réalise, en même temps, le matériau et le produit. Actuellement, les composites à matrice organique représentent plus de 99% des matériaux composites ; toutefois, il existe également des composites à matrice inorganique (métallique ou céramique) dont la diffusion reste encore marginale.

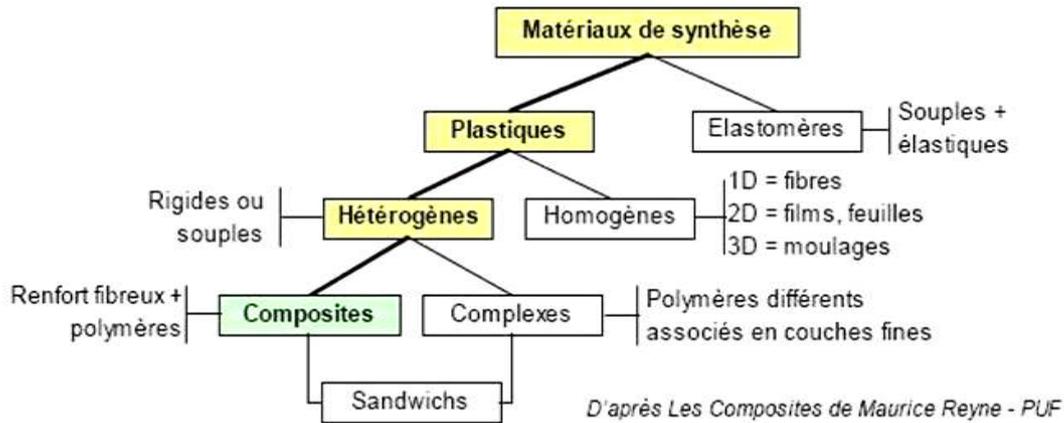


Figure 1-2 Arborescence des matériaux de synthèse

Le comportement mécanique des matériaux composites dépend de plusieurs facteurs : type de fibres, fraction volumique de fibres et type de matrice.

**Le renfort** : Armature ou squelette, assure la tenue mécanique telle que la résistance à la traction et la rigidité, et se présente sous forme filamentaire, allant de la particule de forme allongée à la fibre continue qui donne au matériau un effet directif. Les renforts sont caractérisés par :

- ◆ Leurs architectures, (Unidirectionnel (UD) ou Tissu...)
- ◆ La nature de la fibre (organique ou inorganique)

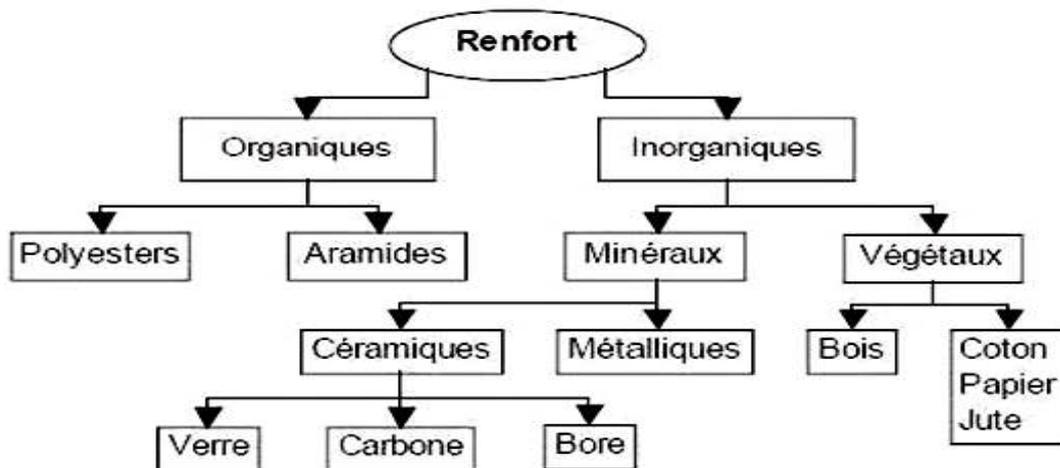


Figure 1-3 Principaux matériaux de renfort

**Les résines** dans le matériau composite ont pour rôle de transférer les sollicitations mécaniques aux fibres et de les protéger de l'environnement extérieur. Elles doivent être assez déformables et présenter une bonne compatibilité avec les fibres.

Parmi ces familles de résines, on distingue deux types de résines qui sont, actuellement, les plus utilisées:

- **Les résines thermodurcissables (TD)** qui sont, en général, associées avec des fibres longues. Les polymères thermodurcissables ont la forme d'un réseau tridimensionnel ; au cours de la polymérisation, ce réseau se pont (double liaison de polymérisation) et durcit de façon définitive lors du chauffage selon la forme souhaitée. La transformation est irréversible.

- **Les résines thermoplastiques (TP)**, Renforcées avec des fibres courtes (et parfois, avec des fibres longues) se développent fortement. Les polymères thermoplastiques ont une structure linéaire ; ils sont mis en forme par chauffage (les chaînes se plient), et durcissent au cours du refroidissement (les chaînes se bloquent). La transformation est réversible.

**La matrice** : est l'élément composé d'une résine (polyester, vinylester, etc) et de charges dont le but principal est de lier les fibres renforcés, répartir les contraintes subies, apporter la tenue chimique de la structure et donner la forme désirée au produit.

On peut classer les matrices en trois familles :

- Organiques (thermodurcissables, thermoplastiques)
- Réfractaires (céramiques, verre, carbone)
- Métalliques

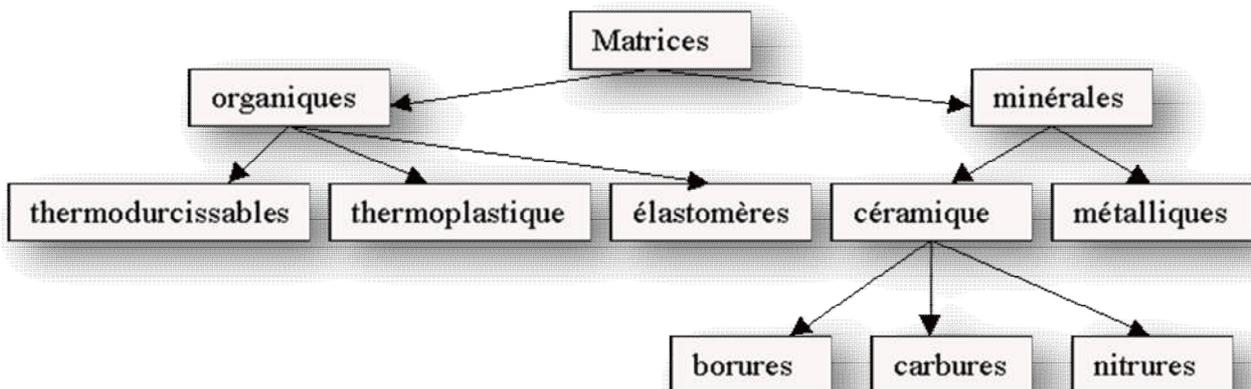


Figure 1-4 Principales familles de matrices

### I-4-Classification des matériaux composites :

Les matériaux composites peuvent être classés en trois manières différentes :

#### 1) Classification suivant la forme des constituants :

- Composites à fibres.
- Composites à particules.

#### 2) Classification suivant la nature des constituants :

- Composites à matrice organique.
- Composites à matrice minérale.
- Composites à matrice métallique.

#### 3) Classification suivant le domaine d'application :

- Matériau de grande diffusion(GD)
- Matériau à hautes performances(HP) : présentant des propriétés mécaniques spécifiques élevées et un coût unitaire important. On distingue :
  - ✓ les matériaux ablatifs ou thermo dégradables.
  - ✓ les matériaux structuraux.
  - ✓ les matériaux thermo structuraux.

### 1-5-Quelques avantages et inconvénients des matériaux composites :

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Bonne résistance et rigidité spécifique élevée.</li> <li>◆ Légèreté.</li> <li>◆ Très bonne résistance à la fatigue.</li> <li>◆ Inerte de point de vue chimique.</li> <li>◆ Rapport résistance /poids très élevé.</li> <li>◆ Possibilité de comportement matériel particulier.</li> <li>◆ Bonne tenue au feu.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Pas de plastification.</li> <li>◆ Vieillessement sous humidité et chaleur moyen.</li> <li>◆ Manque de ductilité.</li> <li>◆ Absence de norme de conception et de calcul.</li> </ul>

Tableau 1-1 avantages et inconvénients des matériaux composites.

### I-6-Différents types de fibres:

Une fibre est constituée de plusieurs filaments élémentaires dont les diamètres varient entre 5  $\mu\text{m}$  et 25  $\mu\text{m}$ . La fibre a un comportement élastique linéaire jusqu'à rupture : les lois de comportement des fibres sont donc de type "élastique fragile".

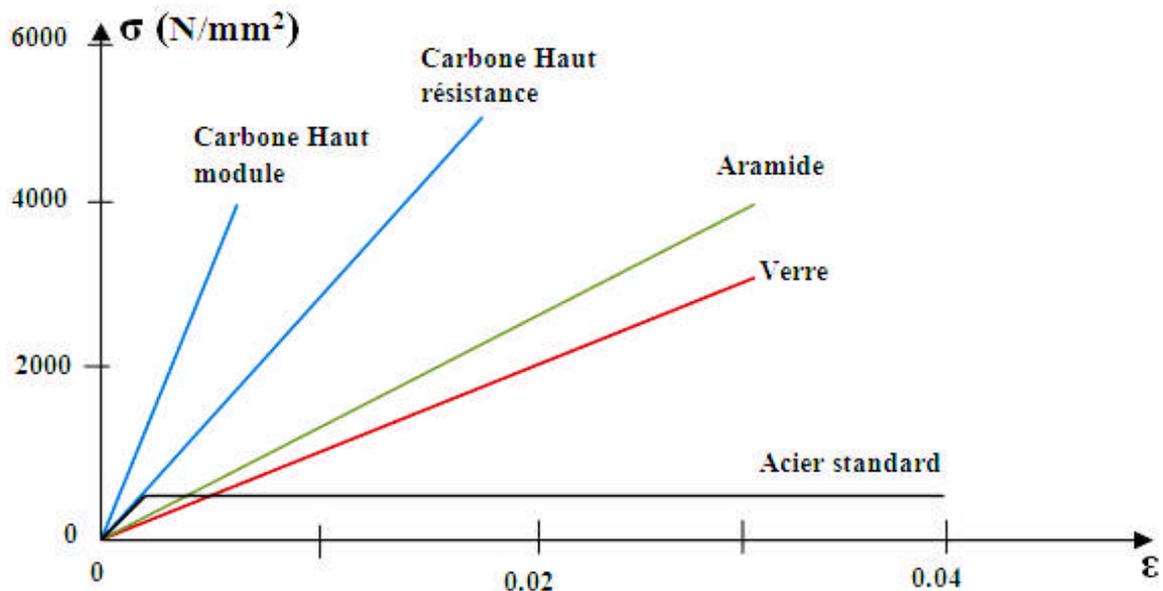


Figure 1-5 Courbes contrainte-déformation de différentes fibres

En général, dans une structure composite (anisotrope), les fibres travaillent bien en traction mais, en comparaison avec les structures métalliques (isotropes), les performances en compression sont moins bonnes et la résistance au cisaillement demeure faible.

Les propriétés des composites sont influencées par le choix des fibres (tableau 1-1). Parmi les fibres les plus connues en génie civil, on peut citer : les fibres d'aramide, les fibres de verre et les fibres de carbone

Matériau	Module élastique (kN.mm <sup>-2</sup> )	Résistance à la rupture (N.mm <sup>-2</sup> )	Déformation à la rupture (%)
<b>Carbone</b>			
Haute résistance	215 – 235	3500 – 4800	1,4 – 2,0
Ultra haute résistance	215 – 235	3500 – 6000	1,5 – 2,3
Haut module	350 – 500	2500 – 3100	0,5 – 0,9
Ultra haut module	500 – 700	2100 – 2400	0,2 – 0,4
<b>Verre</b>			
E	70 – 75	1900 – 3000	3,0 – 4,5
AS	70 – 75	1900 – 3000	3,0 – 4,5
R	85 – 90	3500 – 4800	4,5 – 5,5
<b>Aramide</b>			
Faible module	70 – 80	3500 - 4100	4,3 – 5,0
Haut module	115 - 130	3500 - 4100	2,5 – 3,5

Tableau 1-2 Caractéristiques mécaniques de différentes fibres en fonction de leur type [8]

La fibre de verre est généralement réalisée à partir de silice ( $\text{SiO}_2$ ), dont les sources sont abondantes ; par mélanges d'additifs on produit trois types de verre utilisables dans les composites. [8]

Principaux constituants (%)	Type de verre		
	E	D	R
Silice ( $\text{SiO}_2$ )	53-54	73-74	60
Alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	14-15	—	25
Chaux ( $\text{CaO}$ )	20-24	0.5-0.6	09
Magnésie ( $\text{MgO}$ )	20-24	0.5-0.6	06
Oxyde de bore ( $\text{B}_2\text{O}_3$ )	06-09	22-23	—

Tableau 1-3 Constituants de la fibre de verre [8]

Elle présente une plus faible résistance mécanique mais une plus grande déformabilité, ce qui la rend attrayante pour certaines utilisations. Le plus grand inconvénient de cette fibre reste sa dégradation par des phases alcalines si elle n'est pas correctement protégée. [8]

La fibre d'aramide a une structure anisotrope, elle est issue de la chimie organique des polyamides aromatiques (ou polyaramide) par synthèse chimique à basse température. Les composites renforcés de fibres d'aramide offrent une bonne stabilité en température (jusqu'à  $200^\circ\text{C}$  en fonction de la matrice), mais souffrent :

- D'une adhérence moyenne entre matrice et fibre
- D'un prix encore trop élevé.

Fibres de polyéthylène de haut module présentent une très bonne résistance à la traction mais une mauvaise mouillabilité. Pour des structures peu sollicitées, on peut encore utiliser des fibres synthétiques courantes de polyamide ou polyester [3].

Les fibres minérales artificielles siliceuses, cette fibres constituent de manière générale une grande famille subdivisée en une multitude de sous familles selon leur nature physico-chimique et leur origine. Elles sont utilisées principalement pour contrôler les pertes de chaleur, absorber l'énergie acoustique, filtrer les impuretés dans les gaz et les liquides, renforcer d'autres matériaux ou contrôler la condensation [11].

Selon leurs caractéristiques physicochimiques, on distingue plusieurs types de FMA [11]:

- ◆ les fibres céramiques réfractaires (FCR) ;
- ◆ les fibres de verre à usage spécial ;
- ◆ les filaments continus de verre ;

Les **fibres de carbone** peuvent être obtenues à partir du brut de pétrole ou de charbon, ou bien de manière synthétique au moyen de polyacrylonitrile. Ces dernières possèdent de meilleures caractéristiques mécaniques que les précédentes.

## **I-7- la fibre de carbone :**

### **I-7-1-Généralités :**

Le **carbone** est le sixième élément de Mendeleïev et la liaison carbone-carbone est la plus forte dans la nature (4000 KJ /mol). Il existe deux types de fibres de carbone, celles à haute résistance (HR) issues d'une mise en œuvre par carbonisation, et celles à haut module (HM) issues d'une fabrication par graphitisation. [5]

L'intérêt des utilisations de la fibre de carbone dans le génie civil se trouve essentiellement dans :

- Sa faible densité.
- Ses propriétés mécaniques (Rt, Rc, E) excellentes.
- L'absence de corrosion.
- Sa très bonne tenue à la fatigue.
- Sa facilité de manipulation.

Certaines propriétés peuvent être intéressantes pour des applications plus spécifiques :

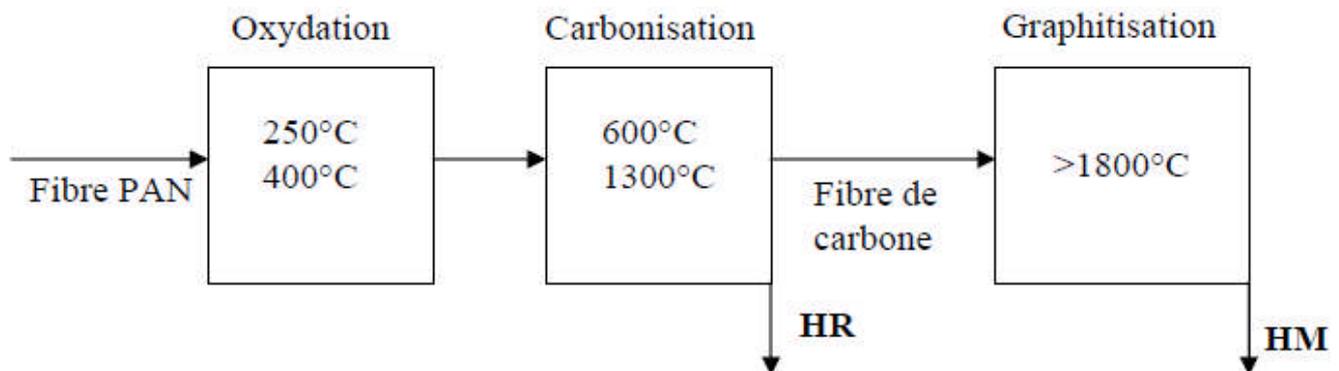
- Matériau non-magnétique.
- Transparence aux radars.
- Haute résistance diélectrique.

Les principaux inconvénients sont :

- Une anisotropie très marquée.
- Un comportement à la rupture de type fragile des composites
- Un prix de matière élevé comparé à celui de l'acier.

La fabrication des fibres de carbone fait appel à une technologie très délicate dont le processus est décrit succinctement ci-dessous: [4]

- Fabrication de précurseur.
- Etirage (orientation).
- Oxydation (220°C) dans l'air sous tension.
- Carbonisation à 1500°C sous atmosphère inerte pour les fibres de carbone à haute résistance.
- Graphitisation à 3000°C sous atmosphère inerte pour les fibres de carbone à haut module.



**Figure 1-6 Etapes de Production des fibres de carbone**

Les Caractéristiques des fibres de carbone sont les suivantes:

Les fibres issues de la carbonisation: [5]

- Pureté : 97 à 98 % de carbone.
- Masse volumique : 1800 kg/m<sup>3</sup>.
- Résistance en traction : 3000 à 5000 MPa.
- Module en traction : environ 250 GPa.

Les fibres issues de la graphitisation: [5]

- Pureté : 99 % de carbone.
- Masse volumique : 2100 à 2200 kg/m<sup>3</sup>.
- Résistance en traction : 2500 à 3000 MPa.
- Module en traction : environ 500 GPa.

Les fibres de carbone ont une très bonne tenue thermique et un très faible coefficient de dilatation ( $-0.7 \cdot 10^{-6} \text{ m/C}^\circ$ ). De plus, les fibres de carbone sont inertes à température ambiante et vis-à-vis de la plupart des agents chimiques [4]. Généralement, les armures textiles utilisées en renforcement sont des armures unidirectionnelles, les fils de trame (fil de liaison) sont uniquement destinés à faciliter le conditionnement et la mise en œuvre en maintenant les fils longitudinaux en position [5].

### **I-7-2-Les composites à fibres de carbone :**

Les fibres de carbone ont un module d'Young en traction de l'ordre de 230GPa, une résistance en traction de 2500 à 5000MPa, et une déformation à la rupture de 0,5 à 2 %.

Un composite composé de fibres de carbone HR et d'une matrice époxy ou vinylester a les caractéristiques mécaniques suivantes :

- ◆ Module d'Young longitudinal en traction: 155 :165GPa
- ◆ Résistance longitudinale en traction: 500 : 3000MPa
- ◆ Déformation à la rupture: 1,2 : 1,3 %.

Les fibres peuvent être orientées dans une seule direction ce qui donne des composites unidirectionnels, ou dans plusieurs directions afin d'optimiser la performance du composite qui sera bi ou multidirectionnel

Dans un composite, les fibres reprennent principalement des efforts dans la direction des fibres [5]. La matrice, quant à elle, transfère les contraintes aux fibres, et les protège.

## **I-8-les composites dans le génie civil :**

### **I-8-1-Historique des composites :**

Les matériaux composites sont employés depuis très longtemps dans le génie civil. Le torchis en est un bel exemple : « terre grasse argileuse malaxée avec de la paille hachée ou du foin, utilisé pour lier les pierres d'un mur ou pour former le hourdis d'une construction en colombage ».

Le béton armé en est un autre, plus récent : les armatures d'acier constituent le renfort du mortier qui joue le rôle de matrice. Par certains côtés, on peut également voir le bois comme un composite naturel formé de fibres ligneuses reliées par de la cellulose.

Cependant, quand on parle de matériaux composites dans le génie civil, on pense aux composites constitués d'une matrice organique renforcée par des fibres qui sont essentiellement de trois types : verre, carbone et aramide, tandis que les matrices sont en général thermodurcissables : polyesters, phénoliques ou époxydes - Les résines thermoplastiques sont certes plus faciles à mettre en forme et à usiner, mais elles sont beaucoup moins résistantes que les thermodurcissables. - La structure de ces composites allie les qualités mécaniques d'un renfort en fibre aux qualités ductiles d'une matrice polymère. Celle-ci ayant des propriétés mécaniques beaucoup plus faibles que celles du renfort, son rôle est d'assurer la cohésion du matériau dans son ensemble et le transfert par cisaillement des contraintes aux fibres. [1], [5], [2]

### **I-8-2-quelques exemples d'applications :**

La recherche dans le domaine de réhabilitation s'est orientée vers l'utilisation de nouveaux matériaux capables de répondre aux différents critères exigés par les opérations de la maintenance des ouvrages. Plusieurs raisons ont permis aux matériaux composites qui ont restés longtemps limités aux applications militaires et à l'industrie aéronautique, de s'implanter dans le domaine de génie civil [4]. On peut citer parmi ces raisons le développement qu'a connu l'industrie des composites durant les trois dernières décennies et la crise qu'a traversé l'industrie aéronautique depuis le début des années 90 ce qui avait comme conséquence une baisse des prix des composites [4].

Aujourd'hui, dans un calcul du coût du cycle de vie, les éléments en composites peuvent être parfaitement compétitifs par rapport à des éléments en matériaux traditionnels [3]. On trouve ce type de solution dans des environnements particulièrement agressifs, où les matériaux traditionnels se détériorent vite; comme des zones climatiques où les ouvrages subissent plusieurs cycles de gel et dégel et l'emploi de sels dégivrants.

Depuis leurs premières applications en génie civil il y a plus de 20 ans, l'intérêt des composites s'est généralisé sur l'ensemble de la communauté internationale, groupes industriels et laboratoires de recherche, et s'est particulièrement accentuée ces dernières années si l'on juge par l'importance du nombre de publications et colloques internationaux qui traitent quotidiennement de ce sujet [4].

Dans le contexte des structures du génie civil, les matériaux composites les plus utilisés sont essentiellement des arrangements de fibres continues de carbone, voir en fibre de verre pour certaine applications.

#### **A. Pour le renforcement des structures**

##### **◆ Armatures pour béton :**

Pour certains ponts et franchissement en béton sujet à un environnement agressif, une protection de l'armature n'est pas toujours garantie à long terme. Des armatures en composites sont susceptibles d'apporter une solution durable.les domaines d'application pour les armatures en composites sont :

- Les bétons exposés aux sels dégivrants.
- Les ouvrages prés ou dans l'eau de mer.
- Les industries chimiques de tous genres.
- Les applications demandant une basse conductivité électrique ou une neutralité électromagnétique.

Des renforts creux peuvent en plus permettre le passage d'instrumentation et de capteurs dans le cadre de structures intelligentes .en revanche, le module de Young plus bas des armatures en composites limite les applications à des éléments de petite portée [2]. Les résines employées sont thermodurcissables, et par conséquent toutes les mises en forme doivent être faites en usine avant la polymérisation.

Des ponts avec des armatures en composites se trouvent aux USA (29 ouvrages routiers, 01 ouvrage piéton), au Canada (10 routiers, 01 piéton) et au Japon (2routiers ,1piéton). [2]

##### **◆ Renforcement et réparation des structures**

La vie des ouvrages d'art en béton est pleine de péripéties : leurs matériaux vieillissent, se dégradent sous les effets des sels de déverglaçage et des cycles gel-dégel ; etc.

La technique de réparation et /ou renforcement par composites a fait l'objet de nombreuses recherches. Parallèlement, les réalisations concrètes se multiplient en Amérique du Nord, notamment au Canada et au Nord des États-Unis où les sollicitations climatiques sont plus rudes, et au Japon pour augmenter la résistance des ouvrages d'art et des bâtiments les plus stratégiques vis-à-vis du risque sismique. [2]

## **B. Applications structurelles**

### **◆ Ponts et passerelles**

Dans le domaine des ouvrages d'art, les composites sont employés pour trois postes principaux: le haubanage, les poutres principales et le tablier. Au début des années 1990, les composites étaient des matériaux nouveaux, ils suscitaient un engouement important et de nombreux ouvrages expérimentaux avec des haubans en fibres de carbone ont alors vu le jour, en particulier au Japon avec pas moins de onze passerelles et neuf ponts routiers [1]. L'évolution du prix du carbone n'ayant pas été très favorable par la suite, les aciers hauts performances sont restés la solution la plus rentable pour la réalisation des haubans. Seuls les composites verre/résine semblent donc à même de pénétrer le marché du génie civil, notamment grâce aux structures produites par le procédé très économique de pultrusion. [1] Leurs propriétés mécaniques étant plus modestes, ils ont été principalement utilisés pour les poutres et les tabliers. 109 ponts pour piétons et 12 ponts routiers entièrement en composites existent aujourd'hui aux États-Unis, ainsi que 17 en Europe, dont l'un des tout premiers est la passerelle d'Aberfeldy en Ecosse. [2]

La légèreté du matériau rend le transport et la mise en œuvre de ces structures faciles ce qui entraîne une interruption minimale du trafic sur les voies franchies. Le faible coût d'entretien est également un point qui est mis en avant par les entreprises qui proposent ces ponts sur catalogue.

### **I-8-3-Utilisation dans différents pays :**

#### **I-8-3-1 -Au Japon :**

Le Japon est une région qui regroupe plus de 1000 îles. Les tremblements de terre et les activités sismiques, le besoin de matériaux de réparation et de renforcement, la prédominance d'un environnement marin ont conduit à la recherche de solutions innovantes sur terre et dans la récupération des zones habitables de mer.

Depuis plus de 20 ans maintenant, les Japonais ont été les pionniers de l'utilisation de fibres et les polymères composites avancés [9], bien que du point de vue économique, la compétitivité de certains produits peut être inconnue ou douteuse ; chaque application offre un unique avantage en raison des propriétés intrinsèques des matériaux composites.

#### **a) Câbles de précontrainte :**

Après les premiers tests dans les laboratoires des universités spécialisées dans le génie civil, à partir de 1988, des ponts contenant des câbles à base de composites en fibres de carbone furent construits. Si les premiers ponts étaient relativement étroits et à usage piétonnier, petit à petit, avec l'expérience acquise, dès 1990, les Japonais furent capables de construire des ponts de plusieurs kilomètres de long, sous forme d'assemblage d'éléments contenant de plus en plus de câbles de précontrainte en fibres de carbone. En 1977, pour la construction du pont suspendu de Kurushima (longueur totale 1 307 m), 4 haubans de plus de 500m de longueur en fibres de carbone ont été utilisés pour stabiliser la passerelle de montage des câbles de suspension en acier.

Pour les Japonais, ce fut une première étape pour arriver à la construction d'un pont suspendu ou d'un pont à haubans où tous les câbles en acier seraient remplacés par des câbles à base de fibres de carbone [16].

**b) Réhabilitation**

. Dans les trois dernières années, de nombreux ponts en béton précontraint ont dû être renforcés extérieurement en raison de la corrosion des aciers. Ces renforcements ont été appliqués sur les piles ou sur les faces inférieures des tabliers en utilisant des préimprégnés à base de fibres de carbone comme renfort, et suivant le même principe que le procédé L'Hermitte. La mise en place se fait d'après le mode opératoire suivant :

- mise à nu du béton des colonnes (sablage) ;
- Pose d'un primaire (résine époxyde de basse viscosité) ;
- Pose de la première couche époxyde de collage (répéter n fois pour n couches de renforcement).
- Pose de la couche de carbone (fibres ou tissus) (répéter n fois pour n couches de renforcement).
- Application d'une couche de colle de fermeture (résine époxyde).
- Après séchage, application d'un mortier de protection (contre les chocs, le vandalisme ou l'incendie).

Aux phénomènes de corrosion des aciers il faut ajouter que, dès 1996, une des conséquences du dernier séisme meurtrier de Kobe de 1995 déjà évoqué fut l'instauration de normes drastiques imposées dans tous les lieux publics, les zones industrielles et les immeubles d'habitation. La pose de renforcements a démarré en utilisant des tissus imprégnés ou des fibres sèches, principalement par frettage des colonnes portantes. Les tissus sont posés manuellement, alors que les fibres sont déposées par enroulement (retrofitting). Les quantités de fibres de carbone déposées peuvent aller de 100 à plus de 800 g/m<sup>2</sup>. Les principales résines utilisées sont des résines époxyde et ou vinyles ter. La mise en place du renfort se fait en utilisant le même procédé que celui des piles de ponts (cf. précédemment).

**Exemples :** nous pouvons citer les applications suivantes :

- En 1993 : Fujimi Bridge (Tokyo) ;
- En 1994 : Johetsu Shikansen Bridge (Nugata) ; Yonava Bridge et Sanahara Bridge (Yamanashi), Yogaï Bridge (Saitama), Nagashina Hotspring Bridge, (Mie), etc.

À partir de 1995, le nombre des réalisations a fortement augmenté. Les applications se trouvent dans tous les domaines industriels, renforcement extérieur de cheminées, de tunnels routiers, ferroviaires ou de métro, de sites de stockages naturels de pétrole ou de gaz, murs de bâtiments, etc. À noter, dans le domaine de l'innovation dans la construction au Japon, des murs de bâtiments

de banques où les treillis en fibres de carbone sont utilisés non seulement pour leurs propriétés mécaniques mais aussi en tant que conducteur électrique et sont reliés aux systèmes d'alarme. En mars 1998, il faut noter l'arrivée du premier bâtiment dont la structure métallique a été remplacée par une structure à base d'un composite de carbone. La résistance globale de ces structures renforcées permettrait, d'après les résultats des études faites dans les universités japonaises spécialisées, de supporter un séisme de 6 à 7 sur l'échelle de Richter. Nous pouvons citer, à titre d'exemple, le renforcement des piles (de plus de 7m de diamètre) d'un pont autoroutier (Sakawa River Bridge – Tomei Highway), dont certaines dépassaient 60 m de hauteur. Ce chantier se termina en mars 1998, après un an de travail.[16]

Ce programme national de mise en conformité parasismique des bâtiments et des ouvrages d'art fait aujourd'hui du Japon le premier consommateur de fibres de carbone dans les secteurs du bâtiment et des ouvrages d'art. La consommation de fibres de carbone au Japon pour l'ensemble des BTP était supérieure à 300 t en 1996 et à 500 t en 1997.[16]

### **I-8-3-2 -En Europe :**

L'utilisation de matériaux composites polymères pour diverses applications industrielles a connu une croissance continue en Europe au cours des 15 dernières années. Une raison importante pour cela est l'effort de recherche considérable mis en œuvre dans de nombreux pays européens en vertu de l'appui de divers programmes de recherche de l'Union européenne [10], ainsi que de nombreuses universités de la Communauté européenne qu'ont travaillé sur les renforcements à base de matériaux composites.

Les principales applications industrielles de réhabilitation sont apparues en Suisse fin 1991, puis en France à partir de 1996. [3]

**En suisse** sous l'impulsion du Professeur U. Meier, de très nombreuses études de renforcement à base de fibres de verre, d'aramide et de carbone ont été faites, en y incluant des tests de fatigue et de durabilité. La technique développée est basée sur l'utilisation de produits pultrudés comme renforcement externe des ponts en remplacement des plaques d'acier du procédé L'Hermitte. Les fibres de carbone HR de type Torayca T 700SC ont été choisies pour leurs propriétés mécaniques et leur allongement supérieur à 2 %. Par rapport au renforcement en acier, les principaux avantages des pultrudés au carbone sont :

- la facilité de pose ;
- la durabilité, liée à l'absence de corrosion du composite.

Après quelques chantiers d'essais contrôlés directement par l'EMPA en 1992, cette technique fut employée par la société Sika en Suisse dès 1993, puis étendue en Allemagne dès 1995 et en Angleterre en 1996. Fin 1997, plus d'une centaine de ponts ont été renforcés en utilisant ce principe, dont le premier pont anglais, à Dales town of Skipton au nord du Yorkshire, en octobre 1997.

**En France**, sous l'impulsion de la société Soficar, (J.V. Toray/Elf Atochem) et du LCPC (Laboratoire central des Ponts et chaussées), une étude démarra fin 1994, soutenue par le « Plan

génie civil 1995 » du METT (ministère de l'Équipement, du Tourisme et du Transport) et la DRAST (Direction de la recherche et des affaires scientifiques et techniques), d'un système de renforcement à base de tissus secs imprégnés in situ. Freyssinet International, qui connaissait parfaitement le procédé L'Hermite et ses limites, fut très vite partie prenante et devint le chef de file de ce groupe de travail. Ce travail fut effectué avec la collaboration d'Atofindley, de l'École normale supérieure de Cachan, de Porcher Industries et de SGN. Les résultats de cette collaboration ont donné naissance à un produit appelé TFC (tissus de fibres de carbone), marque déposée par Freyssinet International.

D'après une étude technico-économique de Freyssinet International, le coût global de la pose de tissus secs de fibres de carbone est très largement inférieur à celui d'un renforcement à base de plats collés métalliques. En 1996, Freyssinet renforçait le premier pont autoroutier français en remplaçant les plats collés métalliques classiques par des tissus secs et imprégnés sur place par un adhésif spécifique à base de résine époxyde, mis au point par Atofindley, compatible avec le béton et capable d'imprégner les fibres de carbone.

Ce premier travail de renforcement en France a permis au groupement d'être primé et de recevoir le Label IVOR (Innovation validée sur ouvrage de référence), de la part du Plan génie civil du METT/DRAST en octobre 1997 et le premier trophée d'innovation dans la catégorie « Construction et Infrastructures » lors des Journées européennes des composites en avril 1998. Après ce premier succès et dès le printemps 1997, l'application devenait industrielle. Depuis, Freyssinet a renforcé en France et à l'étranger des dizaines de ponts et de bâtiments avec le procédé TFC. Fin 1996, le marché des BTP représentait en Europe un peu plus de 25 t de fibres de carbone et 50 t en 1997. La croissance de ce marché devrait être largement supérieure à 30 % par an pendant les prochaines années [16]



**Figure 1-7 Passerelle d'Aberfeldy, Écosse**

**I-8-3-3 -En Amérique du nord :**

**Aux États-Unis** : Les études américaines ont commencé, en vue de renforcements antisismiques, suite aux conséquences du séisme de Loma Prieta (Californie) d'octobre 1989, qui avait détruit les appuis de trois tabliers de ponts. De nombreuses photos avaient été publiées à l'époque montrant les tabliers écroulés posés les uns sur les autres tel un immense « sandwich ». Depuis, de nombreuses études parasismiques ont été entreprises pour comprendre les phénomènes de mise en résonance des ponts et leur mode de destruction.

Des essais de renforcements à l'aide de tissus préimprégnés, basés sur les méthodes japonaises, ont été développés dans de très nombreuses universités dont l'université de Californie à San Diego. À partir de 1994, des tests sismiques en laboratoire, sur des maquettes de plus en plus grandes, ont démontré l'intérêt de l'utilisation des fibres de carbone. Depuis, des renforcements ont été effectués sur des sites sensibles, comme en Californie, par exemple. Les ouvrages sont généralement renforcés par addition de structures externes en composites à base de fibres de carbone. Ces composites sont obtenus par polymérisation vers 100°C in situ de la matrice des fibres préimprégnées. Aux États-Unis, contrairement au Japon et à l'Europe, les renforcements de colonnes et des piles de ponts se font aussi bien avec des fibres de carbone qu'à l'aide de fibres de verre ou d'aramide. Cependant, pour des raisons de durabilité et de résistance à la fatigue, les fibres de carbone commencent à dominer ce marché naissant.

Enfin, un document qui devrait paraître bientôt sera édité par le comité 440 de l'Institut américain du béton (American Concrete Institute) à l'intention des spécialistes du génie civil. Il sera possible d'y trouver des normes de calcul concernant différentes utilisations de renforcements à base de matériaux composites. Ce document permettra sans doute d'accélérer l'introduction des matériaux composites dans les structures des bâtiments et des ouvrages d'art[26].

**Au Canada**, des études ont été menées pour renforcer extérieurement des ponts anciens corrodés ou ne pouvant supporter l'augmentation des surcharges de calcul. Le procédé L'Hermite devient peu applicable dans ce pays, du fait de la très forte corrosion saline liée aux énormes quantités de sels répandues sur l'ensemble du réseau routier pendant la longue période hivernale. À partir du début des années 1990, de nombreuses universités (Alberta, Laval, Manitoba, Royal Military Collège, Sherbrooke, Queen's, Waterloo, etc.) commencèrent à travailler sur les renforcements et les frettages des piles de ponts et des colonnes de bâtiments. Les matériaux de base principalement utilisés étaient les fibres de verre, d'aramide et de carbone. Les très nombreuses publications laissent présager un futur prometteur aux matériaux composites, mais aujourd'hui les applications en grandeur réelle restent limitées. Nous pouvons cependant en citer quelques-unes qui appartiennent plus au domaine des « chantiers expérimentaux » [16]

- en 1993, renforcement du pont de Calgary (Alberta) par des câbles de 6m de long. L'objet de ce travail était essentiellement de contrôler la durabilité d'un tel renforcement.
- en 1996, réhabilitation du pont Clearwater Creek (Alberta) à partir de bandes de tissus de fibres de carbone préimprégnées.

- en 1996, autoroute A 10 à Saint-Étienne-de-Bolton (Québec), renforcement par l'équipe de recherche de l'université de Sherbrooke de 12 colonnes (sur un total de 18) de pont par des tissus à base de fibres de verre, d'aramide et de carbone, et instrumentation de l'ensemble pour suivi dans le temps.
- en 1996, renforcement des bases des ponts Jacques Cartier et Champlain qui enjambent le Saint-Laurent à Montréal.
- en 1997, renforcement d'un pont âgé de 27 ans à Winnipeg (Manitoba) par pose de tissus de fibres de carbone.
- en 1997, renforcement d'un pont autoroutier, traversant l'Assiniboine River à Headingley (Manitoba) à l'aide de tissus et de câbles en fibres de carbone. Ce pont a été entièrement instrumenté pour être suivi dans le temps.

Dans la plupart de ces chantiers expérimentaux, nous pouvons noter une grande collaboration entre les universités et les groupes industriels. Compte tenu du caractère très innovant de ces réhabilitations, les chantiers ont tous été instrumentés, généralement par fibres optiques, et le suivi en fatigue se fait au niveau national par l'intermédiaire de l'ISIS Canada (Centres of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures). Comme aux États-Unis, une norme de l'Association canadienne de normalisation (ACNOR/CSA) et portant sur l'utilisation des composites dans des applications structurales est en cours de rédaction. Cette norme inclura un chapitre sur l'amélioration du comportement des structures renforcées sous charges sismiques. L'utilisation de fibres de carbone en génie civil représentait aux États-Unis et au Canada environ 30 tonnes en 1996 et un peu moins de 50 tonnes en 1997. La croissance de ce marché devrait être supérieure à 30 %/an pendant les cinq prochaines années [16].

#### **I-8-3-4 -En Algérie :**

L'application du procédé de renforcement par matériaux composites a commencé en 1998, dans la réhabilitation de quelques ouvrages d'art tels que le pont routier voûté Sidi Rached et l'ouvrage rail PK459 sur oued Bill Braguettz (Constantine), avec le partenaire SAPTA-FREYSSINET France (fourniture et pose de TFC) d'une part, et la sous-traitance avec SIKA-outre-mer d'autre part avec l'application des produits de colmatage et d'injection des fissures sur la maçonnerie et le béton.

D'autres ponts ont été renforcés comme le pont routier voûté pont blanc d'El-harrach en 2002, le pont de Bejaia en 2003, le pont de oued Oumazer (Tipaza) en 2004 et dernièrement en 2005 le pont PK 371+6 sur oued Bourdime (Laghouat).

**I-9-Conclusion :**

Les matériaux composites présentent des avantages indéniables (caractéristiques mécaniques, poids, durabilité) qui justifient pleinement leur utilisation pour la réhabilitation des ouvrages de génie civil pour prolonger leur durée de vie. Des recherches importantes ont été menées sur cette nouvelle technique de renforcement par matériaux composites, en particulier sur l'application de cette technique dans le renforcement des structures en béton armé. Ces recherches ont montré les effets bénéfiques de ces matériaux et de cette technique comparativement aux techniques traditionnelles.

Il faut donc développer des nouvelles méthodes de construction et de réhabilitation, des méthodes qui à leur tour seront adaptées en particulier au nouveau matériau profitant en maximum de ses propriétés mécaniques.

## CHAPITRE II :

*Pathologies,  
réparation et  
renforcement  
des ouvrages*

## II-1-introduction :

Les ouvrages d'art constituent un lien critique dans le réseau routier et un investissement considérable en infrastructure qui devrait être gardé en bonne condition pour faciliter le trafic routier, supporter le commerce, la croissance économique et la mobilité personnelle.

Un ouvrage d'art est conçu pour une durée de vie bien définie (100 ans en général), mais il est livré à lui-même pendant sa mise en service. Il est sujet de plusieurs dégradations et agressions (vieillesse, fissuration, corrosion...), pouvant écourter sa durée de vie en le rendant inapte à accomplir ses fonctions normales.

Les tabliers de ponts en béton armé sont parmi les structures les plus exposées aux conditions favorisant leurs dégradations et certaines de ces conditions favorisent l'éclatement du béton de surface et la corrosion des armatures d'acier. Par conséquent, la durée de vie des tabliers de ponts se trouve considérablement réduite.

## II-2- Principales causes de dégradation des ouvrages :

Avant de procéder à toute réparation, il est indispensable de procéder à un diagnostic et de rechercher les causes des dégradations lorsque celles-ci n'apparaissent pas de façon évidente. En effet, cette étape est nécessaire pour le choix de la réparation optimale qui peut être définie comme la réparation la plus durable [4].

Les principales causes de dégradation des bétons proviennent des attaques physiques et chimiques supportées dans le temps par les structures placées dans un environnement plus ou moins agressif. Les dégradations peuvent aussi provenir de défauts initiaux dus soit à une conception mal adaptée, soit à une mauvaise mise en œuvre des bétons

### II-2- 1- Causes physiques de dégradation :

#### ➤ abrasion

Usure accompagnée d'une perte de matière consécutive au frottement d'un élément par un abrasif ou par le passage répétitif des piétons, véhicules et chariots industriels, etc

#### ➤ Cavitation :

Usure d'une structure hydraulique caractérisée par une perte de masse en présence de bulbes de vapeur qui se forment lors d'un changement brusque de direction d'un écoulement rapide de l'eau.

#### ➤ Chocs :

Les désordres induits par l'exploitation d'un ouvrage constituent une cause non négligeable de dégradation du béton. Les chocs les plus fréquents sont ceux des poids lourds hors gabarit contre l'intrados des ponts, les chocs de bateaux ou d'objets flottants contre les piles en rivière. Ces chocs peuvent créer des épaufrures, des éclats importants de béton, voire même des ruptures d'acier [4].

➤ érosion

Perte de matière résultant du frottement d'un corps solide et d'un fluide contenant des particules solides en suspension et en mouvement

Les ouvrages sujets à l'érosion se situent essentiellement en milieu fluvial et maritime. Ils sont soumis au charriage d'éléments solides induits par les courants, à l'action des vagues à chaque marée



**Figure 2-1 Affouillement du pont (oued Dj dai à Biskra)**

➤ Surcharge :

Il s'agit d'ouvrages ayant supporté des charges trop importantes qui ont entraîné des fissurations et des éclatements du béton. [13]

➤ Le feu :

Les très fortes élévations de température lors d'un incendie par exemple, entraînent un éclatement du béton. [13]

➤ Cycles gel/ dégel :

Selon le taux de porosité et de perméabilité des bétons, l'eau peut s'infiltrer et, sous l'action du gel, gonfler, générer des contraintes internes et créer des fissures [3]. Après un nombre important de cycles gel/dégel, certains bétons peuvent se déliter en surface et se désagréger. C'est le cas des ouvrages de montagne, des chambres froides. [13]

## **II-2- 2- Causes chimiques de dégradation :**

➤ Alcali-réaction ou cancer du béton :

C'est la réaction qui se produit entre la solution interstitielle du béton, riche en alcalin, et certains granulats lorsqu'ils sont placés dans un environnement humide. Des gels gonflants apparaissent en développant des microfaiençages et un éclatement du béton.

➤ Réactions sulfatiques :

Les sulfates proviennent essentiellement du milieu extérieur. Ces ions ne sont pas passifs vis-à-vis de la matrice cimentaire et conduisent à la formation de certains composés chimiques expansifs tels que : L'étringite, le gypse et la thaumasite. Ces composés provoquent le gonflement du béton créant en son sein des tensions qui engendrent des fissurations.

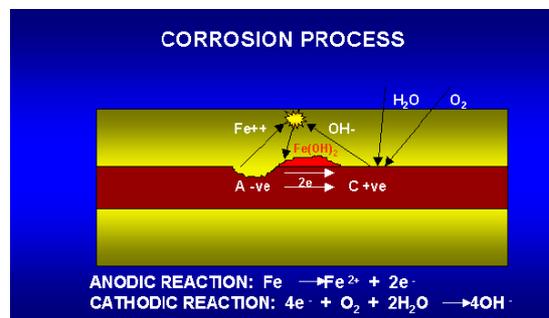
➤ Carbonisation et Corrosion des aciers :

Il est important de retenir que le béton est un matériau basique et que, pour cette raison, il est vulnérable aux attaques acides et, plus particulièrement, à celles faisant intervenir des acides forts. [4]



**Figure 2-2 Corrosions des armatures d'un tablier de pont**

La carbonatation est une réaction chimique entre la chaux du béton et le dioxyde de carbone de l'air qui a pour effet d'abaisser le pH de la phase interstitielle du béton. Les conséquences de cette réaction chimique sont très dommageables pour les armatures qui se trouvent à un pH où elles ne sont plus passives et peuvent alors se corroder.



**Figure 2-3 La carbonatation naturelle du béton**

### II-2- 3- Autres causes de dégradation des bétons

➤ Mauvais positionnement des armatures

Les armatures (généralement en acier) placées trop près du parement béton lors du coulage provoquent à terme des fissurations de surface.

➤ Mauvaise qualité des bétons employés

Un béton trop faiblement dosé en ciment, mal vibré, présentera un aspect défectueux : nids d'abeilles, faïençage, fissures superficielles, trous laissant les armatures apparentes. [13]

➤ Vibration trop importante

Une vibration trop longue peut entraîner une ségrégation du béton et par conséquent une mauvaise répartition des constituants. Les efforts mal répartis entraînent alors des fissurations et des élancements du béton. [13]

➤ Absence de cure du béton

La cure du béton est indispensable par temps chaud venté. Sans protection de surface, le béton se faïence en surface.

➤ Cycle humidité / sécheresse

Les cycles répétés d'humidité/sécheresse entraînent des variations dimensionnelles du béton pouvant créer des fissures et par conséquent la corrosion des aciers [13]



Figure 2-4 Dégradation du pont oued Djedi –Biskra

## II-3-Principales méthodes de réparation ou de renforcement des ponts en béton armé :

### II-3-1-introduction

Bien qu'il n'existait pas dans le passé de réglementation spécifique pour la conservation des constructions, la nécessité d'entreprendre des réparations et restaurations a permis de développer de nombreuses techniques de réparation et de renforcement.

La réparation fait référence à la récupération de la capacité portante originale de la structure, tandis que le renforcement consiste à augmenter le niveau de service (augmentation de la résistance, de la déformabilité, de la ductilité) d'une construction pour en permettre l'utilisation dans des conditions non prévues à l'origine ou de lui procurer une protection suffisante contre les sollicitations dont il n'a pas été tenu compte dans les calculs.

Le choix des méthodes de confortement doit satisfaire les objectifs suivants:

- ✓ L'utilisation optimale des structures principales avec un minimum de travaux de confortement.
- ✓ Le minimum de travaux isolés (ponctuels) pour éviter un coût élevé du confortement.
- ✓ Une interruption minimale du processus d'exploitation pendant le confortement.
- ✓ Une mécanisation optimale et une technologie d'exécution élevée.

### II-3-2-Béton projeté

Cette technique, très au point, utilisée tant pour le renforcement de structures insuffisantes ou défaillantes que pour la réparation d'ouvrage endommagé, exige pour sa mise en œuvre un personnel spécialisé. Le béton projeté peut être, ou non, combiné avec l'adjonction d'armatures complémentaires. La projection est réalisée soit par **voie sèche**, soit par **voie mouillée** [4].



Figure 2-5 Technique de projection du béton

Dans le premier cas, la grande vitesse de projection (80 à 100 m/s) fait que le procédé par voie sèche est particulièrement recommandé pour la réparation des ouvrages car il permet d'obtenir un béton très compact. Dans le second cas, la faible vitesse de projection (10 à 40 m/s) rend indispensable l'exécution préalable d'une couche d'accrochage. Après durcissement, le béton projeté possède les propriétés d'un béton coulé, puis vibré.

La difficulté de l'emploi de cette méthode provient essentiellement du mode d'application et de mise en œuvre (matériels, main d'œuvre et problèmes d'hygiène et de sécurité)



Figure 2-6 Réparation des poutres par béton projeté [3]

### II-3-3-Tôles collées :

Le renforcement de structure par plats métalliques, mieux connue sous le nom de procédé L'Hermitte, consiste à coller des plats en acier sur les faces tendues de structures en béton armé. Ainsi, L'Hermitte [Hermitte R.L. et al. 1967] s'est intéressé, dès le début des années Soixante, à l'utilisation de ces composés adhésifs de type époxy polymérisant à froid pour associer béton et acier.

La technique des tôles collées a permis soit d'accroître la capacité portante d'un ouvrage, soit de renforcer localement une structure présentant des insuffisances de résistance. Elle est applicable aux structures en béton armé et aux zones fonctionnant en béton armé des structures précontraintes. Diverses conditions doivent être réunies pour la bonne réussite d'une opération de renforcement ou de réparation.

**La surface du béton** doit subir, avant tout, une préparation soignée (burinage, bouchardage) ayant pour but d'éliminer toutes les parties peu adhérentes et de supprimer les imperfections locales afin de la rendre la plus plane possible.

**Le mortier de ragréage** est destiné à pallier, dans certains endroits, le manque d'enrobage des armatures internes ou bien à reprofiler la surface qui n'aurait pu efficacement être traitée par les précédentes techniques, en limitant la surface à ragréer à 20 % de la surface de collage et en s'assurant qu'il n'y a aucune zone ragrée en extrémité de tôles.

**L'acier de renfort** est constitué, dans la plupart des cas, de tôles en acier E24-2. Dans le cas où il est nécessaire de souder les tôles, on utilise de l'acier E 24-3. Ces tôles ont une épaisseur de 3 à 5 mm. Le choix d'un acier de nuance supérieure ou d'épaisseur plus importante est à déconseiller car il faut que l'acier se plastifie avant son décollement de façon à obtenir une structure ductile et non fragile.

**La protection des aciers** contre la corrosion sur leur face visible doit être assurée.

Le **primaire d'accrochage** est destiné à assurer une bonne adhérence entre la colle et le béton.

La **colle** est en général une résine époxydique choisie pour ses propriétés d'adhérence à l'acier et au béton. L'épaisseur minimale de colle est de l'ordre du millimètre.

Le **dispositif de serrage** peut, suivant les cas, être constitué de serre-joints, de barres filetées traversant l'élément ou scellées, d'étais ou de coins. Il doit permettre d'appliquer sur toute la tôle une pression voisine de 4 kPa durant toute la durée de polymérisation de la colle. Il convient de s'assurer préalablement que la structure peut reprendre les efforts de serrage sans dommage.



**Figure 2-7 Renforcement d'un pont tôles colées sur l'autoroute A6 près de Toutry. [1]**

Toutefois, le collage de tôles métalliques présente aussi quelques difficultés : [3]

- Sensibilité de l'acier à l'oxydation (il demande donc une protection et un entretien quotidien)
- Impossibilité de mobilisation de toute la résistance en traction des tôles, même sous faible épaisseur ;
- Nécessité d'un collage sous pression (vérins), pour assurer une adhésion suffisante et éviter les bulles d'air dans la couche de résine ;
- Impossibilité de généraliser cette technique à des surfaces importantes (masse manipulées trop importantes), ce qui limite d'autant les possibilités de réparation.

### **II-3-4-Adjonction d'armatures complémentaires**

Des armatures complémentaires sont à prévoir lorsqu'il s'agit de remplacer des aciers corrodés ou coupés accidentellement ou lorsqu'il s'agit de renforcer une structure.

Les armatures complémentaires doivent s'opposer à la fissuration, et participer à la résistance des sections renforcées [4]. La protection de ces armatures est assurée par un béton coulé ou projeté et leurs jonctions avec les armatures existantes peuvent se faire par des procédés classiques (recouvrement, soudure, manchonnage) [4]

### II-3-5-Précontrainte additionnelle

Contrairement aux techniques présentées ci-dessus et qui consiste en l'ajout de matière (béton ou acier), la précontrainte additionnelle consiste en un ajout de force dans des ouvrages existants en vue soit de leur redonner, leur état de service initial, soit de leur donner un nouvel état de service. Elle permet, en effet, d'appliquer des efforts d'une intensité connue, en des points et suivant des directions bien définies, capables de s'opposer aux efforts générateurs des désordres. Elle est réalisée le plus souvent par la mise en œuvre d'armatures de précontrainte (câble ou barres). [4]

La précontrainte additionnelle peut être employée pour traiter une grande variété d'ouvrage (ponts, barrages, réservoirs, bâtiment). Cette méthode est particulièrement adaptée au renforcement en flexion et vis-à-vis de l'effort tranchant par l'emploi d'étriers actifs. En revanche, la mise en œuvre de tout ce qui concerne la protection définitive des armatures nécessite un niveau particulier de qualité. [4]

De plus, le recours à des unités de plus en plus puissantes pour en limiter le nombre implique une étude particulièrement soignée des zones d'ancrage, très fortement sollicitées.

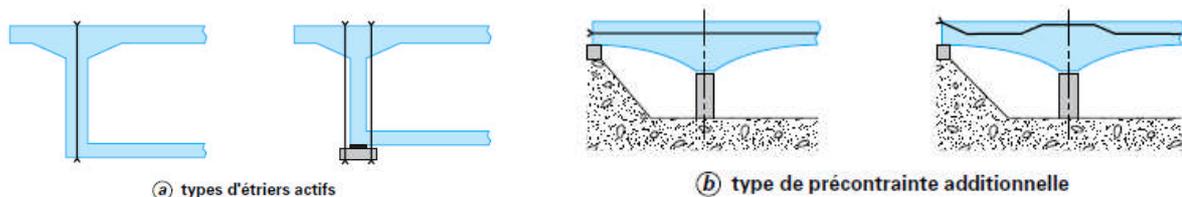


Figure 2-8 Différents types de réparation par précontrainte additionnelle [3]

### II-4-Réparation et/ou de renforcement des ponts par matériaux composites à fibres de carbone:

Le renforcement des ouvrages par des matériaux composites constitue une solution moderne surtout dans les zones soumises aux actions sismiques importantes. Les avantages des matériaux composites se caractérisent par une grande résistance, une aptitude au façonnage, un faible poids propre et une réalisation facile.



Figure 2-9 piles d'un pont renforcées par composites à fibres de carbone

La fibre de carbone est obtenue par pyrolyse d'une fibre organique appelée précurseur. Elle offre deux possibilités d'utilisation : la première en tant que carbone pour les propriétés de cet élément, la deuxième en tant que fibre flexible et qui convient à toutes les formes de produits finis [11]

#### II-4-1-Pourquoi renforcé par fibre de carbone ?

Les composites à fibre de carbone possèdent certaines propriétés physiques et mécaniques qui en font un matériau de renforcement de toute première qualité dans certaines applications liées au bâtiment et aux ouvrages de génie civil. On remarquera en particulier :

- ◆ Le niveau très élevé des résistances et des modules en traction des fibres de carbone comparés aux fibres de verre, d'aramide et de bore
- ◆ le niveau plus élevé de la résistance au cisaillement interlaminaire des fibres de carbone. [11]
- ◆ La faiblesse des fibres d'aramide en compression
- ◆ les fibres de verre ont un faible module et manquent de résistance aux solutions salines et/ou basiques. [3]
- ◆ Les fibres d'aramides qui présentent un faible module, une tenue thermique et une résistance à la fatigue en milieu aqueux très limitée. [3]
- ◆ les fibres de polyéthylène à faible module et à tenue thermique très limitée;

Le tableau suivant résume les principales caractéristiques des fibres déjà citées:

Fibre	Diamètre mono-filament (micron)	Masse spécifique (kg/dm <sup>3</sup> )	Résistance traction (MPa)	Résistance compression (MPa)	Résistance flexion (MPa)	Module flexion (GPa)
<b>Verre E</b>	4 -13	2,54 -2,55	3200 -3500	900	1100	73 -74
<b>Verre B</b>	9 - 10	2,48	3700 -4500	1100	1300	86 -87
<b>Carbone HR</b>	7 – 8	1,75 -1,78	2700 -3500	900 -1100	1200	230 -250
<b>Carbone IM</b>	.....	1,7	3900	.....	.....	.....
<b>Carbone HM</b>	5 – 7	1,81 -1,96	2700 -3500	1300	.....	.....
<b>Aramide</b>	12 – 19	1,45	2700 -2900	190 -280	600	130 -135
<b>Bore</b>	100 - 140	2,63	3200 -3500	.....	.....	390 - 420
<b>Silice</b>	22		3200 -3900	.....	.....	62 -72
<b>Polyamide</b>	14	1,14	900 -1000	.....	.....	5,6
<b>Polyester</b>	12	1,38	800 -1200	.....	.....	13,4

Tableau 2-1-Principales caractéristiques des fibres

## II-4-2- techniques de renforcement :

Plusieurs procédés de renforcement sont apparus au cours de ces dix dernières années. Les principaux, utilisent directement les fibres de carbone sous forme de fil continu et d'autres font appel à un semi-produit plus ou moins sophistiqué tel que les tissus secs, les tissus préimprégnés ou des produits pultrudés.

### a) Fibres sèches

La fibre de carbone est introduite sous forme de fibres continues de très grande longueur. Elle est déposée et enroulée régulièrement autour d'un mandrin, le poids des bobines varie de 500g à 4 kg, ce qui correspond à des longueurs de fibres continues de 600 m à 5 km (soit 0,8g au mètre linéaire).

Pour renforcer directement une structure à partir d'une bobine de fibre de carbone, il est nécessaire de pouvoir tourner autour. Ce procédé de renforcement est donc naturellement limité aux colonnes ou aux pylônes. Les bobines sont placées sur un dévidoir qui peut se mettre en rotation autour de la structure à différentes hauteurs. Lorsque l'ensemble se met en mouvement, les mèches de carbone sont extraites des bobines et elles sont déposées automatiquement par enroulement autour du support à renforcer préalablement enduit d'une résine [3].

Après le dépôt des fibres de carbone, une couche de fermeture de résine assure la cohésion de l'ensemble. Ce procédé automatisé est surtout utilisé dans le cas des renforcements par frettage des piles ou colonnes (retrofitting) de ponts ou de bâtiments. Son principal avantage est l'automatisation complète du système de pose. Son principal inconvénient est le fait qu'une pose manuelle est nécessaire pour renforcer les extrémités hautes et basses des piles et des colonnes et que cette méthode demande du temps et des manipulations importantes pour installer le matériel. [3]

### b) Tissus secs

Les fibres de carbone permettent, comme beaucoup de fibres longues de fabriquer des tissus de toutes formes et de toutes tailles, de même que des matrices. Le renforcement de structures à partir d'un tissu sec tissé uni ou multidirectionnel se fait directement par la pose de ce dernier sur une couche de résine qui recouvre l'élément à renforcer et qui sert de liant. Après marouflage, une couche de résine de fermeture permet de parfaire l'imprégnation. Les pressions nécessaires appliquées pour cette méthode de renforcement sont faibles.

Par rapport à d'autres méthodes de renforcement, son principal avantage est une manipulation très facile sur chantier avec une absence totale de matériel lourd à déplacer. En plus, cette technique permet le suivi parfait de la forme du support et la maîtrise de l'épaisseur du film de résine. [3]

### c) Tissus préimprégnés

Les tissus préimprégnés sont obtenus en usine, à partir de tissus secs (cas des tissus multidirectionnels) ou à partir de fils de carbone accolés sous forme de nappe (cas des tissus unidirectionnels), sur lesquels est déposé un excès de résine.

L'excès de résines est éliminé par passage entre des rouleaux chauffés ou non. Le produit avant utilisation doit être conservé à froid (généralement  $-18^{\circ}\text{C}$ ), pour éviter la polymérisation de la résine. Les tissus doivent être ramenés à la température ambiante pour être utilisables. A température ambiante, la souplesse du tissu préimprégné permet la pose de renforcement sur pratiquement n'importe quel type de surface.

Ces renforcements sont posés et leur matrice immédiatement polymérisée sur les surfaces à renforcer. Le principal problème d'un tel renfort réside dans la phase de remontée à la température ambiante et dans les difficultés matérielles pour assurer de bonnes conditions de polymérisation sur chantier.

Les premières résines utilisées nécessitaient un matériel important, car la polymérisation était obtenue sous vide ou sous pression à des températures supérieures à  $100^{\circ}\text{C}$ . Par contre le principal avantage de cette méthode était la quasi-absence de bulles dans le renfort en composite après polymérisation.

Cette technique de renforcement a surtout été développée au Japon, dès la fin des années 1980. Depuis, les fabricants de tissus préimprégnés et les formulateurs de résines ont accompli des progrès considérables. La température de polymérisation des résines est voisine de la température ambiante, ce qui a permis un gain d'exploitation très important.

Cependant, l'utilisation d'un tissu préimprégné nécessite toujours une phase de conservation à très basse température et une phase de remontée en température avant la pose, qui sont difficiles à gérer sur des chantiers de travaux publics. [3]

#### **d) Produits pultrudés**

Ces produits sont obtenus à partir de mèches de fibres continues qui sont enduites par passage en continu dans un bain de résine. Ces résines peuvent être de type époxyde, polyester, vinylester ou phénolique.

L'ensemble des mèches préimprégnées passe ensuite dans une filière où l'excès de résine est éliminé, puis dans un four de polymérisation. Les produits finis se présentent sous forme de bandes ou de joncs, plus ou moins rigides suivant les épaisseurs et les diamètres. La section des bandes les plus courantes est  $100 \times 1 \text{ mm}^2$ . Leur longueur, suivant la demande, varie de quelques centimètres à plusieurs centaines de mètres. D'autres types de profilés, y compris des tubes, peuvent être aussi fabriqués par le même procédé ; ces produits sont utilisés depuis très longtemps dans les articles de sport : flèches d'arcs, bâtons de ski.

Ce procédé a l'avantage d'être continu, automatisé, rapide et donc de réduire le coût du composite. Il permet aussi de maîtriser les taux de fibres et de résine, et d'obtenir des formes profilées recherchées pratiquement de toutes les longueurs désirées. A partir de ces bandes pultrudées, la technique de renforcement est similaire à celle du plat collé métallique, selon le procédé l'Hermite, mis au point en France vers 1965. Elle a démarré conjointement au Japon et en Europe, plus exactement en Suisse, à l'EMPA de Dübendorf à la fin des années 1980 sous la direction du Professeur U. Meier. L'avantage de cette méthode est la facile extrapolation des résultats obtenus par le collage de tôles d'acier.

Dès les années 1980, des recherches ont démarré au Japon pour étudier le remplacement des structures en acier, formées de câbles toronnés et de treillis, par des structures résistant à l'oxydation. Les composites, à base de fibres de verre, d'aramide ou de carbone, se sont avérés d'excellentes solutions pour ce remplacement. [3]

### II-4-3- Application du composite TFC :

#### II-4-3-1- Définition de procédé TFC :

Le procédé TFC est un procédé breveté de renforcement structural par collage d'armatures additionnelles à base de fibre de carbone, mis au point en partenariat avec le LCPC, ATOFINDLEY, SOFICAR et FRESSINET, commercialisé et posé par FRESSINET.

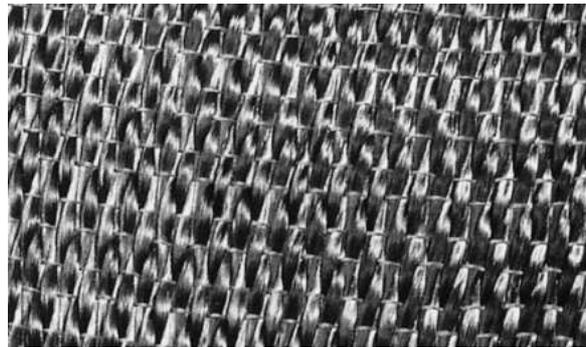


Figure 2-10 Tissu de fibre de carbone

Le procédé est basé sur le principe d'un placage de matériau résistant aux efforts de traction et judicieusement collé sur les zones tendues de la pièce à renforcer pour en augmenter les performances de fonctionnement. Le procédé TFC a essentiellement un rôle de renforcement structural aux efforts engendrés par les effets de flexion comme d'efforts tranchants.

Le TFC est un composite à base de fibres de carbone matricées dans un liant synthétique appliqué à froid dans le but d'être intégré par adhérence au support pour équilibrer les tractions induites dans la section.

La mise en œuvre de composite directement sur le support permet de mouler la forme exacte de la pièce à renforcer, de ne pas manier de plaques lourdes ou encombrantes, de ne pas avoir d'autre interface de collage avec le support que la matrice même du composite, et donc de ne pas générer de concentration de cisaillement pouvant provoquer des amorces de décollement dans les zones de faible épaisseur de résine.

#### II-4-3-2-Domaine d'application :

Les techniques de renforcement du TFC s'étendent à tous les domaines de la construction civile ou militaire:

- ◆ Bâtiments d'habitation, commerciaux et industriels.
- ◆ Passerelles, ponts routiers et ferroviaires.
- ◆ Réservoirs, silos, aéroréfrigérants, cheminées, etc.

Le TFC est le plus souvent utilisé pour les structures en béton, mais peut être également appliqué sur d'autres supports comme l'acier, les maçonneries, le bois (massif, aggloméré ou lamellé), les stratifiés.

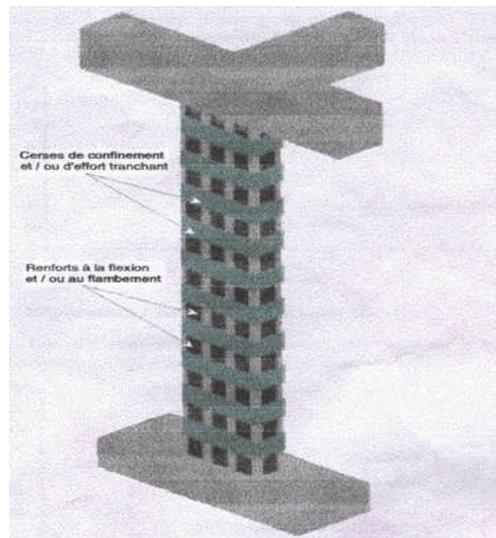


Figure 2-11 Renforcement des poteaux par T.F.C

#### II-4-3-3- Résine de la matrice du composite TFC

Le procédé de renforcement de structures par TFC nécessite l'utilisation d'une résine synthétique destinée à imprégner le tissu TFC et à assurer la liaison avec le support à renforcer. Le procédé utilise un système époxydique bicomposant spécifique dont les caractéristiques rhéologiques permettent l'application sur des surfaces verticales ou en plafond tout en permettant une imprégnation optimale de TFC.

Il peut être utilisé sur des supports tels que le bois, l'acier, le béton sec ou humide à des températures comprises entre 5 et 45°C. [17]

La colle bicomposante du TFC porte les références EPONAL RESINE et EPONAL DURCISSEUR.

##### ❖ Les caractéristiques de la résine TFC

La colle TFC est constituée de 2 composants (résine + durcisseur) prédosés conditionnés en sacs de 1,8 kg. La consommation moyenne d'adhésif Eponal TFC, par exemple pour un tissu de grammage 500g/m<sup>2</sup> est de 1,2 à 1,5kg/m<sup>2</sup> par couche de tissu, elle varie suivant la nature et l'état de surface du support à renforcer. La durée pratique d'utilisation des mélanges dépend de la quantité mise en œuvre (effet de masse) et de la température ambiante (exothermie), la vitesse de durcissement après application, liée à la température ambiante conditionne le délai avant mise en service. La colle TFC doit être utilisée par du personnel ayant reçu une formation préalable concernant le respect des règles élémentaires d'hygiène (protection individuelle, nettoyage et élimination...) et les risques spécifiques liés à l'utilisation de ce produit (contact accidentel avec la peau, précautions d'emploi...). [17]

#### **II-4-3-4- Préparation des supports en béton**

##### **a) Cas généraux pour toute nature de support**

Les supports doivent être débarrassés de tous produits pouvant contrarier la bonne adhérence du TFC. Les matériaux supports sont systématiquement préparés en surface par des moyens mécaniques de décapage de surface adaptés. Un essai de traction directe est réalisé in situ par pastillage pour caractériser le support avant la pose pour vérifier que les caractéristiques mécaniques du support soient au moins égales à celles prise en compte dans le calcul. Bien que le TFC ait de grandes capacités à épouser les formes les plus diverses et même non développables, il ne dispose pas de la capacité à suivre les défauts ponctuels de bétonnage tel que les bullages, les petites épaufrures, les nids de cailloux, désaffleurement, ou autres. Il y a donc nécessité dans certains cas d'effectuer des ragréages de structure avant d'effectuer l'application du TFC. [16]

##### **b) Préparation des supports en béton**

La surface de collage du béton doit être préparée de façon à créer un état de rugosité suffisant et à éliminer la couche de surface offrant généralement peu de cohésion.

Les moyens de préparation peuvent être choisis en fonction des surfaces à traiter et des nuisances occasionnées lors du traitement.

La préparation peut être réalisée par:

- sablage à sec.
- sablage humide.
- Hydrodécapage (machine travaillant à 2000 bars).
- Pistolets à aiguilles.
- Bouchardage (tête de boucharde minimum 25 dents, un brossage général est indispensable après ce traitement)

#### **II-4-3-5-Application du TFC**

Le TFC est un tissu sec appliqué sur couche de résine humide. L'application est faite directement sur le support.

##### **a) Mélange de la résine**

La colle époxy bicomposant est livrée en kits prédosés, elle doit être mélangée dans son intégralité. Le mélange doit être effectué de façon mécanique en utilisant un fouet hélicoïdal monté sur une perceuse. Les deux composants sont de teintes distinctes, Le mélange est prêt quand la teinte du produit mélangé est uniforme.

##### **b) Application de la première couche de résine**

On applique la première couche de colle époxy (dite couche de collage) avec des moyens permettant de masser le support pour faire pénétrer la résine au mieux dans les anfractuosités du support, et assurer ainsi une bonne imprégnation de surface.

La couche de collage est appliquée à raison de  $700 \text{ gr/m}^2 \pm 50 \text{ g}$  au moyen d'un rouleau à poils ras. Pour des surfaces importantes, on peut utiliser des rouleaux autoalimentés type Airless par exemple. [17]

### c) Application des bandes de tissu de carbone

Les tissus sont préalablement découpés en lés aux dimensions indiquées par le plan de pose. Les tissus sont livrés en largeurs standard, les découpes sont donc toujours dans le sens de la largeur. Les coupes dans les tissus ne sont pas admises car sans fil de bordure le tissu se défait et rend le collage difficile.



**Figure 2-12 Découpage de TFC (suivant la note de calcul)**

Le tissu doit toujours être appliqué sur une couche de résine humide, la pose du tissu sur la couche humide se fait en partant d'une extrémité vers l'autre par placage du revers de la main sur la résine de collage à l'avancement. Pendant cette opération de pose, on vérifie de collage à l'avancement le parallélisme d'un des bords extérieurs du lé par rapport à une trajectoire tracée sur le support, ou par rapport au lé précédant dans le cas de bandes juxtaposées. [16]

Après la pose le tissu doit être fermement plaqué sur le support par un marouflage permettant l'imprégnation de la colle dans le fibre et l'élimination des bulles d'air éventuelles. Le marouflage est réalisé au moyen d'un rouleau en élastomère souple ou d'un rouleau de peintre à poils ras muni de son tube de protection en polyéthylène. Après l'opération de marouflage le tissu doit avoir un léger poisseux au toucher bien que la présence de résine ne soit pas perceptible en tous points.

### d) Application de la couche de résine de fermeture :

La deuxième couche de résine (dite couche de fermeture) est destinée à donner l'apport de matière époxydique permettant d'achever l'imprégnation du tissu. Cette deuxième couche est appliquée immédiatement après le pose du tissu : en aucun cas cette couche ne peut être appliquée après polymérisation de la première couche. L'application de la couche de fermeture est faite au moyen d'un couteau à enduire passé dans le sens des fibres sans excès de pression. La quantité de mise en œuvre sur cette couche est de  $700 \text{ g/m}^2 \pm 50 \text{ g}$ .

La pose de cette couche n'est jamais strictement uniforme, on peut après durcissement constater en surface de TFC des zones plus ou moins brillantes dues à des surépaisseurs de colle, ces défauts d'aspect n'altèrent pas la résistance du renforcement.

#### e) Recouvrements

On appelle recouvrement la longueur nécessaire de tissu superposé pour assurer la continuité d'une bande interrompue, et prolongée par une autre. Les recouvrements ne s'appliquent généralement qu'au sens longitudinal du tissu de renforcement. C'est souvent le cas rencontré quand il est nécessaire de déplacer des échafaudages ou de travailler par zones pour des raisons d'exploitation dans des locaux en service. Les recouvrements peuvent alors être réalisés soit sur couche de résine encore humide ou sur couche de résine durcie.

- Sur couche de résine humide : le tissu en recouvrement peut être appliqué directement sur la couche de finition du les déjà posé.
- Sur TFC durci : la zone de recouvrement peut être dépolie au moyen d'un papier abrasif et nettoyée au moyen d'un chiffon imbibé de MEC, avant d'appliquer une couche de collage sur laquelle sera posé le tissu.

Le recouvrement doit avoir une longueur minimum de 10 cm quelle que soit la largeur du tissu.

#### f) Couches de TFC superposées

Il est possible de superposer des couches de TFC pour réduire la contrainte de travail dans le matériau de renfort. La superposition de couches peut se faire sur couche de résine humide pendant la pose sont alors identiques dans les deux cas aux procédures de recouvrement. Le nombre maximum de couches superposées n'est limité que par la capacité d'adhérence au support calculée.



Figure 2-13 Différentes étapes d'application de TFC

## **II-5- conclusion :**

On admet généralement que la durée d'exploitation d'un ouvrage en béton armé est de cinquante à cent ans, suivant son importance ou sa fonction. Durant une telle période, il est possible que des modifications importantes surviennent (changement d'exploitation de l'ouvrage ou dégradation des matériaux).

Dans ce chapitre on a fait une synthèse sur les pathologies affectant les ouvrages d'art et les différentes techniques de réparation. Parmi ces techniques on trouve celle appelé méthode de renforcement par collage de fibre de carbone qui est devenu de plus en plus utilisable grâce aux caractéristiques de ce matériau.

## CHAPITRE III :

*Calcul analytique  
d'un tablier de  
pont à poutres  
isostatique*

### III-1-Introduction :

D'une façon générale, on appelle pont tout ouvrage permettant à une voie de circulation de franchir un obstacle naturel ou une autre voie de circulation. Selon le cas, on distingue: pont-route, pont-rail, pont-canal.

Cette définition est un peu imprécise dans la mesure où elle ne se réfère à aucune notion de dimension, de forme ou de nature d'ouvrage. Pour les petits ponts hydrauliques, on parle couramment de ponceaux ou de dalots. À l'inverse, on emploie de préférence le terme de viaduc lorsqu'il s'agit d'un ouvrage de grande longueur possédant de nombreuses travées et généralement situé en site terrestre. De même, une buse est un ouvrage de franchissement que l'on ne désigne jamais par le terme de pont, même si son ouverture est de dimension respectable.

Ce chapitre porte sur l'évaluation des différentes types de charges et surcharges susceptible d'être appliqué sur le tablier à étudier telle que les charges permanentes et les surcharges d'exploitations (les charges du trafic et les surcharges des trottoirs), et le calcul de renforcement par TFC dans le cas où le pont nécessite un renforcement.

### III-2- caractéristiques d'un pont à poutres :

La conception d'un pont doit satisfaire à un certain nombre d'exigences puisqu'il est destiné à offrir un service à des usagers. On distingue les exigences fonctionnelles (ou données fonctionnelles) qui sont l'ensemble des caractéristiques permettant au pont d'assurer sa fonction d'ouvrage de franchissement, et les exigences naturelles (ou données naturelles) qui sont l'ensemble des éléments de son environnement déterminant sa conception.

#### ➤ Pont à poutre en béton armé:

Un pont à poutres, en général, est un pont construit de poutres placées sur des culées du pont et pieux de fondation, il n'exerce qu'une action verticale sur ces appuis. A son tour, un tablier de pont est construit sur des poutres afin de transporter du trafic.

Un pont à poutres est constitués soit de travées indépendantes soit de travées solidaires qui peuvent être soit continue soit cantilever (les poutres principales se prolongent en porte à faux)

Un pont à poutres en béton est constitué de poutres en béton, à nouveau dans un faisceau de forme I. Les poutres en béton peuvent être soit en béton coulé ou précontraint par post-tension des poutres. Ponts à poutres en béton sont les meilleures pour des portées de 10 mètres et 50 mètres. Précontraint, poutres préfabriquées en béton sont facilement accessibles.

**III-3- Cas d'étude :****III-3- 1 Présentation descriptive de l'ouvrage**

L'objet de cette partie est de calculer analytiquement un pont à poutres isostatique en béton armé.

Cet ouvrage se situe au 2ème rocade autoroutière d'Alger, c'est le passage supérieur OA 101.

- Le pont a une largeur de 10 mètres, avec deux trottoirs de 01 mètres chacun.
- Sa longueur totale est de 40 mètres ; il est composé de 2 travées identiques.
- Le tablier repose sur 03 piles de même hauteurs et deux culées.
- Les piles en béton armé sont encastrées à la base de la semelle de fondation.
- Le tablier est constitué d'une dalle en béton armé encastrée sur les poutres principales.

**III-3- 2 Calcul des charges permanentes (CP) :****a) Poids propre de la dalle :**

Calcul du poids total de la dalle du pont, tel que ;

$$\text{épaisseur de la dalle} = 0.2 \text{ m}, \quad \gamma = 2.5 \text{ t/m}^3$$

Largeur de la dalle = 10 m ;

$$\text{D'où } A_{\text{dalle}} = 0.2 \times 10 = 2 \text{ m}^2$$

Alors le poids total de la dalle est =  $0.2 \times 10 \times 2.5 = 5 \text{ t/ml}$ .

**b) Poids propre des poutres :**

Section de la poutre est rectangulaire

$$\text{D'où } S = 0.36 \times 1.10 = 0.396 \text{ m}^2$$

$$\text{On a : } \gamma = 2.5 \text{ t/m}^3$$

Alors :

$$\text{Poids propre d'une poutre} = 0.396 \times 2.5 = 0.99 \text{ t / ml.}$$

$$\text{Poids propre des poutres} = 7 \times 0.99 = 6.93 \text{ t / ml.}$$

Donc : CP = poids des poutres + poids de la dalle

$$\text{CP} = 6.93 + 5 = 11.93 \text{ t / ml.}$$

**III-3- 3-Calcul des charges permanentes complémentaires(CCP) :****a) Corniches :**

$$0.27 \times 2.5 \times 2 = \mathbf{1.35 \text{ t/ml}}$$

Tel que :

$$\text{Surface d'une corniche} = 0.27 \text{ m}^2 \text{ et } \gamma = 2.5 \text{ t/m}^3$$

**b) Revêtement :**

$$\text{Pr(t/ml)} = \gamma_{\text{bitume}} \times S$$

$$\text{Poids volumique du bitume : } \gamma_{\text{bitume}} = 2.2 \text{ t/m}^3 ;$$

$$\text{Alors : Pr} = (0.08 + 0.02) \times 7 \times 2.2 = \mathbf{1.54 \text{ t/ml}}$$

**c) Trottoirs :**

Les deux trottoirs ont les mêmes dimensions

$$\text{D'où : } P_{\text{tr}} = 2.5 \times 2 \times S_{\text{tr}} = 5 \times (0.3 \times 1.5) = \mathbf{2.25 \text{ t/ml}}$$

**d) Glissière de sécurité : 0.2 t/m****e) les gardes corps : 0.1 t/m****f) Béton dense :  $(2.5 \times 7^2) / 200 = 0.6125 \text{ t/ml}$** 

Donc :

CCP : poids de revêtement + poids des trottoirs + glissières de sécurité + gardes corps.

$$\text{CCP} = 1.54 + 0.2 + 0.1 + 1.5 + 1.35 = 4.7 \text{ t/ml}$$

$$\text{D'où } \mathbf{CCP = 6.05 \text{ t/ml.}}$$

$$\text{Alors le poids totale propre du tablier } Q_{\text{tb}} = \text{CP} + \text{CCP} = 11.93 + 6.05 = 17.98 \text{ t/ml} = 359.6 \text{ t.}$$

**III-3- 4-Les caractéristiques du pont :****a) Largeur roulable ( $L_r$ ) :**

Définie comme étant la largeur comprise entre deux dispositifs de sécurité ou deux bordures.

**b) Largeur chargeable ( $L_s$ ) :**

Se déduit de la largeur roulable en enlevant une bande de 0.5m le long de chaque dispositif de retenue (glissière ou barrière) lorsqu'il existe. Donc  $L_s = L_r - 2(0.5)$

**c) nombre de voies de circulation :**

Par convention, une chaussée comporte un nombre de voies de circulation noté ( $N_v$ ), égal à la partie entière du quotient par trois de leur largeur chargeable exprimée en mètre.

$N_V = E (L_S / 3)$ . Excepté pour :  $5m \leq L_S < 6m$  ou ( $N_V=2$ )

**d) Largeur d'une voie :**

Par convention, la largeur d'une voie de circulation d'une chaussée notée  $L_V$  est égal au quotient de la largeur chargeable par le nombre de voie.  $L_V = (L_S / N_V)$ .

**e) Classe d'un pont :**

On distingue trois classes de ponts, en fonction de leur largeur roulable

Classe de pont	La largeur roulable ( $L_r$ )
1	$L_r \geq 7m$
2	$5.5 m \leq L_r < 7m$
3	$L_r < 7m$

Tableau 3-1 Classes des ponts en fonction de la largeur roulable.

Dans notre cas :

- Largeur totale :  $l_t = 10m$
- Largeur chargeable = Largeur roulable :  $l_s = l_t - 2(0.5) = 6 m$
- Nombre de voies :  $N = E (l_s / 3) = 2$  voies
- Largeur d'une voie :  $l_v = l_s / N = 3 m$
- Classe du pont : → pont de 1<sup>ère</sup> classe

### III-3- 5- Calcul des surcharges d'exploitation :

Dans notre cas, nous prendrons les systèmes de surcharge sous lesquelles notre ouvrage sera calculé, suivants :

- ◆ Système de charge A.
- ◆ Système de charge Bc.
- ◆ Convoi militaire MC120.
- ◆ Convoi exceptionnel D240

#### III-3- 5-1- Système de charges A :

Ce système de charge est applicable à tous les ponts dont les portées unitaires ne dépassent pas 200m, c'est une charge uniforme d'intensité

$$A = \quad \times \quad \times \quad ( ) \text{ tel que } A(L) = 230 + \left( \frac{\quad}{\quad} \right) \quad (\text{kg/m}^2)$$

Avec :

➤  $a_2 = V_0 / L_v$  avec :  $L_v$  la largeur d'une voie, tel que :

- $V_0 = 3.5$  pour un pont de 1ere classe
  - $V_0 = 3.0$  pour un pont de 2eme classe
  - $V_0 = 2.75$  pour un pont de 3eme classe
- $a_1$  : donné par le tableau suivant

Nombre de voies chargées	1	2	3	4	$\geq 5$
Classe de pont 1	1.00	1.00	0.90	0.75	0.70
Classe de pont 2	1.00	0.90	-	-	-
Classe de pont 3	0.90	0.80	-	-	-

**Tableau 3-2 valeurs de coefficient  $a_1$**

$$A(L) = 230 + ( \text{---} ) = 1391 \text{ kg /m}^2 = 1.391 \text{ t/m}^2$$

$a_1$  En fonction de la classe et le nombre des voies chargées. (Tableau)

$$a_2 = V_0 / L_v = 3.5 / 3.5 = 1$$

➤ Pour une voie chargée :

$$a_1 = a_2 = 1 ;$$

$$A_1(L) = 1.391 \times 1 \times 1 \times 3.5 = 4.86 \text{ t/ml}$$

➤ Pour deux voies chargées :

$$a_1 = a_2 = 1$$

$$A_2(L) = 1.391 \times 1 \times 1 \times 3.5 \times 2 = 9.74 \text{ t/ml}$$

N <sup>bre</sup> de voie	$a_1$	$a_2$	$\times \times ( )$	largeur des voies	A(L) (t/ml)
1	1	1	1.391	3.5	4.86
2	1	1	1.391	7	9.739

**Tableau 3-3 valeurs de la surcharge A**

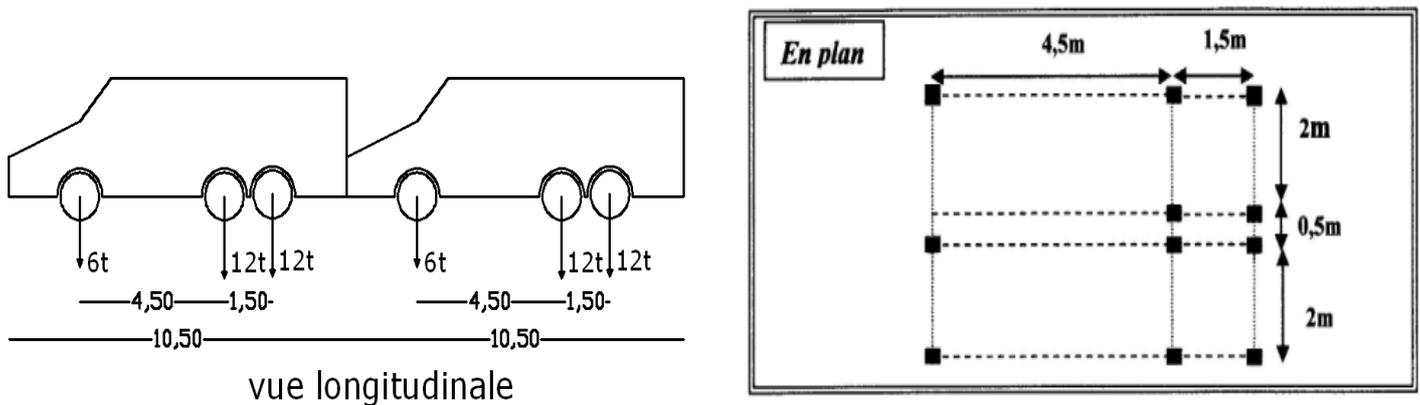
**III-3-5-2- Système de charges B :**

Le système de charge B comprend trois systèmes distincts :

- la surcharge  $B_c$  :se compose de camions type
- la surcharge  $B_r$  : se compose d'une roue isolée
- la surcharge  $B_t$  : se compose de groupe de deux essieux dénommés essieux ou tandems.

**a)  $B_c$  : camions à trois essieux**

Elle se compose de camions types de 30 tonnes à trois essieux, tous trois à roues simples munies de pneumatiques, dont l'essieu avant de 6 tonnes et les deux essieux arrières de 12 tonnes chacun,



**Figure 3-1 disposition du chargement  $B_c$  selon le fascicule 61 titre II**

La surface d'impact est de (20×20) cm pour chaque roue de l'essieu avant, et de (25×25) cm pour chaque roue des deux derniers essieux. Le sens de circulation peut être dans un sens, ou dans l'autre à condition que les deux camions circulent dans le même sens, le nombre de camions dans le sens de la longueur sera de 1 ou 2, dans le sens transversal tous les nombres entiers possibles entre 1 et  $N_v$ .

- $B_c = 2 \times 30 \times n \times b_c$

En fonction de la classe du pont et de nombre de fils considérées les valeurs des charges seront multiplier par :

- un coefficient multiplicateur de classe  $b_c$  (Tableau 3-4)

- un coefficient de majoration dynamique :  $\delta_{B_c} = 1 + (0.4 / (1 + 0.2L)) + 0.6 / (1 + 4(G/S_{B_c}))$  avec :

$L$  : portée du tablier chargé

$G$  : poids de tablier considéré

$S_{B_c}$  : surcharge due au convoi B

Nombre de files	1	2	3	4	≥ 5
Classe de pont 1	1.20	1.10	0.95	0.80	0.70
Classe de pont 2	1.00	1.00	-	-	-
Classe de pont	1.00	0.80	-	-	-

Tableau 3-4 Valeurs du coefficient bc

D'où :

- ♦ Pour une voie :  $B_{C1} = 2 \times 30 \times 1 \times 1.2 = 72 \text{ t}$ , avec  $b_c = 1.2$
- ♦ Pour deux voies :  $B_{C2} = 2 \times 30 \times 2 \times 1.1 = 132 \text{ t}$ , avec  $b_c = 1.1$
- ♦  $\delta = 1 + (0.4 / (1 + 0.2 \times 19)) + 0.6 / (1 + 4(359.6 / 132)) = 1.133$

b) **Bt : tandems à deux essieux**

Applicable pour les ponts de 1ere et 2eme classe tel que :  $B_t = 2 \times 16 \times N$

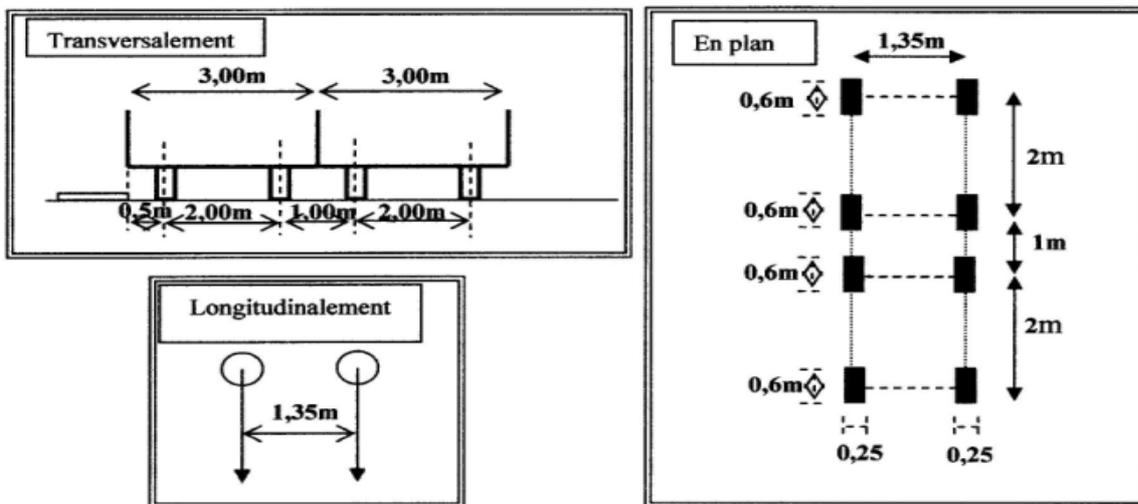


Figure 3-2 disposition du chargement Bt selon le fascicule 61 titre II

La valeur de la charges se multipliera par

- un coefficient de pondération bt ayant pour valeur :

- $b_t = 1$ ..... pour un pont de 1ere classe
- $b_t = 0.9$ ..... pour un pont de 2eme classe

-un coefficient de majoration dynamique :  $\delta_{Bt} = 1 + (0.4 / (1 + 0.2L)) + 0.6 / (1 + 4(G/S_{Bt}))$

Avec :

- N : Nombre des voies chargées
- L : portée du tablier chargé
- G : poids de tablier considéré
- $S_{Bt}$  : surcharge due au convoi Bt

D'où :

$$L = 19\text{m}$$

$$G = 359.6 \text{ t}$$

$b_t = 1$ , pour les ponts de la première classe

$$S = S_{bt} \times b_t = 64 \times 1 = 64 \text{ t}$$

$$\delta = 1 + (0.4 / (1 + 0.2 \times 19)) + 0.6 / (1 + 4(359.6 / 64)) = 1.110$$

Désignation	$S_{bt}$	$b_t$	$\delta$	Essieu (16t)
1 tandem	32	1	1.110	17.76
2 tandems	64	1	1.110	35.52

**Tableau 3-5 valeurs de la surcharge Bt**

c) **Br**: roue isolée

La roue isolée qui constitue le système Br. porte une masse de 10 t , sa surface d'impact est un rectangle réparti chargé dans le côté transversal de 0.6m, longitudinal est 0.30m .

Le rectangle d'impact de cette roue disposé normalement à l'axe longitudinal de la chaussée peut être placé n'importe où sur la largeur roulable.

**III-3-5-3-Convois militaires :**

Sur les itinéraires classés pour permettre la circulation des convois militaires, il y a lieu de prendre en compte les effets des véhicules types susceptibles dans certains cas d'être plus défavorables que ceux des systèmes A et B.

- Les camions militaires sont composés de deux classes : M80, M120.
- Chaque classe se compose de deux systèmes distincts : Me et Mc.

**Le système Me** :Se compose d'un groupe de deux essieux, chaque essieu pesant respectivement 22 tonnes et 33 tonnes pour les classes M80 et M120.

**Le système Mc :** Se compose de véhicules types à chenilles, de poids respectifs 72 tonnes et 110 tonnes pour les classes M80 et M120.

$$\delta_{MC120} = 1 + (0.4 / (1 + 0.2L)) + 0.6 / (1 + 4(G / SMC120))$$

**Disposition :**

- Sens transversal : un seul convoi est supposé circuler quelque soit la largeur de la chaussée.
- Sens longitudinal : le nombre de véhicules du convoi n'est pas limité et la distance entre deux véhicules successifs du convoi est limitée à 30.50m.

On appliquera le coefficient de majoration dynamique, mais ni effort de freinage, ni forces centrifuge

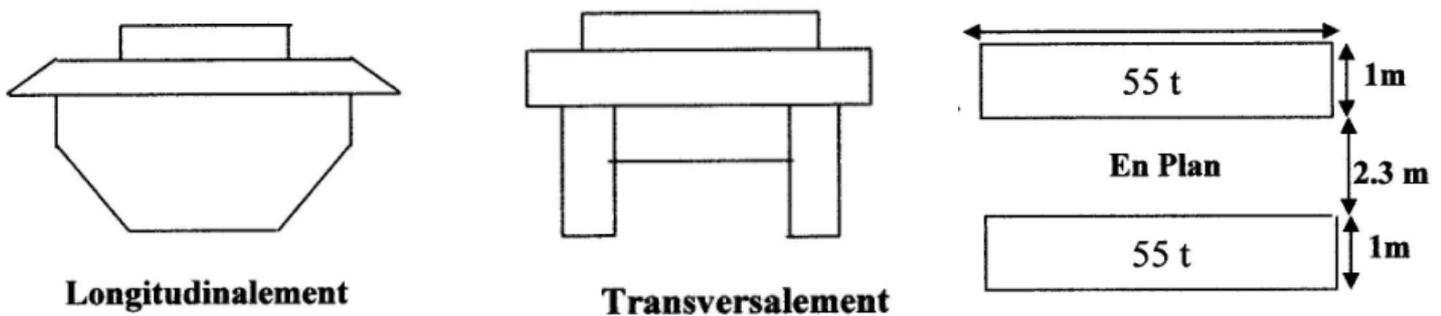


Figure 3-3 disposition du système MC120 selon le fascicule 61 titre II

**Calcul pour le système militaire MC120**

D'où :

$$L = 19\text{m}$$

$$G = 359.6 \text{ t}$$

$$S = 55 + 55 = 110 \text{ t}$$

$$\delta = 1 + (0.4 / (1 + 0.2 \times 19)) + 0.6 / (1 + 4(359.6 / 110)) = 1.128$$

$$Q_{/ml} = (110 \times 1.128) / 6.1 = 20.34 \text{ t/ml}$$

**III-3-5-4- Charges exceptionnelles :**

On distinguera le convoi de type D de 240 t et le convoi de type E de 400 t. Le convoi utilisé en Algérie est de type D. Il comporte une remorque de 3 éléments de 4 lignes à 2 essieux de 240 t de poids total. Ce poids est supposé réparti au niveau de la chaussée sur un rectangle uniformément chargé de 3,2m × 18,6 m

Il est supposé circuler seul, son axe à 3,5 m au minimum du bord de la chaussée, sans majoration dynamique, ni effort de freinage, ni force centrifuge.

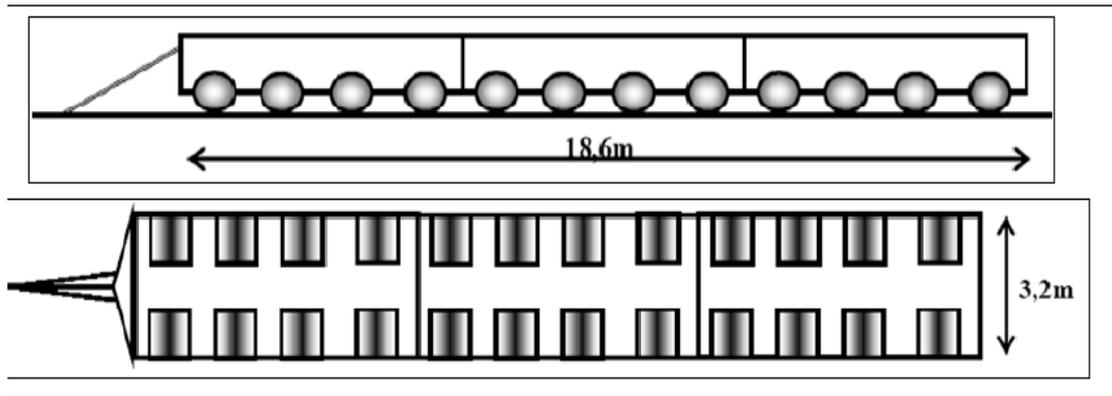


Figure 3-4 disposition du Convoi D240 selon le fascicule 61 titre II

**Calcul de Convoi D240 :**  $Q_{/ml} = 240 / 18.6 = 12.903 \text{ t/ml}$

**III-3-5-5-Surcharges sur trottoirs :**

Nous appliquons sur les trottoirs une charge uniforme de 150kg/m<sup>2</sup> de façon à produire l'effort maximal envisagé.

Les deux trottoirs peuvent ne pas être chargés simultanément

- 1 trottoir chargé  $p_1 = 0.15 \times 1.5 = 0.225 \text{ t}$
- 2 trottoirs chargés  $p_2 = 2(0.15 \times 1.5) = 0.45 \text{ t}$

**III-3- 6 Répartition longitudinale des moments :**

**III-3-6-1 Moments fléchissant dus aux poids propre du tablier**

$Q_{tb} = 17.98 \text{ t/ml} = 17.98 \times 19 = 341.62 \text{ t}$

D'où :  $R_a = R_b = 170.8 \text{ t}$

$M(x) = R_a X - QX^2 / 2$

Section (X)	La valeur du moment M(t.m)
0.00L	0.00
0.25L	608.46
0.50L	811.46

Tableau 3-6 valeurs du moment fléchissant du au poids propre dans différentes sections

III-3-6-2 Moments fléchissant dus aux surcharges d'exploitation :

a) Surcharges A(L) et trottoirs :

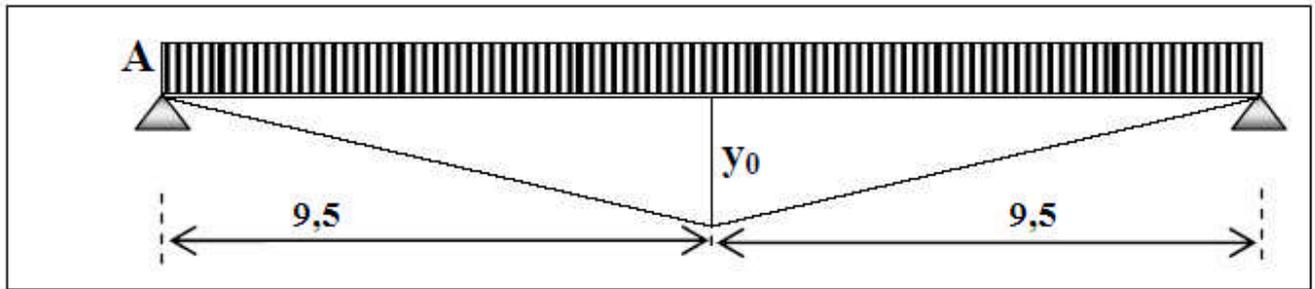


Figure 3-5 Répartition longitudinale de la surcharge A

$$Y_0 = (9.5)^2 / 19 = 4.75 \text{ m}$$

$$\sum Yi = 2((9.5 \times 4.75) / 2) = 45.12 \text{ m}^2$$

b) Système Bc :

**Théorème de Barré :** Le moment fléchissant est maximum au droit d'un essieu tel que cet essieu et la résultante du convoi se trouve symétriquement par rapport à l'axe de la poutre.

**Cas n° 01 :** La résultante se trouve à droite de l'axe de la poutre

La résultante du convoi **R=60 t**

$$X_r / A = [(12 \times 4.5) + (12 \times 6) + (6 \times 10.5) + (12 \times 15) + (12 \times 16.5)] / 60$$

$$X_r / A = 9.45 \text{ m}$$

$$a = 9.45 - 6 = 3.45$$

$$a' = 7.05 - 6 = 1.05$$

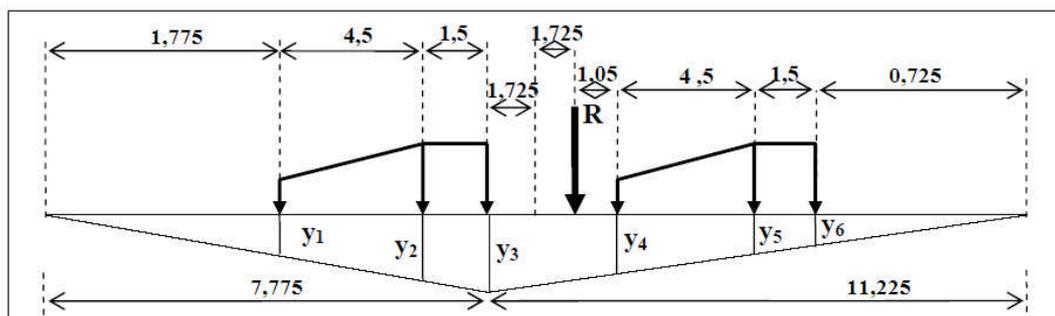


Figure 3-6 Répartition longitudinale de la surcharge BC (1er cas)

Pour cette position le moment fléchissant maximum est obtenu au niveau de l'essieu de 12 t qui est symétrique à « R » par rapport à l'axe de la poutre lorsque les deux voies sont chargées

$$y_3 = 7,775 \times 11,225 / 19 = 4.593 \text{ m}$$

$$y_1 = 1.775 \times y_3 / 7.775 = 1.048 \text{ m}$$

$$y_2 = 6,275 \times y_3 / 7.775 = 3.71 \text{ m}$$

$$y_4 = 6.725 \times y_3 / 11.225 = 2.74 \text{ m}$$

$$y_5 = 2,225 \times y_3 / 11,225 = 0.909 \text{ m}$$

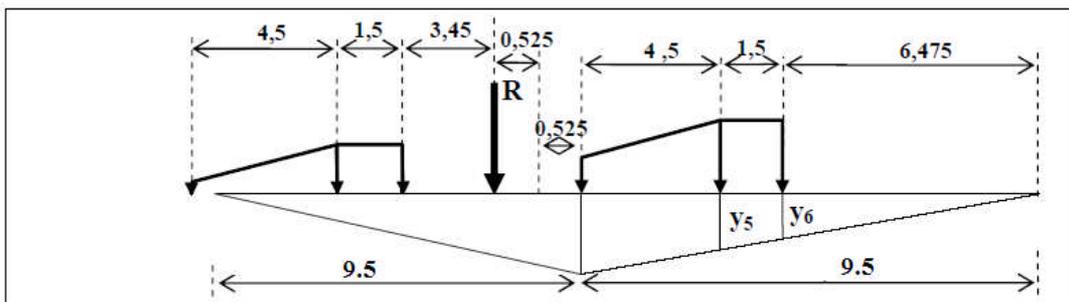
$$y_6 = 0.725 \times y_3 / 11,225 = 0.29 \text{ m}$$

$$\text{Essieux avant : } \Sigma y_{iav} = y_1 + y_4 = 3.78 \text{ m}$$

$$\text{Essieux arrière : } \Sigma y_{iar} = y_2 + y_3 + y_5 + y_6 = 6.85 \text{ m}$$

$$\text{Moment maximal sous l'essieu 3 (2 voies chargées) : } M = (\Sigma y_i P_i) = 104,88 \text{ t.m}$$

**Cas n° 02 : La résultante se trouve à gauche de l'axe de la poutre :**



**Figure 3-7 Répartition longitudinale de la surcharge BC (2eme cas)**

$y_1 = 0$  car : le premier essieu est hors la travée considérée.

$$y_4 = 4.75 \text{ m}$$

$$y_2 = 1.75 \text{ m}$$

$$y_3 = 2.5 \text{ m}$$

$$y_5 = 3.98 \text{ m}$$

$$y_6 = 0.32 \text{ m}$$

$$\text{Essieux avant : } \Sigma y_{iav} = y_1 + y_4 = 4.75 \text{ m}$$

$$\text{Essieux arrière : } \Sigma y_{iar} = y_2 + y_3 + y_5 + y_6 = 8.55 \text{ m}$$

$$\text{Moment maximal sous l'essieu 3 (2 voies chargées) : } M = (\Sigma y_i P_i) = 131,1 \text{ t.m}$$

## c) Système MC120 :

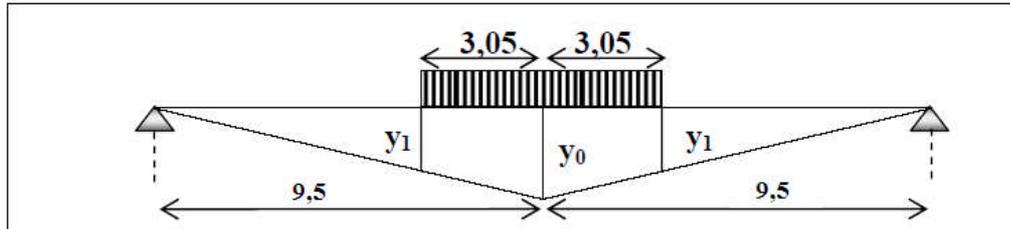


Figure 3-8 Répartition longitudinale de la surcharge MC120

$$Y_0 = 4.75 \text{ m}$$

$$Y_1 = 3.225 \text{ m}$$

$$\sum Y_i = 24.323 \text{ m}^2$$

$$M = 2 [(y_0 + y_1) \times 3,05 / 2] \times 124,08 / 6,10 = 494.769 \text{ t.m}$$

## d) Charge exceptionnelle D240 :

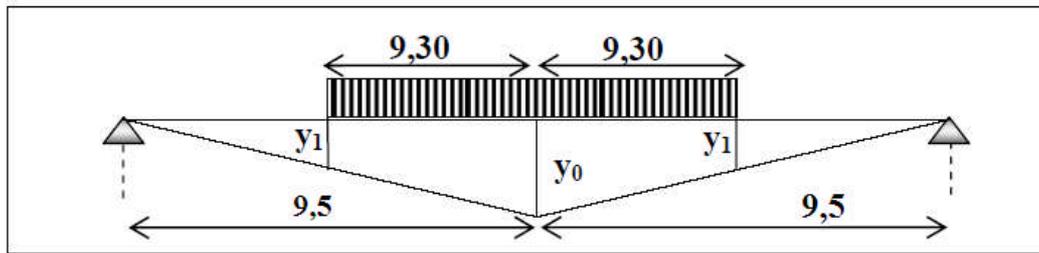


Figure 3-9 Répartition de surcharge D240

$$Y_0 = 4.75 \text{ m}$$

$$Y_1 = 0.1 \text{ m}$$

$$\sum Y_i = 22.55 \text{ m}^2$$

$$M = 2 [(y_0 + y_1) \times 9.3 / 2] \times 240 / 18.6 = 582 \text{ t.m}$$

### III-3-7 Répartition transversale des moments :

Après avoir évalué les efforts longitudinaux les plus défavorables en différentes sections, nous procédons à la répartition transversale de ces efforts sur les différentes poutres, afin de trouver la poutre la plus sollicitée, pour cela nous utiliserons l'une des méthodes disponibles selon la rigidité de l'entretoise.

Le choix de la méthode adéquate, pour la répartition transversale des efforts longitudinaux, dépend du coefficient de rigidité des entretoises noté  $\theta$ .

Ce coefficient est calculé comme suit :

On pose :

$$i_p = \frac{I_p}{v}$$

$$i_e = \frac{I_e}{u}$$

$$\theta = \frac{n_p \cdot v}{2L} \times \sqrt[4]{\frac{i_p}{i_e}}$$

Avec :

- ◆  $n_p$  : Nombre de poutres principales.
- ◆  $v$  : Entraxe des poutres.
- ◆  $u$  : Entraxe des entretoises.
- ◆  $L$  : Portée des poutres principales
- ◆  $I_p$  : Moment d'inertie d'une poutre.
- ◆  $I_e$  : Moment d'inertie d'une entretoise

Si  $\theta \leq 0,3$  on considère que les entretoises ont une rigidité infinie, on applique donc la méthode de J.COURBON

Si  $\theta > 0,3$  on applique des méthodes de calcul qui tiennent compte de la rigidité réelle des entretoises, (la méthode de GUYON MASSONNET)

Dans notre cas de calcul :

- $n_p$  : 7 poutres
- $v$  : Entraxe des poutres = 1.44m
- $u$  : Entraxe des entretoises = 0
- $L$  : Portée des poutres principales = 19m
- $I_p$  : Moment d'inertie d'une poutre = 0.04 m<sup>4</sup>

On trouve  $\theta = 0 \leq 0,3$  donc les entretoises ont une rigidité infinie, on applique la méthode de COURBON

**Méthode de J.COURBON :**

La méthode de J.COURBON est basée sur la théorie des poutres infiniment rigides sur appuis élastiques. Les hypothèses d'application de cette méthode sont les suivantes :

1. La largeur du pont doit être nettement inférieure à sa longueur.
2. Les entretoises sont supposées infiniment rigides vis à vis des poutres et leurs déformations négligeables devant celles des poutres.
3. Les poutres doivent être parallèles soumises aux mêmes liaisons et reliées perpendiculairement aux entretoises.
4. Les poutres doivent répondre à la même loi de variation.

Le moment longitudinal est réparti transversalement comme suit :

$$M_{\text{réparti}} = M_{\text{longitudinalement}} \cdot rk_j \quad \text{tel que :} \quad rk_j = \frac{1}{np} \cdot \left( 1 + 6 \cdot \frac{-np+2j-1}{np^2-1} \cdot \frac{e}{v} \right)$$

Ou :

$rk_j$  : Coefficient de répartition transversale

$np$  : nombre de poutres

$j$  : numéro de la poutre

$e$  : excentricité du chargement considéré.

$v$  : entraxe des poutres.

Application de la méthode de J. COURBON pour notre cas de calcul :

Calcul de coefficient  $rk_j$ , et les moments pour chaque cas de surcharge :

- 1) Poids propre
- 2) Surcharge A, avec : une voie chargée et 2voies chargées
- 3) Surcharge Bc, avec : une file et 2files.
- 4) Charges militaires (Mc120)
- 5) Charges exceptionnelles (D240)
- 6) Chargement d'un seul trottoir
- 7) Chargement de deux (2) trottoirs

Les valeurs de coefficient $r_{kj}$								
Poutres		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Surcharges								
Poids propre		0.143	0.143	0.143	0.143	0.143	0.143	0.143
Surcharge A	1voie chargée	0.031	0.068	0.106	0.143	0.180	0.217	0.254
	2voies chargées	0.143	0.143	0.143	0.143	0.143	0.143	0.143
Surcharge Bc	1file	0.087	0.106	0.124	0.143	0.161	0.180	0.199
	2files	0.143	0.143	0.143	0.143	0.143	0.143	0.143
Charges militaires (Mc120)		0.143	0.143	0.143	0.143	0.143	0.143	0.143
Charges exceptionnelles (D240)		0.143	0.143	0.143	0.143	0.143	0.143	0.143
Chargement des trottoirs	1trottoir	- 0.173	-0.068	0.037	0.143	0.248	0.354	0.459
	2trottoirs	0.143	0.143	0.143	0.143	0.143	0.143	0.143

**Tableau 3-7** tableau récapitulatif représente les différentes valeurs du coefficient  $r_{kj}$  dans chaque poutre.

Les combinaisons	Le moment reparti pour chaque poutre (en t.m)						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Poids propre sans trottoirs	156.496	156.496	156.496	156.496	156.496	156.496	156.496
Poids propre + 1 trottoir	155.569	156.801	158.034	159.266	160.499	161.731	162.964
Poids propre + 2 trottoirs	161.588	161.588	161.588	161.588	161.588	161.588	161.588
Poids propre + chargement A (1voie) sans trottoirs	143.940	181.608	219.277	256.946	294.615	332.284	369.953
Poids propre + chargement A (1voie) + 1 trottoir	138.865	178.998	219.132	259.266	299.400	339.534	379.668
Poids propre + chargement A (1voie) + 2 trottoirs	148.582	186.251	223.920	261.588	299.257	336.926	374.595
Poids propre + chargement A (2voie) sans trottoirs	256.946	256.946	256.946	256.946	256.946	256.946	256.946
Poids propre + chargement A (2voie) + 1 trottoir	255.569	256.801	258.034	259.266	260.499	261.731	262.964

Les combinaisons	Le moment reparti pour chaque poutre (en t.m)						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Poids propre + chargement A (2voie) + 2 trottoirs	261.588	261.588	261.588	261.588	261.588	261.588	261.588
Poids propre + chargement Bc (1file) sans trottoirs	153.389	162.710	172.032	181.354	190.676	199.998	209.320
Poids propre + chargement Bc (1file) + 1 trottoir	148.314	160.100	171.887	183.674	195.461	207.248	219.035
Poids propre + chargement Bc (1file) + 2 trottoirs	158.031	167.353	176.675	185.997	195.319	204.641	213.962
Poids propre + chargement Bc (2file) sans trottoirs	181.354	181.354	181.354	181.354	181.354	181.354	181.354
Poids propre + chargement Bc (2file) + 1 trottoir	179.977	181.209	182.442	183.674	184.907	186.139	187.372
Poids propre + chargement Bc (2file) + 2 trottoirs	185.997	185.997	185.997	185.997	185.997	185.997	185.997
Poids propre + chargement militaire Mc120	256.571	256.571	256.571	256.571	256.571	256.571	256.571
Poids propre + chargement exceptionnel D240	289.490	289.490	289.490	289.490	289.490	289.490	289.490

**Tableau 3-8** tableau récapitulatif représente les différentes valeurs des moments dans chaque poutre.

### III-3-8 Etude d'une poutre du tablier réparée par TFC

#### III-3-8-1 Conditions de conception et de calcul :

##### a) Justification à la rupture

Cette justification consiste en une vérification de l'élément à la rupture, toutes redistributions effectuées, et sans tenir compte du renforcement sous la combinaison  $G + \sum \psi_i Q$ , ou G représente la sollicitation due à la charge permanente et  $\sum \psi_i Q$ , celle due aux charges de courte durée d'application, y compris s'il y a lieu les charges climatiques et celles dues aux instabilités.

Toutefois, cette justification n'est pas à effectuer si :

- $R_1 \geq 0.63$  (S2), dans le cas d'un élément principal, dont la rupture est susceptible d'entraîner celle d'autres éléments (poutre porteuse, par exemple).

-  $R_1 \geq 0.50$  (S2), dans le cas d'un élément secondaire, dont la rupture n'est pas susceptible d'entraîner celle d'autres éléments (panneaux de dalles de planchers posés sur poutres, par exemple) [17]. Avec, dans ces expressions :

R1 : capacité résistante à l'ELU de l'élément non renforcé.

S2 : sollicitation agissante à l'ELU sur l'élément renforcé.

### **b) Renforcement vis à vis du moment de flexion**

Les justifications à effectuer, vis-à-vis du moment de flexion, pour les éléments en béton renforcé par le procédé TFC, sont les suivantes :

#### **❖ Calcul à l'ELS**

Ce calcul est effectué selon les hypothèses classiques du béton armé, en tenant compte de l'historique du chargement et du renforcement (y compris un éventuel déchargement ou vérinage provisoire en cours de travaux). Ceci conduit à superposer les états de contraintes relatifs aux deux situations suivantes :

Ouvrage non renforcé, soumis aux sollicitations initiales, appliquées au moment où l'on entame les travaux de renforcement.

Ouvrage renforcé, soumis aux sollicitations additionnelles. Cette justification est menée en prenant en compte un coefficient de sécurité de 3 sur la contrainte à rupture du composite TFC, et en limitant la contrainte finale dans les armatures tendues existantes aux valeurs suivantes :

Cas de la fissuration peu préjudiciable  $f_e$ .

Cas de la fissuration préjudiciable, la limitation prévue à l'article A.4.5, 33 des Règles BAEL91.

La contrainte de béton est limitée à  $0.6F_{cj}$ .

#### **❖ Calcul à l'ELU**

Calcul est mené conformément aux détails donnés dans le dossier technique établi par le demandeur, en plus des hypothèses classiques sur le béton et acier, la déformation du TFC est limitée à 10‰ et le coefficient de sécurité adopté sur la contrainte à cet allongement est de 1.25.

❖ Vérification du glissement à l'interface composite-béton, cette vérification consiste à s'assurer que la contrainte de cisaillement due au moment de flexion, à l'interface composite- béton n'excède pas la valeur 2MPa. Cette valeur doit être validée dans tous les cas par des essais de pastillage à effectuer in situ, sur le support après préparation, dans l'état dans lequel il est destiné à recevoir le renforcement.

### III-3-8-2 Condition de mise en œuvre :

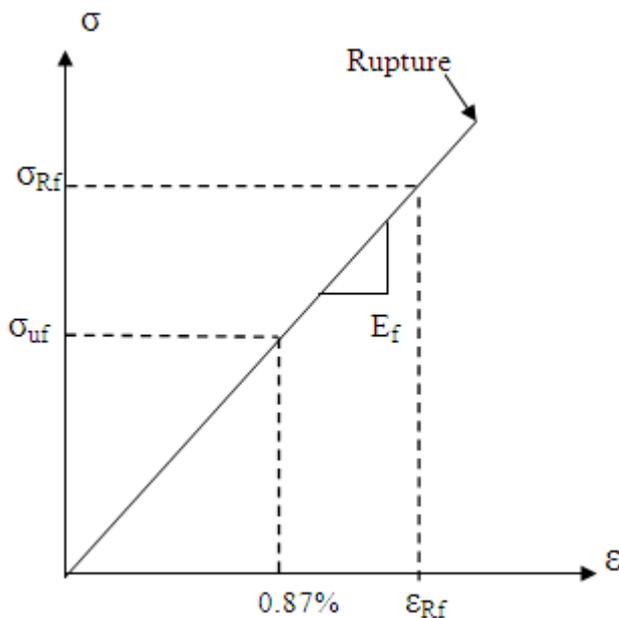
Elle doit être effectuée dans les strictes conditions définies dans le dossier technique établi par le demandeur, notamment pour ce qui concerne le nettoyage et la préparation des supports ainsi que la réalisation des essais de convenances sur même support. Il est précisé que ces essais doivent être effectués pour chaque chantier et pour tous les supports [17].

### III-3-8-3 Dimensionnement dans le cas du béton armé

Le calcul des structures en béton armé renforcées par du TFC se fait selon les règles et les principes du BAEL91, la vérification s'appuie sur les hypothèses fondamentales du calcul du béton armé, à savoir :

- Le béton tendu est négligé dans l'équilibre des sections.
- Les sections planes restent planes après déformation (hypothèse de Navier-Bernouilli).
- Non glissement de l'acier et du TFC par rapport au béton.
- Les combinaisons de charges sur les structures, les lois de comportement et les coefficients de sécurité sur l'acier et le béton sont ceux donnés par le BAEL [17].

#### a) Loi de comportement du TFC



$$E_f = \sigma_{Rf} / \epsilon_{Rf} \text{ , module de Young} = 105000 \text{ MPa}$$

Avec :

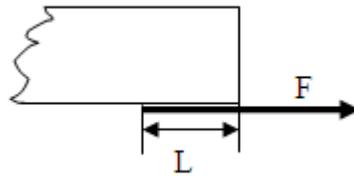
$\sigma_{Rf}$  : Résistance garantie à la rupture du TFC.

$\epsilon_{Rf}$  : Déformation à la rupture du TFC

$\sigma_{uf} = 913 \text{ MPa}$ , contrainte de traction du TFC admissible à l'ELU

Figure 3-10 Loi de comportement du TFC

**b) Adhérences TFC –béton et contrainte de cisaillement admissible**



**Figure 3-11 Adhérences TFC –béton**

La longueur d’ancrage du TFC, L, est au moins égale 100mm pour un béton sain ( $f_c \geq 25\text{MPa}$ )

Dans le cas d’un béton de moindre résistance, on prévoira sur site une longueur d’ancrage de  $L=150\text{mm}$  (les justifications vis-à-vis de contraintes de cisaillement à l’interface seront néanmoins effectuées avec  $L=100\text{mm}$  dans tous les cas).

La contrainte de cisaillement admissible dans le béton due à l’adhérence est :

ELS :  $\tau \leq \bar{\tau} = 1.5\text{MPa}$

ELU :  $\tau \leq \bar{\tau} = 2\text{MPa}$

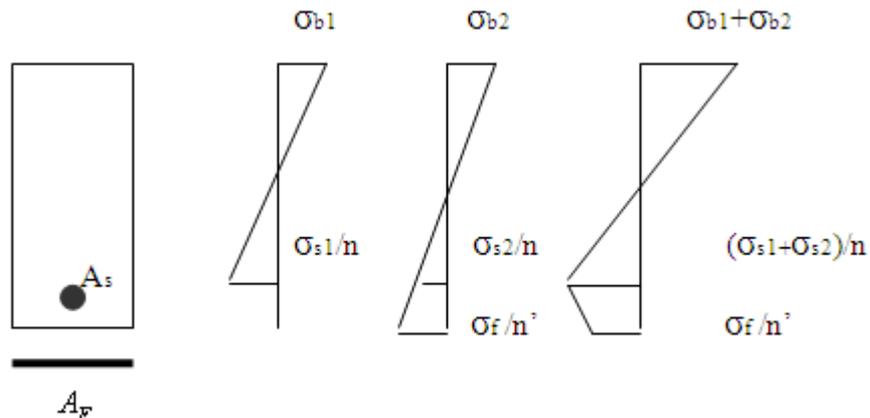
**d) Calcul à la flexion**

**Flexion à l’Etat limite de service (ELS)**

Le moment (M) appliqué à une section donné se décompose en :

- un moment (M1) avant renforcement
- un moment (M2) après renforcement

On a  $M=M1+M2$



L'état de contrainte totale dans les matériaux résulte de la combinaison des contraintes sous la sollicitation M1 sans le renfort de TFC et des contraintes sous la sollicitation M2 avec le renfort de TFC.

Il faut vérifier que :

$$\sigma_{s1} + \sigma_{s2} \leq \bar{\sigma}_s$$

$$\sigma_{b1} + \sigma_{b2} \leq \bar{\sigma}_b$$

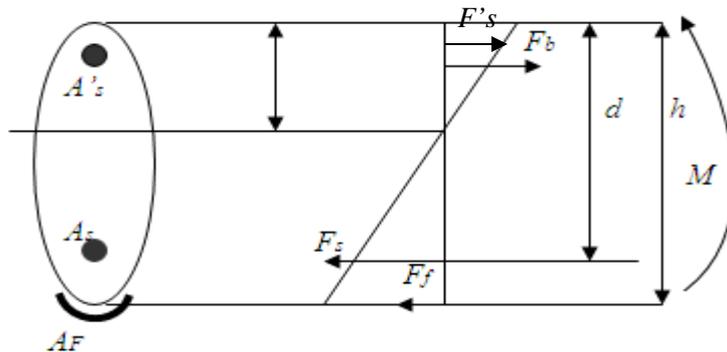
$$\sigma_f \leq \bar{\sigma}_f$$

$\bar{\sigma}_s$  : contrainte admissible dans les aciers existants selon les règles BAEL en fonction de l'état de fissuration et limitée à  $f_e$

$\bar{\sigma}_b$  : contrainte admissible dans le béton =  $0.6f_{cj}$ .

$\bar{\sigma}_f$  : contrainte admissible dans le TFC =  $450\text{MPa}$ .

**Calcul des contraintes dans un cas général**



Tel que :

M : moment sollicitant

S<sub>b</sub> : contrainte en fibre supérieure du béton comprimé

A<sub>s</sub> : section de l'acier en zone tendue

A<sub>s</sub>' : section de l'acier en zone comprimée

A<sub>f</sub> : section du TFC

La section est en équilibre lorsque :

$$\begin{matrix} \rightarrow & \rightarrow & \rightarrow & \rightarrow & \rightarrow \\ F_b + F_s + F_s' + F_f = 0 \end{matrix}$$

Avec

$$\sigma_b = \frac{M.e}{I}$$

$$\sigma_s = n.M \left( \frac{e-d}{I} \right)$$

$$\sigma_f = n'.M \left( \frac{e-h}{I} \right)$$

or  $F_b = \int_0^e y.\sigma b.b(y).dy$

$$F_s = A_s.\sigma_s$$

$$F_f = A_f.\sigma_f$$

$$F_{s'} = A_{s'}.\sigma_{s'}$$

$\sigma_s$  : contrainte dans l'acier comprimé

$\sigma_{s'}$  : contrainte dans l'acier tendu

$\sigma_f$  : contrainte de traction dans le TFC

$n$  : coefficient d'équivalence entre acier et béton (rapport de module=15)

$n'$  : coefficient d'équivalence entre TFC et béton =7.5

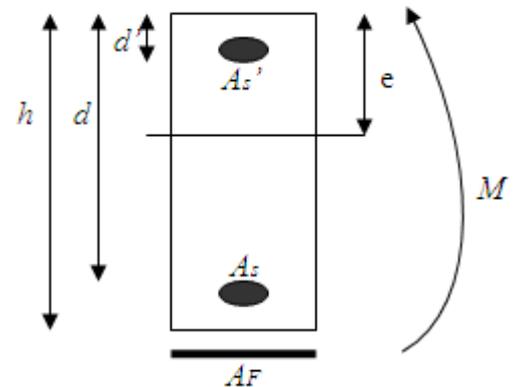
$I$  : inertie totale de la section = $I_b$  (béton) + $I_s$  (acier) + $I_f$  (TFC)

**Cas d'une section rectangulaire**

$$\frac{e^2}{2} + (nA_s + nA_{s'} + n'A_f)e - nA_s d - nA_{s'} d' - n'A_f.h = 0$$

$$I = \frac{be^3}{3} + nA_s(d-e)^2 + nA_{s'}(d'-e)^2 + n'A_f.(h-e)^2$$

$$\sigma_b = \frac{M.e}{I} \quad \sigma_s = \frac{-nM(d-e)}{I} \quad \sigma_f = \frac{-n'M(h-e)}{I}$$



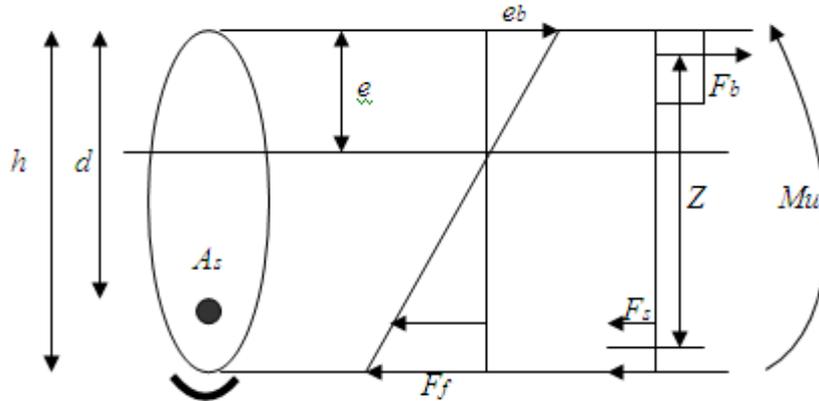
**Flexion à l'état limite ultime :**

Les vérifications ultimes et les calculs doivent respecter la règle des 3 pivots du BAEL.

La déformation ultime du TFC est égale à 1,3% ; elle est supérieure à celle qui correspond au pivot A au sens du BAEL [17].

Le dimensionnement à l'ELU, en cas de flexion simple, s'obtient en divisant le moment fléchissant de calcul par le bras de levier Z de la section.

La force obtenue doit être équilibrée par les armatures existantes et le TFC :



$$F_u = \frac{M_u}{Z}$$

$$F_u = F_s + F_f$$

D'où la détermination de  $F_f$ , force à reprendre par le TFC avec :

$\sigma_{uf} = 913 \text{ MPa}$  (contrainte correspondant à l'allongement de 1%)

$\gamma_f = 1,15$ , coefficient de sécurité partiel du TFC.

La section de TFC nécessaire pour assurer l'équilibre est :  $A_f = \frac{F_f}{\sigma_{uf}}$

En exprimant  $F_f$  en newtons et  $A_f$  en  $\text{mm}^2$ , on obtient simplement :  $A_f = F_f \times 1,1 \times 10^{-3}$

Le dimensionnement du TFC en flexion composée s'effectue de la même manière, en égalisant la somme  $F_b - F_s - F_f$  à la sollicitation d'effort normal.

Le TFC doit être prolongé, au-delà de la section renforcée à la flexion, d'une distance minimum de sécurité égale à 20cm [17].

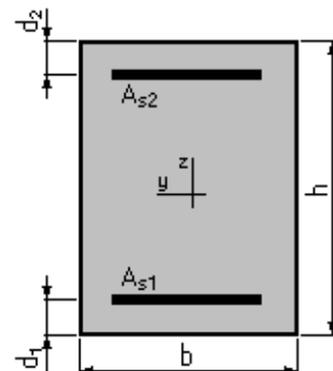
### III-3-8-4 Calcul du TFC

a) vérification des contraintes de la poutre intermédiaire :

$b = 0,36 \text{ (m)}$

$h = 1,30 \text{ (m)}$

$d_1 = 0,05 \text{ (m)}$



$$d_2 = 0,05 \text{ (m)}$$

Pour le calcul des éléments de la poutre, l'ENGOA a utilisé le logiciel SAP2000 pour la modélisation qui a donné comme résultat :

**Cas ELS** :  $M_{\max} = 251,78 \text{ (T}\cdot\text{m)}$

Section théorique  $A_{s1} = 107,85 \text{ (cm}^2\text{)}$

Section théorique  $A_{s2} = 0,00 \text{ (cm}^2\text{)}$

Coefficient de sécurité: 1,00

Position de l'axe neutre:  $e = 0,48 \text{ (m)}$

Bras de levier:  $Z = 1,14 \text{ (m)}$

Contrainte maxi du béton:  $\sigma_b = 8,4 \text{ (MPa)}$

Contrainte limite:  $0,6 f_{cj} = 15,0 \text{ (MPa)}$

Contrainte de l'acier tendue:  $\sigma_s = 201,6 \text{ (MPa)}$

Contrainte limite de l'acier:  $\sigma_{s \text{ lim}} = 201,6 \text{ (MPa)}$

### Soit 4\*4 HA32

section rectangulaire homogène :

$$\sigma_s = n \cdot M_{\max} \cdot \frac{e}{I}, \text{ Tel que : } e = \text{axe neutre, } \frac{e^2}{2} + (nA_s + nA'_s)e - nA_s d - nA'_s d' = 0$$

$$I = \text{moment d'inertie à l'état service, } I = \frac{be^3}{3} + nA_s(d-e)^2 + nA'_s(d'-e)^2$$

$$D'où : \sigma_s = 15 \times 2.5178 \times \frac{1}{15} = 194.5 \text{ MPa}$$

$\sigma_s \text{ théorique} \leq \sigma_s \text{ limite} = 201.6 \text{ MPa}$ , donc la section considérée ne nécessite pas un renforcement

### III-4-Conclusion :

Le calcul des différentes charges et surcharges, est l'une des principales étapes dans la conception des ponts. Une fois les charges et surcharges définies, on peut passer au calcul des différents moments sollicitant notre ouvrage.

La détermination du moment maximal aux états limites, nous permet de vérifier les contraintes dans les poutres pour voir s'il y a nécessité de renforcement ou non..

# CHAPITRE IV :

## *Programmation numérique*

## IV-1-Introduction :

En Novembre 1954, L'informatique commence à prendre de l'ampleur. Jusqu'alors, les langages de programmation sont restés proches du langage machine. La compagnie International Business Machines (IBM) publie la description d'un langage de programmation évolué appelé alors système de **FORmula TRANslator**. Ce nouveau langage, plus condensé, avait pour vocation d'ouvrir l'utilisation des ordinateurs aux scientifiques.[19]

C'est en 1956 qu'est apparu le premier manuel de référence de chez IBM. Ce manuel décrivait le FORTRAN I. Evidemment, ce langage était appelé à évoluer. C'est ainsi que, successivement, sont apparus:

- 1957: FORTRAN II
- 1958: FORTRAN III (Resté plus ou moins confidentiel)
- 1962: FORTRAN IV (Il aura régné 16 ans)
- 1978: FORTRAN V (Normalisation ANSI et AFNOR)

Durant toute cette évolution FORTRAN a respecté toutes les anciennes normes de manière à assurer une transplantation rapide des anciens programmes sur les nouveaux compilateurs.

## IV-2-Généralités :

### IV-2-1-Présentation du langage FORTRAN :

FORTRAN est le plus ancien langage de programmation évolué en activité. Il est très utilisé pour les applications requérant des calculs numériques intensifs, domaine où on ne lui connaît pas de concurrent sérieux.

Si la norme Fortran 77 a permis des progrès sensibles dans l'art de (bien) programmer avec Fortran, l'absence de réformes profondes le laissait techniquement désarmé pour affronter la dernière décennie du siècle. [18] Conscient de ce danger d'obsolescence, le groupe d'experts chargé de cette nouvelle révision lui a intégré quelques-uns des concepts actuels les plus puissants, comme la modularité (déjà présente en Ada et Pascal Étendu par exemple) et le calcul vectoriel.

Fortran 90 reste entièrement compatible avec la version antérieure (Fortran 77) du langage, ce qui permet d'exploiter l'existant, mais induit la possibilité de deux styles d'écriture des programmes. [18]

Toutefois, la nouvelle norme s'insère dans un processus d'évolution à long terme du langage, en dégageant un certain nombre de caractéristiques reconnues comme surannées, et susceptibles de disparaître lors de la prochaine révision de la norme ; le langage n'est donc pas voué à croître indéfiniment.

Ainsi dynamisé par ces apports novateurs, Fortran 90 demeure plus que jamais irremplaçable pour l'ensemble de la programmation numérique, scientifique et technique.

### IV-2-2-Structure d'un programme :

Un programme Fortran se compose de deux parties :une partie déclarative (la « liste des ingrédients ») et une partie exécutoire (la « recette »).

Un programme comporte généralement plusieurs modules. Ces modules peuvent figurer dans un même fichier ou dans des fichiers différents. Lorsque les modules figurent dans des fichiers individuels, il est possible, et c'est même fortement conseillé, de les réutiliser dans d'autres programmes.

L'inconvénient (mineur) est la nécessité d'emploi d'un fichier projet, chargé de communiquer à l'éditeur de liens les noms des différents modules à lier.[19]

Un ensemble de modules doit, pour pouvoir être exécuté, comporter un programme principal.

Le programme principal peut faire appel à des procédures et à des fonctions qui peuvent faire de même.

Un module comporte différentes parties :

- L'entête ou le nom du module. En FORTRAN on peut trouver:
  - **PROGRAM** nom du programme pour le programme principal
  - **SUBROUTINE** (Liste de paramètres) pour un sous-programme
  - **FUNCTION** (Liste de paramètres) pour une fonction
- Les déclarations des paramètres, s'il y a lieu
- Les déclarations des variables

Toute variable possède un type. Les types usuels sont les suivants :

- **INTEGER** nombre entier,
- **REAL** nombre réel, simple précision,
- **DOUBLE PRECISION** nombre réel, double précision,
- **COMPLEX** nombre complexe,
- **LOGICAL** variable booléenne,
- **CHARACTER** chaîne de caractères (lettres, chiffres, symboles, etc.).
- Les initialisations et déclarations particulières. Cette section est un peu particulière et sera traitée en fin de manuel.
- Les instructions exécutables. C'est la traduction en langage (FORTRAN) de l'algorithme.
- l'instruction FIN de module. En FORTRAN, il s'agit d'END.

Lorsque l'on écrit un programme, on utilise les lettres de l'alphabet, les chiffres et quelques signes. Les caractères reconnus par le compilateur sont :

- Les 36 caractères alphanumériques:
  - les 10 chiffres décimaux
  - les 26 lettres de l'alphabet
- Les caractères spéciaux:

= signe egal

+ plus

- moins

\* étoile

/ barre de fraction

() parenthèses

, virgule

. point

' apostrophe

: double point

Les mots clés du langage c'est le vocabulaire reconnu par le compilateur. Par exemple :

DATA, READ, PRINT, CONTINUE,

Une entrée de données correspond à l'instruction READ, une sortie à WRITE.

À chaque ordre READ, une nouvelle ligne du fichier à lire est examinée, et à chaque instruction WRITE, une nouvelle ligne est écrite sur le fichier destination.

FORTTRAN est un langage permettant l'utilisation de 5 types de variables intrinsèques:

REAL .....réels  
INTEGER .....entiers  
LOGICAL.....logiques  
COMPLEX .....complexes  
CHARACTER.....chaines de caractères

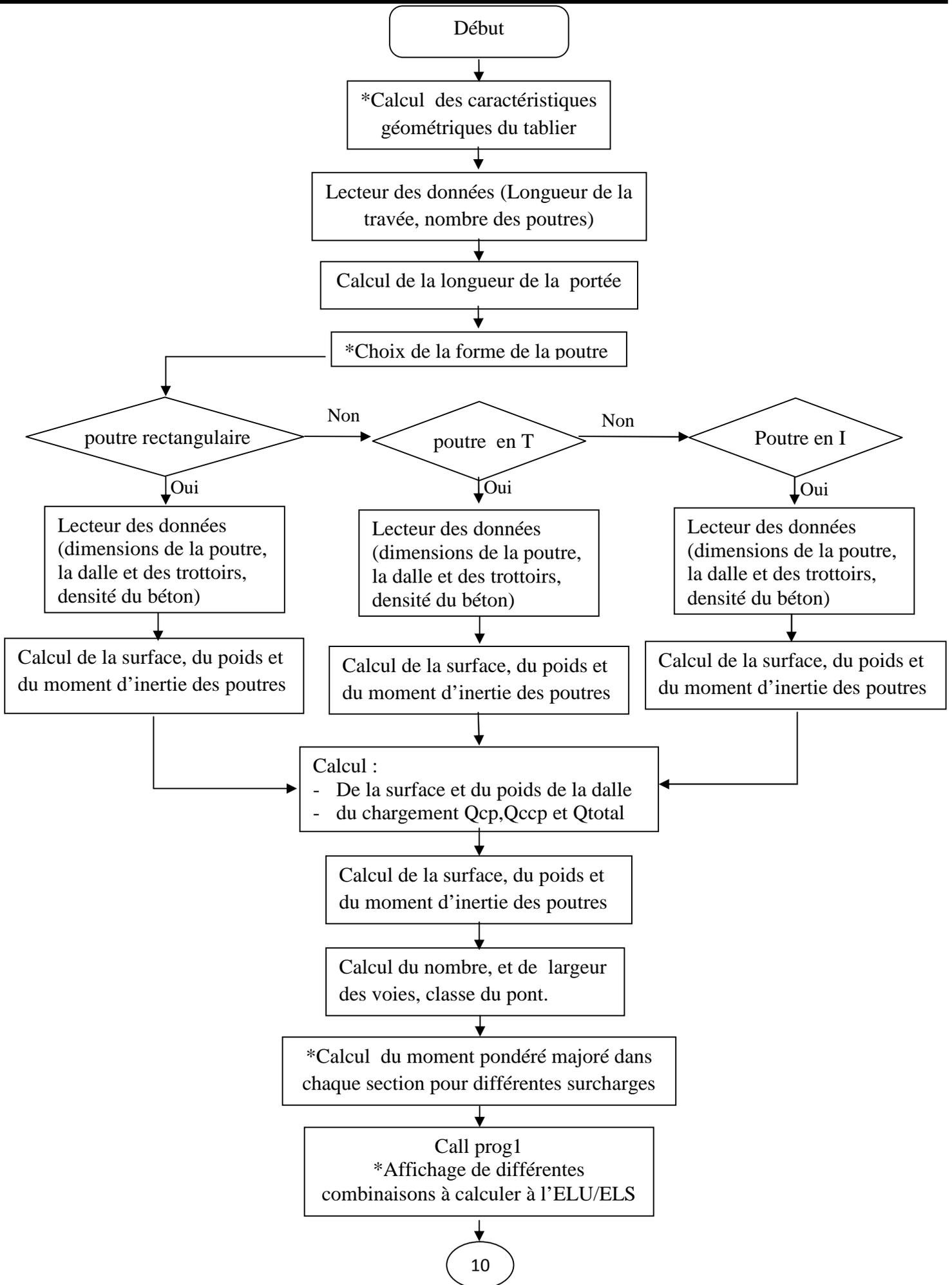
#### **IV-4- Organigramme de calcul :**

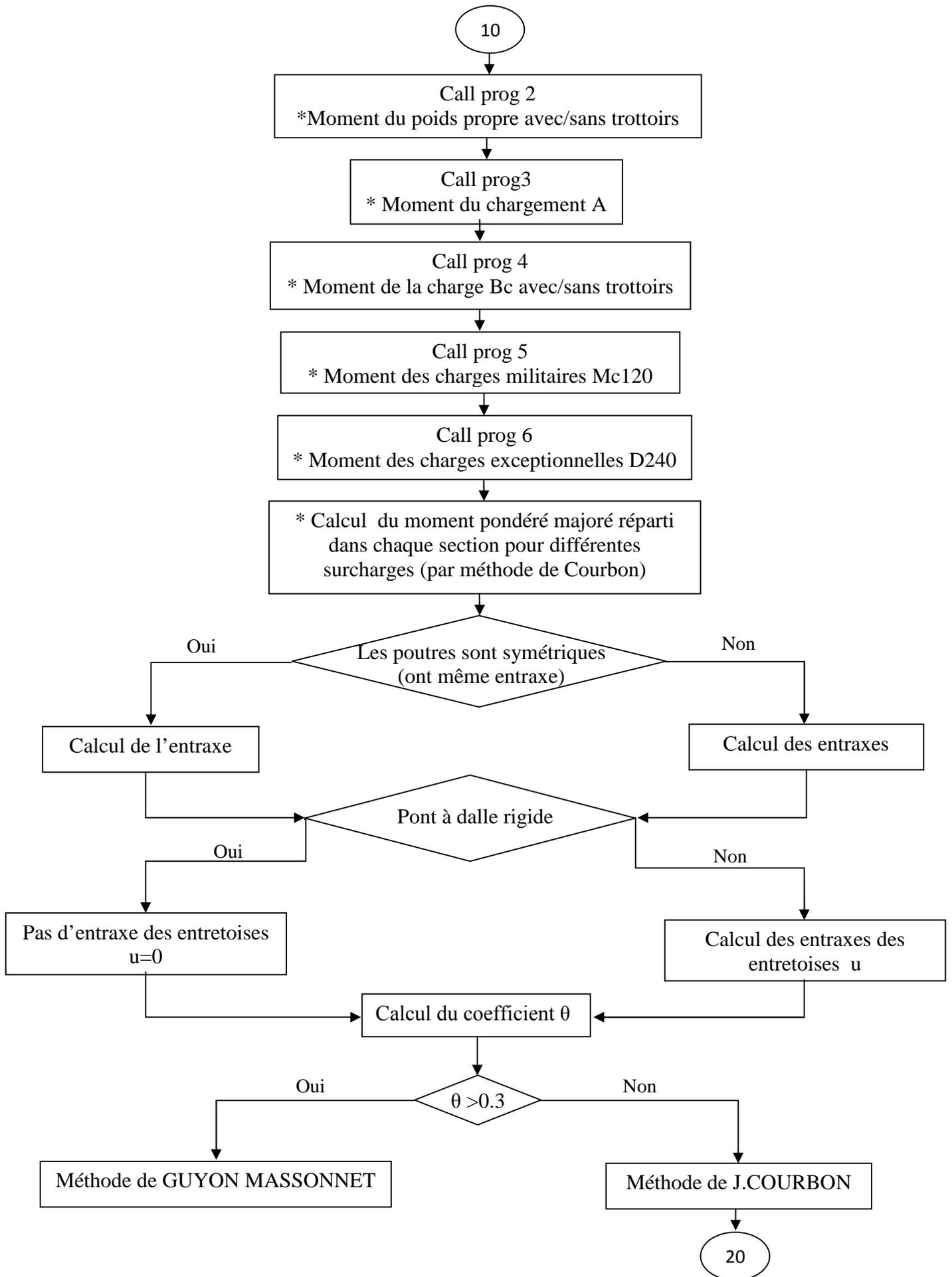
Un organigramme est une représentation graphique normalisée utilisée pour analyser ou décoder un problème, il est clair mais peu adapté aux systèmes complexes.

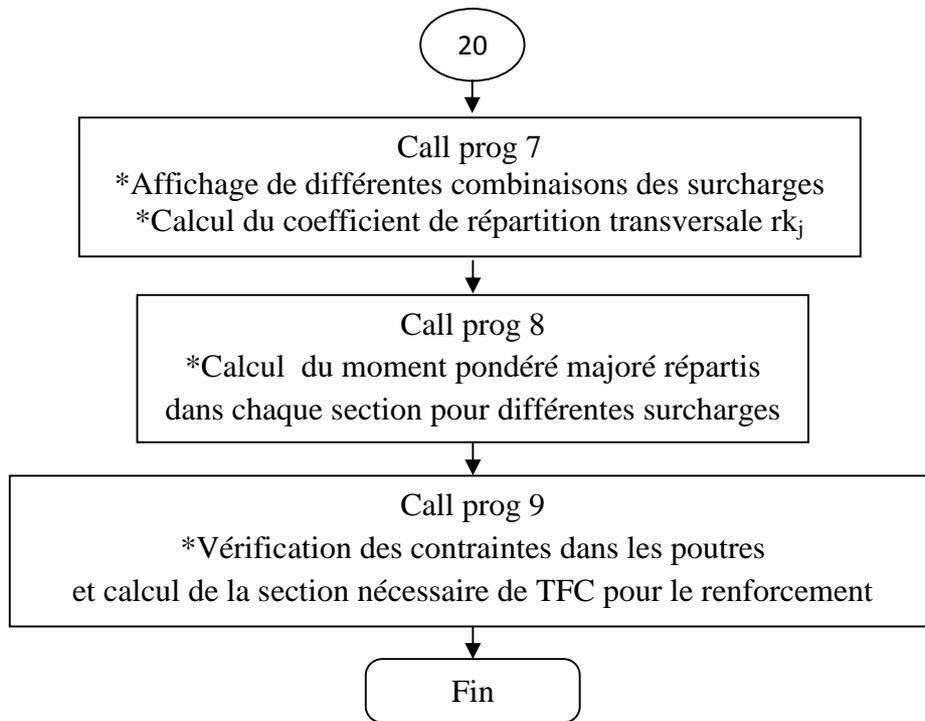
Un algorithme a les caractéristiques suivantes :

- Il comporte des liaisons fléchées
- Il est fermé
- Il comporte un début et une fin

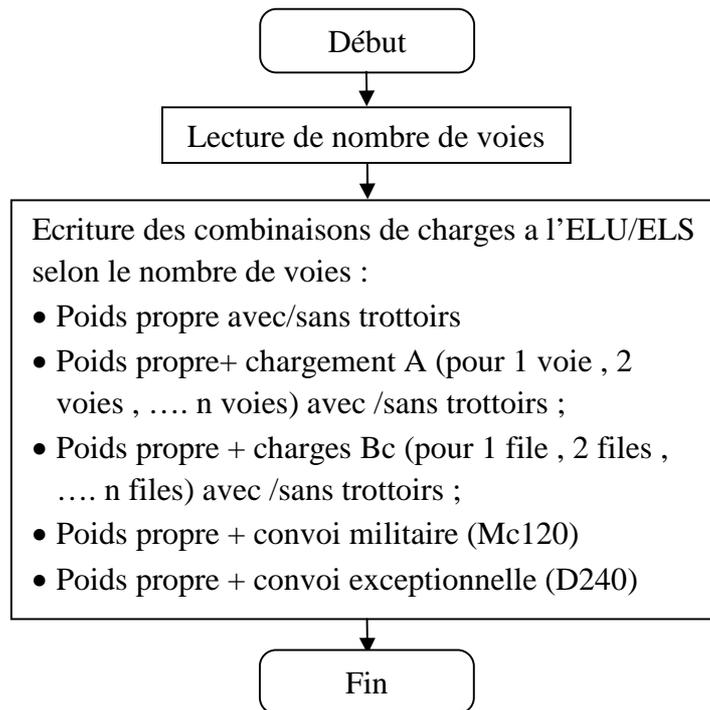
Afin d'illustrer le travail accompli nous proposons un organigramme général : (la page suivante)



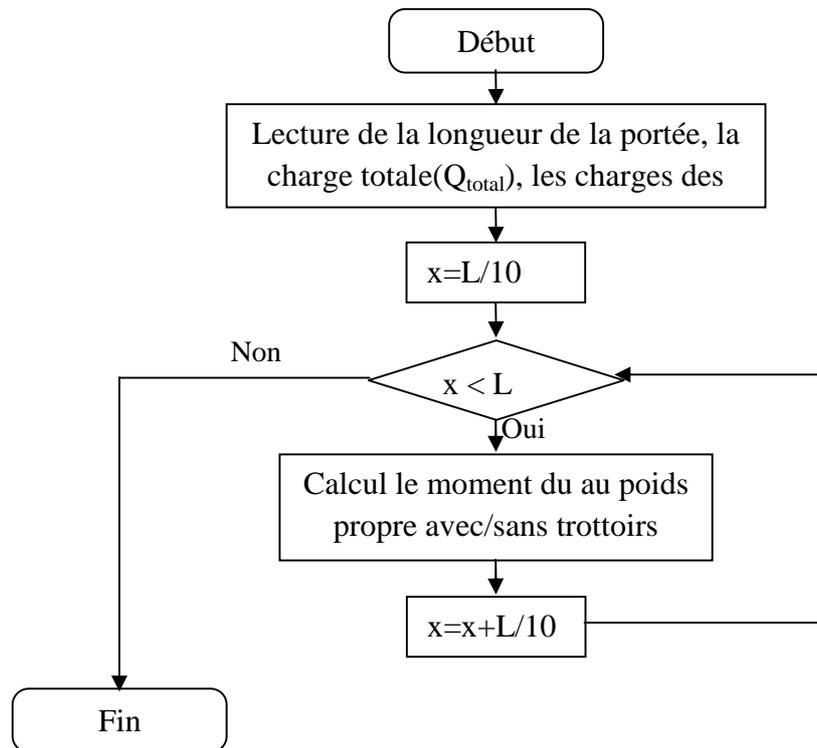




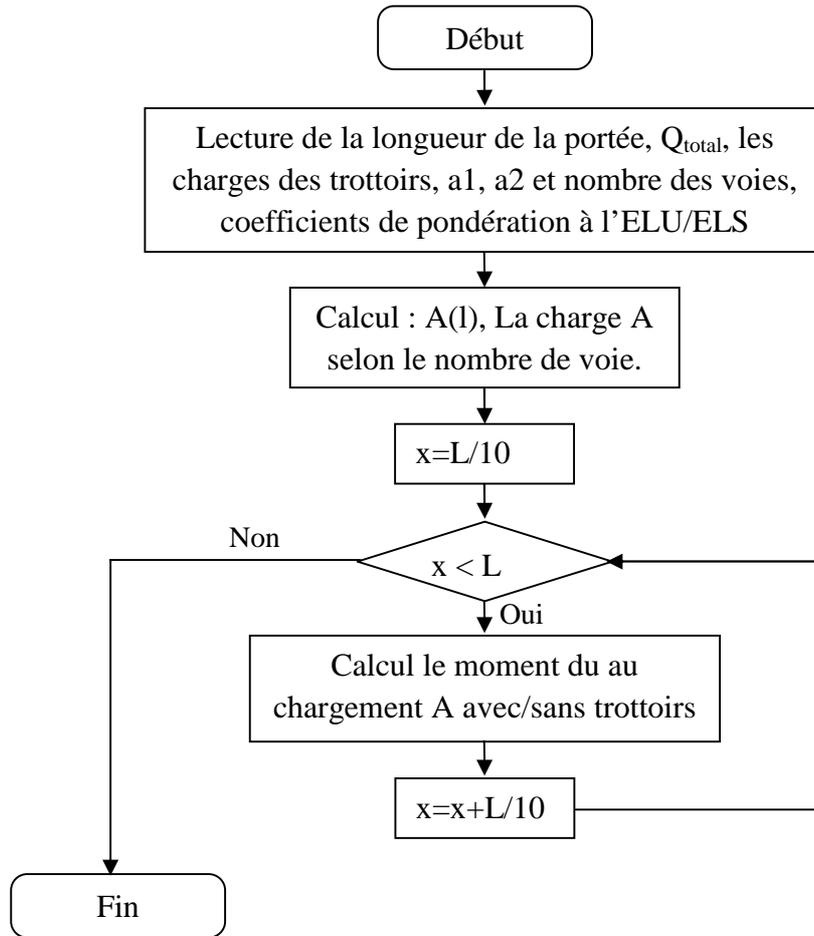
Prog 1 : Affichage de différentes combinaisons à calculer à l'ELU/ELS



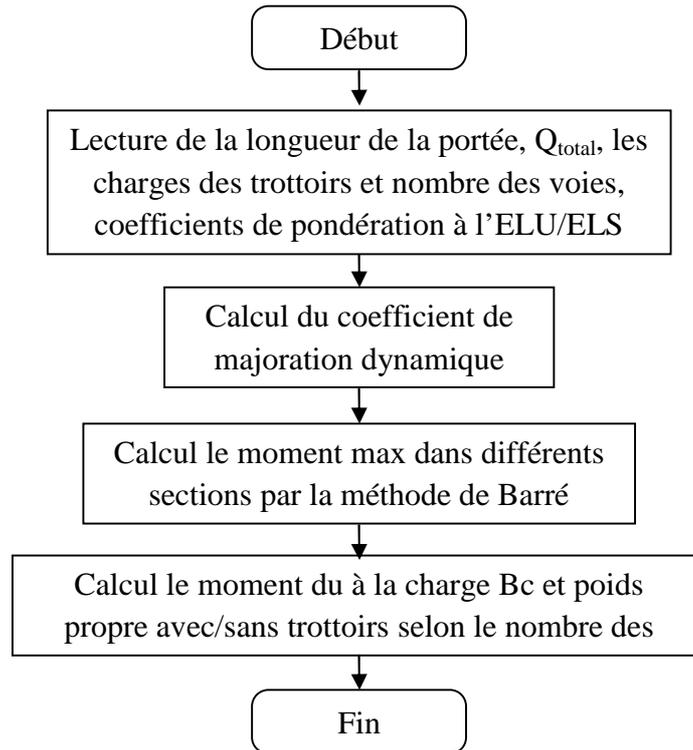
Prog 2 : Moment du poids propre avec/sans trottoirs



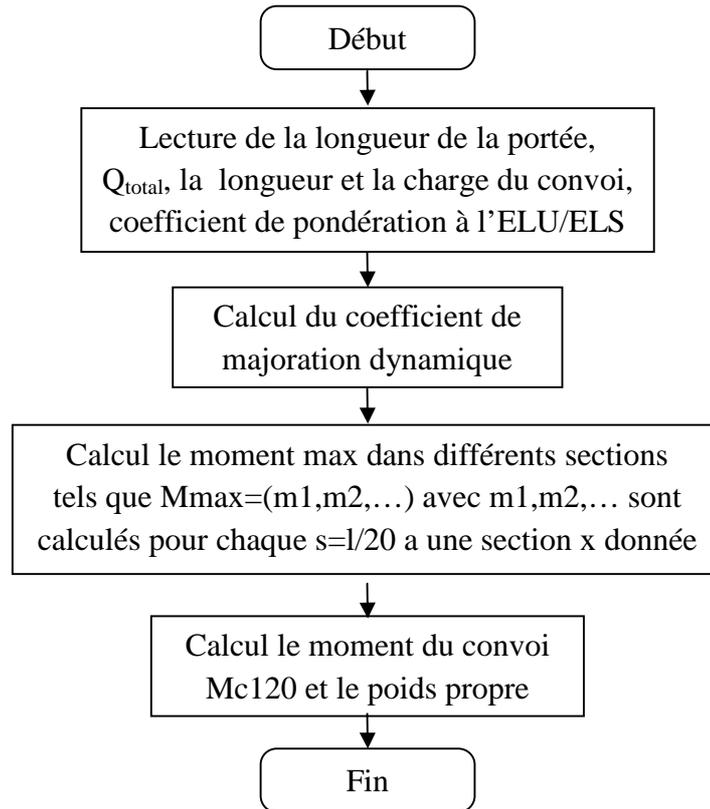
Prog 3 : Moment du chargement A



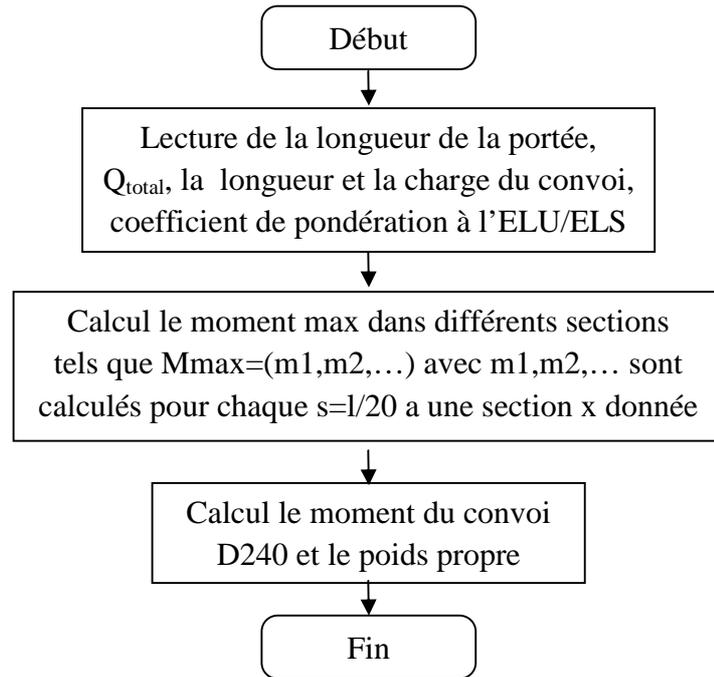
## Prog 4 : Moment de la charge Bc



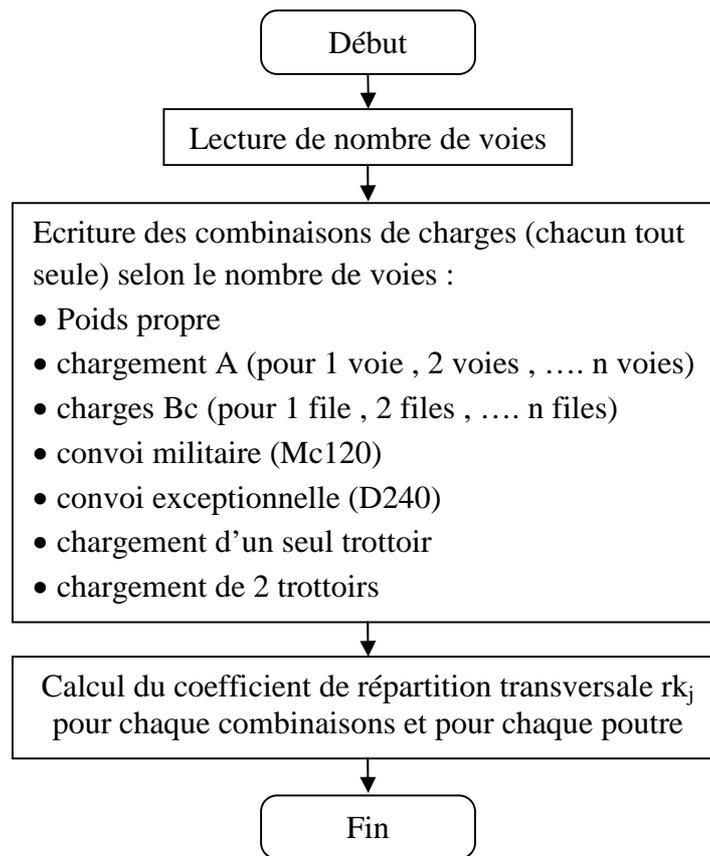
## Prog 5 : Moment du chargement du convoi militaire Mc120



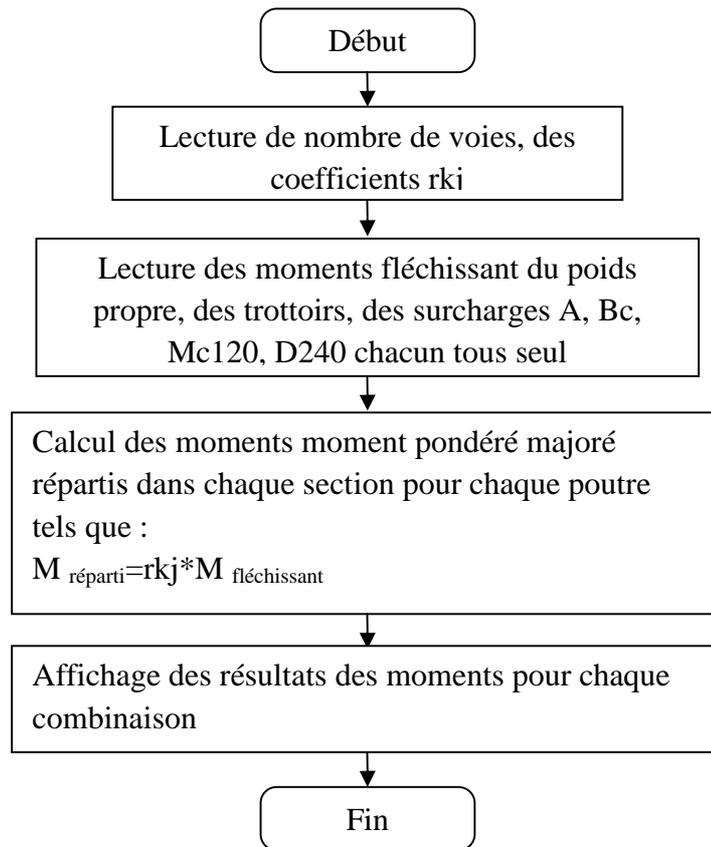
## Prog 6 : Moment du chargement du convoi exceptionnel D240



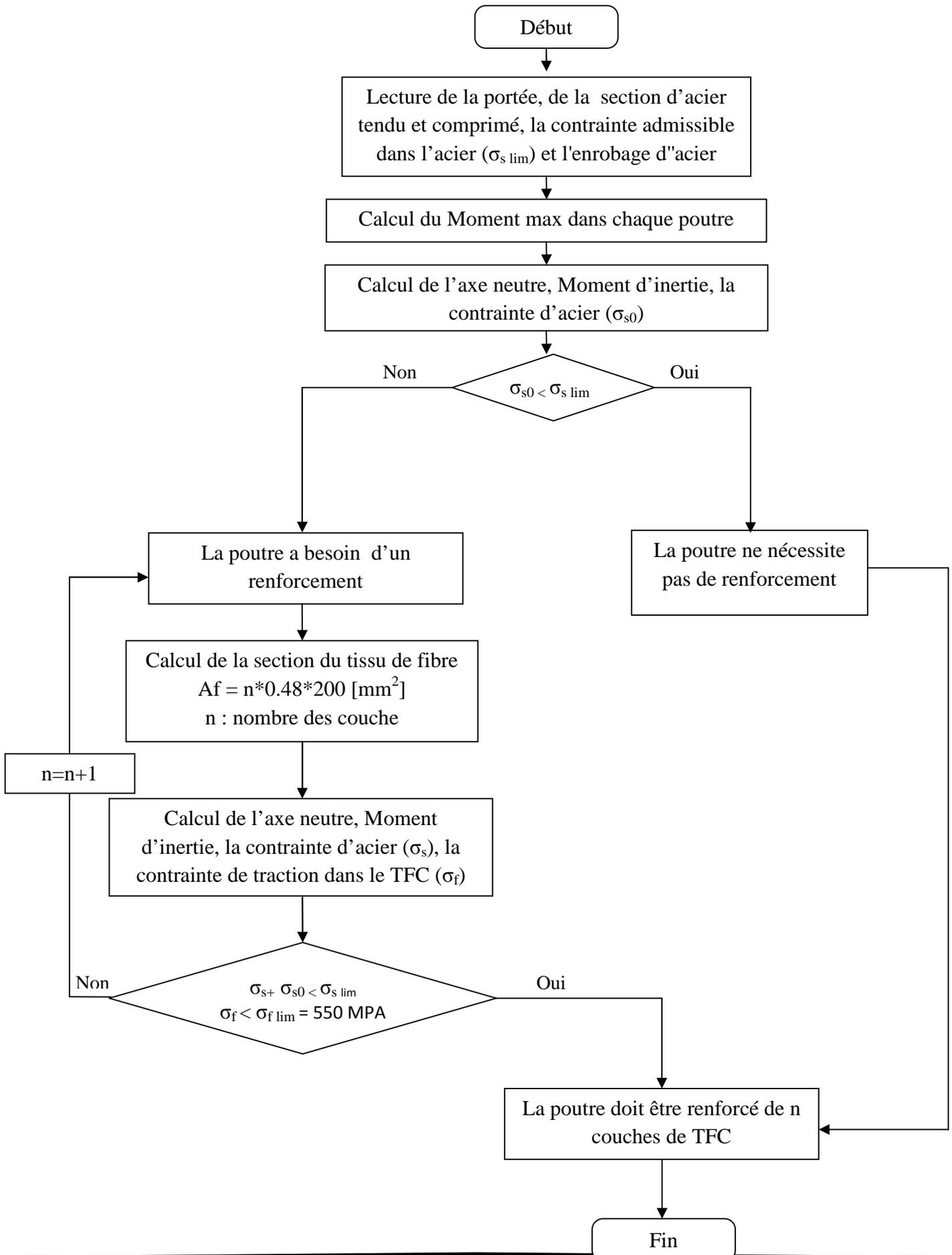
Prog 7 : Affichage de différentes combinaisons de surcharges (pour le calcul transversale)  
et Calcul du coefficient de répartition transversale  $rk_j$



Prog 8 : Calcul du moment pondéré majoré répartis dans chaque section pour différentes surcharges



Prog 9 : Vérification des contraintes dans les poutres et Calcul de la section nécessaire de TFC pour le renforcement



### IV-3- Etapes de programmation pour le calcul :

Le programme de calcul a pour but d'automatiser les étapes de calcul d'un tablier de pont à poutres isostatique et de faciliter les différentes phases de calcul surtout en ce qui concerne le calcul des moments fléchissants dus aux différentes charges et surcharges.

L'exécution de ce programme nécessite la connaissance de certaines données sur le tablier de pont à étudier.

Ce programme n'est applicable que pour le cas d'un pont à poutres isostatique droit en béton armé.

Pour utiliser ce programme, il faut introduire les données suivant des étapes suivantes :

- 1) Déclaration des variables
- 2) Calcul du poids propre du tablier
- 3) Détermination des caractéristiques du pont à étudier
- 4) Calcul des différentes surcharges dues au trafic routier
- 5) Répartitions longitudinales et transversales des moments
- 6) Vérification des contraintes et calcul de nombre des couches de TFC.

#### 1ère étape : calcul du poids propre total du tablier

- 1) pour calculer la portée :

on commence par introduire : - le nombre de travées ( n )

- La longueur de chaque travée ( $l_t$ ), (à l'aide d'une boucle )
- Les épaisseurs des joints entre les poutres
- La distance X de l'appui jusqu'au nu de la poutre considérée

Le compilateur va saisir toutes les données, et à la phase d'exécution on aura la longueur de la poutre qu'on veut étudier, et la longueur de la portée souhaitée

- 2) le choix de la portée à étudier, dépend du nombre de poutres et de la forme de chaque poutre :

le programme va lire le nombre de poutres qui dépasse 3 (condition), et nous demande la forme des poutres (rectangulaire, en I ou T)

Après le choix de la forme, le programme demande les caractéristiques pour le calcul de la surface des poutres, le moment d'inertie et le poids total des poutres

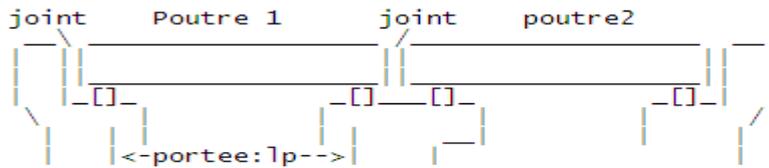
- 3) calcul du poids propre de la dalle

les valeurs de la largeur et de l'épaisseur de la dalle sont nécessaires pour dimensionner la dalle .

- 4) le poids du coffrage perdu
- 5) Calcul du chargement uniformément reparti et le moment max dû aux charges permanentes :

$Q_{cp} = (\text{poids des poutres} + \text{poids de la dalle} + \text{poids du coffrage perdu}) / \text{longueur de la portée}$

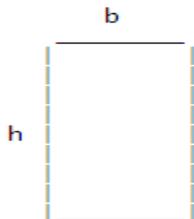
$M(x) = (Q_{cp} * l_{pr(o)} ** 2) / 8$



```

Entrer le nombre des travées
2
Entrer la longueur de chaque travée (en metre)
lt( 1)=
20.3
lt( 2)=
20.3
Entrer les épaisseurs des joints - de gauche a droite - (en metre)
e( 1)=
.3
e( 2)=
.3
e( 3)=
.3
Entrer la distance x - de l'appui jusqu'au nu de la poutre - (en metre) :
pour la poutre : 1
x(gauche) =
.5
x(droite) =
.5
pour la poutre : 2
x(gauche) =
.5
x(droite) =
.5
Quelle portee voulez-vous etudie ?
1
Donner le nombre des poutres (Plus de 2 poutres)
5
Quelle est la forme de la poutre?
1 pour une poutre rectangulaire
2 pour une poutre en I
3 pour une poutre en T
1

```



```

Entrer la largeur et la hauteur de la poutre (en metre)
b =
.3
h =
1.1
donner la valeur de la densite du beton (en t/m3)
2.5
Entrer la largeur et l'épaisseur de la dalle (en metre):
Larg =
10
Ep =
.2
Entrer La pente de la voie (en %)
2.5
Taper 1 si on tient compte du coffrage perdu
2 si non
2
Taper 1 s'il y'a des trottoirs sans glissieres de securite
2 s'il y'a des trottoirs avec glissieres de securite
2
Entrer la largeur et l'épaisseur du trottoires (en metre):
Larg =
1.5
Ep =
.3
Taper 1 si les poutre sont symetrique (ont meme entre axes)
2 si elles sont asymetrique
1
Entrer l'entre axes des poutres
1.44
Taper 1 s'il y a une dalle rigide
2 s'il y a des entretoise
1

```

Press any key to continue

## 6) Charges permanentes complémentaires :

Afin de calculer la largeur roulable et la largeur chargeable, le programme aura le choix entre trottoirs avec ou sans glissières de sécurité.

Pour le calcul de  $Q_{ccp}$ , on a besoin d'introduire les différentes dimensions tel que : trottoirs, glissières de sécurité, poids d'étanchéité, revêtements et le poids des corniches

A l'exécution les résultats intermédiaires sont stockés dans un fichier :

Exemple d'affichage (données du cas d'étude)

**N° travée    poutre    portée**

**1    20.30    20.00    19.00**

**2    20.30    20.00    19.00**

\* Le calcul est fait pour la travée 1 composée de 7. poutres rectangulaires

### CARACTERISTIQUE DU TABLIER

#### LA POUTRE :

La surface  $S_p = .40 \text{ m}^2$

Le moment d'inertie  $I_x = .04 \text{ m}^4$

Le poids total des poutres = 6.93 t/ml

#### LE TABLIER :

Poids de la dalle  $P_d = 5.00 \text{ t/ml}$

Poids du coffrage  $P_c = .00 \text{ t/ml}$

Charge totale  $Q_{cp} = 11.93 \text{ t/ml}$

Charge totale  $Q_{ccp} = 6.05 \text{ t/ml}$

Poids total du tablier  $Q = 17.98 \text{ t/ml}$

#### 2ème étape : Caractéristiques du pont :

Avant de procéder au calcul des surcharges d'exploitation, il est nécessaire de déterminer les caractéristiques du pont tel que : la classe, largeurs chargeable et roulable, largeur d'une voie, nombre des voies,

Les résultats de calcul seront stockés dans un fichier :

(Exemple pris du cas d'étude)

**CARACTERISTIQUES DU PONT :****\*\* Classe 1 \*\*****Le pont a 2 voies d'une largeur de 3.00 m chacune****3ème étape : calcul des différentes surcharges**

1) Calcul du chargement A :

Après avoir divisé la portée en 10 sections, on déclare les deux coefficients  $a_1$  et  $a_2$ , le nombre des voies, et la longueur de la portée.

à l'exécution ce programme affiche les résultats de calcul de  $A(L)$ , surcharge A avec et / ou sans trottoirs et les valeurs des moments dans différentes sections.

Les combinaisons de charge qu'on aura après l'exécution sont :

- ◆ Chargement A avec 1 voie
- ◆ Chargement A avec 2 voie

2) Système de surcharge Bc :

Afin de déterminer le chargement critique et les moments maximums dans chaque section, la notion du théorème de Barré a été introduite dans le programme de calcul.

A l'exécution, le programme affiche les différentes combinaisons de calcul de surcharge Bc dans différentes sections :

- ◆ Charge Bc avec 1 file
- ◆ Charge Bc avec 2 files

3) Surcharge militaire et convoi exceptionnel dans différentes sections

**4ème étape : répartition longitudinale et transversale des moments :**

1) Répartition longitudinale des moments

Dans cette étape le programme va calculer les différentes valeurs du moment dans différentes sections pour chaque combinaison de charge aux états limites ultime et de service.

Les différentes combinaisons possibles sont :

**A L'ETAT LIMITE ULTIME**

- ◆ Poids propre avec ou sans trottoirs (cas 1 ou 2 trottoirs)
- ◆ Poids propre + Chargement A (1 voie chargée) avec ou sans trottoirs (cas 1 ou 2 trottoirs)
- ◆ Poids propre + Chargement A (2 voie chargées) avec ou sans trottoirs (cas 1 ou 2 trottoirs)

- ◆ Poids propre + Chargement Bc (1 voie chargée) avec ou sans trottoirs (cas 1 ou 2 trottoirs)
- ◆ Poids propre + Chargement Bc (2 voie chargée) avec ou sans trottoirs (cas 1 ou 2 trottoirs)
- ◆ Poids propre + Charges militaires (Mc120)
- ◆ Poids propre + Charges exceptionnelles (D240)

#### A L'ETAT LIMITE DE SERVICE

- ◆ Poids propre avec ou sans trottoirs (cas 1 ou 2 trottoirs)
- ◆ Poids propre + Chargement A (1 voie chargée) avec ou sans trottoirs (cas 1 ou 2 trottoirs)
- ◆ Poids propre + Chargement A (2 voie chargées) avec ou sans trottoirs (cas 1 ou 2 trottoirs)
- ◆ Poids propre + Chargement Bc (1 voie chargée) avec ou sans trottoirs (cas 1 ou 2 trottoirs)
- ◆ Poids propre + Chargement Bc (2 voie chargée) avec ou sans trottoirs (cas 1 ou 2 trottoirs)
- ◆ Poids propre + Charges militaires (Mc120)
- ◆ Poids propre + Charges exceptionnelles (D240)

#### 2) Répartition transversale des moments :

Dans cette partie, tout dépend du coefficient  $\theta$ , le programme aura le choix entre les deux méthodes de calcul transversal, la méthode de J.COURBON ou celle de GUYON MASSONNET.

Dans notre cas d'étude, seule la méthode de J.COURBON a été programmée.

En introduisant la formule déterminante du coefficient de COURBON ( $\Gamma_{kj}$ ), le programme affiche sur un tableau les valeurs de  $\Gamma_{kj}$ , pour chaque cas de charge et pour chaque poutre .

Les différentes combinaisons possibles sont :

- ◆ Poids propre avec chargement A (1 voie ou 2 voies chargées)
- ◆ Poids propre avec chargement Bc (1 file ou 2 files chargées)
- ◆ Charges militaires (Mc120)
- ◆ Charges exceptionnelles (D240)
- ◆ Chargement d'un seul trottoir
- ◆ Chargement de deux (2) trottoirs

**4ème étape : Vérification des contraintes et calcul de nombre des couches.**

1) vérification de la contrainte d'acier tendu :

Pour cela :

On introduit les valeurs des sections d'aciers (tendu et comprimé) pour le calcul de l'axe neutre et le moment d'inertie.

La vérification de la contrainte dépend aussi de la valeur du moment service max qui est déjà calculé à l'étape 3.

A l'aide d'une boucle le programme compare entre les valeurs de la contrainte limite et la contrainte de l'acier tendu pour chaque poutre du tablier.

Puis il passe à la vérification de la condition suivante :

$\sigma_s \leq \sigma_{\text{limite}}$  la poutre ne nécessite pas de renforcement

si c'est le contraire, donc la poutre a besoin de renforcement dans sa fibre inférieure.

2) calcul de la section du TFC nécessaire pour le renforcement :  $A_f = 0.48 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$

3) le programme refaire le calcul de la contrainte d'acier tendu en passant par les mêmes étapes qu'avant mais cette fois si, la section du TFC va être prise en considération pour le calcul du nouveau axe neutre et moment d'inertie nécessaire pour la vérification de la nouvelle contrainte.

4) si la condition  $\sigma_s \leq \sigma_{\text{limite}}$  donc la poutre ne nécessite pas de renforcement, si non on ajoute une nouvelle couche du TFC (on double la section) et refait le calcul de l'axe neutre en introduisant la nouvelle valeur de la section du TFC.

**V-5 Cas d'étude :** (affichage des résultats trouvés)PROGRAMME DE CALCUL D'UN TABLIER DE PONT  
RENFORCE PAR MATERIAUX COMPOSITES

N°	travee	poutre	portee
1	20.30	20.00	19.00
2	20.30	20.00	19.00

\* Le calcul est fait pour la travee 1 composee de 7 poutres rectangulaires

## CARACTERISTIQUE DU TABLIER

## LA POUTRE :

La surface  $S_p = .40 \text{ m}^2$

Le moment d'inertie  $I_x = .04 \text{ m}^4$

Le poids total des poutres = 6.93 t/ml

## LE TABLIER :

Poids de la dalle  $P_d = 5.00 \text{ t/ml}$

Poids du coffrage  $P_c = .00 \text{ t/ml}$

Charge totale  $Q_{cp} = 11.93 \text{ t/ml}$

Charge totale  $Q_{ccp} = 6.05 \text{ t/ml}$

Poids total du tablier  $Q = 17.98 \text{ t/ml}$

## CARACTERISTIQUES DU PONT :

**\*\* Classe 1 \*\***

Le pont a 2 voies d'une largeur de 3.00 m chacune

## COMBINAISONS DES CHARGES

## A L'ETAT LIMITE ULTIME

- 1 ) Poids propre sans trottoirs
- 2 ) Poids propre + 1 trottoir
- 3 ) Poids propre + 2 trottoirs
- 4 ) Poids propre + Chargement A+ 1 voie sans trottoirs
- 5 ) Poids propre + Chargement A+ 1 voie + 1 trottoir
- 6 ) Poids propre + Chargement A+ 1 voie + 2 trottoirs
- 7 ) Poids propre + Chargement A+ 2 voies sans trottoirs

- 8) Poids propre + Chargement A+ 2 voies + 1 trottoir
- 9) Poids propre + Chargement A+ 2 voies + 2 trottoirs
- 10) Poids propre + Charge Bc + 1 voie sans trottoirs
- 11) Poids propre + Charge Bc + 1 voie + 1 trottoir
- 12) Poids propre + Charge Bc + 1 voie + 2 trottoirs
- 13) Poids propre + Charge Bc + 2 voies sans trottoirs
- 14) Poids propre + Charge Bc + 2 voies + 1 trottoir
- 15) Poids propre + Charge Bc + 2 voies + 2 trottoirs
- 16) Poids propre + Charges militaires (Mc120)
- 17) Poids propre + Charges exceptionnelles (D240)

#### A L'ETAT LIMITE DE SERVICE

- 1) Poids propre sans trottoirs
- 2) Poids propre + 1 trottoir
- 3) Poids propre + 2 trottoirs
- 4) Poids propre + Chargement A+ 1 voie sans trottoirs
- 5) Poids propre + Chargement A+ 1 voie + 1 trottoir
- 6) Poids propre + Chargement A+ 1 voie + 2 trottoirs
- 7) Poids propre + Chargement A+ 2 voies sans trottoirs
- 8) Poids propre + Chargement A+ 2 voies + 1 trottoir
- 9) Poids propre + Chargement A+ 2 voies + 2 trottoirs
- 10) Poids propre + Charge Bc + 1 voie sans trottoirs
- 11) Poids propre + Charge Bc + 1 voie + 1 trottoir
- 12) Poids propre + Charge Bc + 1 voie + 2 trottoirs
- 13) Poids propre + Charge Bc + 2 voies sans trottoirs
- 14) Poids propre + Charge Bc + 2 voies + 1 trottoir
- 15) Poids propre + Charge Bc + 2 voies + 2 trottoirs
- 16) Poids propre + Charges militaires (Mc120)
- 17) Poids propre + Charges exceptionnelles (D240)

#### A L'ETAT LIMITE ULTIME

\*\*\*\*\* Poids propre :

\* Pour 0 trottoirs

Sections [m]	Moments flechissants [t.m]
.00	.00
1.90	394.37
3.80	701.10
5.70	920.20
7.60	1051.65

9.50	1095.47
11.40	1051.65
13.30	920.20
15.20	701.10
17.10	394.37
19.00	.00

\* Pour 1 trottoirs

Sections [m]	Moments flechissants [t.m]
.00	.00
1.90	6242.57
3.80	11097.90
5.70	14566.00
7.60	16646.85
9.50	17340.47
11.40	16646.85
13.30	14566.00
15.20	11097.90
17.10	6242.57
19.00	.01

\* Pour 2 trottoirs

Sections [m]	Moments flechissants [t.m]
.00	.00
1.90	12090.77
3.80	21494.70
5.70	28211.79
7.60	32242.05
9.50	33585.47
11.40	32242.05
13.30	28211.80
15.20	21494.71
17.10	12090.78
19.00	.01

\*\*\*\*\* Système de charge A :

\*\*\* pour 1 voies : A= 1623.17 kg/m<sup>2</sup>  
 Qa = 4.87 t/ml

\* Pour 0 trottoirs

Sections [m]	Moments flechissants [t.m]
.00	.00
1.90	520.94
3.80	926.11
5.70	1215.52
7.60	1389.17
9.50	1447.05
11.40	1389.17
13.30	1215.52
15.20	926.11
17.10	520.94
19.00	.00

\* Pour 1 trottoirs

Sections [m]	Moments flechissants [t.m]
.00	.00
1.90	526.79
3.80	936.51
5.70	1229.17
7.60	1404.76
9.50	1463.30
11.40	1404.76
13.30	1229.17
15.20	936.51
17.10	526.79
19.00	.00

\* Pour 2 trottoirs

Sections [m]	Moments flechissants [t.m]
.00	.00
1.90	532.63
3.80	946.91
5.70	1242.81
7.60	1420.36
9.50	1479.54
11.40	1420.36
13.30	1242.81
15.20	946.91
17.10	532.63
19.00	.00

\*\*\* pour 2 voies :  $A = 1623.17 \text{ kg/m}^2$

$Q_a = 9.74 \text{ t/ml}$

\* Pour 0 trottoirs

Sections [m]	Moments flechissants [t.m]
.00	.00
1.90	647.51
3.80	1151.12
5.70	1510.85
7.60	1726.68
9.50	1798.63
11.40	1726.68
13.30	1510.85
15.20	1151.12
17.10	647.51
19.00	.00

\* Pour 1 trottoirs

Sections [m]	Moments flechissants [t.m]
.00	.00
1.90	653.35
3.80	1161.52
5.70	1524.49
7.60	1742.28
9.50	1814.87
11.40	1742.28
13.30	1524.49
15.20	1161.52
17.10	653.36
19.00	.00

\* Pour 2 trottoirs

Sections [m]	Moments flechissants [t.m]
.00	.00
1.90	659.20
3.80	1171.92
5.70	1538.14
7.60	1757.87
9.50	1831.12
11.40	1757.87

13.30	1538.14
15.20	1171.92
17.10	659.20
19.00	.00

\*\*\*\*\* Système de charge Bc :

\*\*\*\* Coefficient de majoration dynamique = 1.14

\*\*\* pour 1 fils

\* Pour 0 trottoirs

Sections [m]	Moments flechissants [t.m]
1.90	436.09
3.80	742.82
5.70	1049.45
7.60	1225.08
9.50	1268.90

\* Pour 1 trottoirs

Sections [m]	Moments flechissants [t.m]
1.90	7080.70
3.80	12555.46
5.70	16553.54
7.60	18944.04
9.50	19726.14

\* Pour 2 trottoirs

Sections [m]	Moments flechissants [t.m]
1.90	13725.31
3.80	24368.10
5.70	32057.62
7.60	36662.99
9.50	38183.39

\*\*\* pour 2 fils

\* Pour 0 trottoirs

Sections [m]	Moments flechissants [t.m]
1.90	872.18
3.80	1485.64
5.70	2098.90

7.60	2450.16
9.50	2537.80

\* Pour 1 trottoirs

Sections [m]	Moments flechissants [t.m]
1.90	14161.40
3.80	25110.92
5.70	33107.07
7.60	37888.07
9.50	39452.29

\* Pour 2 trottoirs

Sections [m]	Moments flechissants [t.m]
1.90	27450.62
3.80	48736.20
5.70	64115.25
7.60	73325.98
9.50	76366.78

\*\*\*\*\* Charge militaire Mc120 :

\*\*\*\* Coefficient de majoration dynamique = 1.13

Sections [m]	Moments flechissants [t.m]
.00	.00
1.90	678.82
3.80	1206.73
5.70	1583.89
7.60	1810.24
9.50	1885.68
11.40	1810.21
13.30	1583.84
15.20	1206.78
17.10	678.84
19.00	.00

\*\*\*\*\* Convoi exceptionnel (convoi D) :

Sections [m]	Moments flechissants [t.m]
.00	.00
1.90	729.50
3.80	1296.85
5.70	1702.16
7.60	1945.37

9.50	2026.44
11.40	1945.36
13.30	1702.13
15.20	1296.88
17.10	729.51
19.00	.00

## A L'ETAT LIMITE DE SERVICE

\*\*\*\*\* Poids propre :

\* Pour 0 trottoirs

Sections [m]	Moments flechissants [t.m]
.00	.00
1.90	292.13
3.80	519.33
5.70	681.63
7.60	779.00
9.50	811.46
11.40	779.00
13.30	681.63
15.20	519.33
17.10	292.13
19.00	.00

\* Pour 1 trottoirs

Sections [m]	Moments flechissants [t.m]
.00	.00
1.90	4678.28
3.80	8316.93
5.70	10915.98
7.60	12475.40
9.50	12995.21
11.40	12475.40
13.30	10915.98
15.20	8316.94
17.10	4678.28
19.00	.01

\* Pour 2 trottoirs

Sections [m]	Moments flechissants [t.m]
.00	.00
1.90	9064.43
3.80	16114.54
5.70	21150.33
7.60	24171.80
9.50	25178.96
11.40	24171.80
13.30	21150.33
15.20	16114.54
17.10	9064.43
19.00	.01

\*\*\*\*\* Système de charge A :

\*\*\* pour 1 voies : A= 1623.17 kg/m<sup>2</sup>  
 Qa = 4.87 t/ml

\* Pour 0 trottoirs

Sections [m]	Moments flechissants [t.m]
.00	.00
1.90	387.05
3.80	688.09
5.70	903.12
7.60	1032.14
9.50	1075.14
11.40	1032.14
13.30	903.12
15.20	688.09
17.10	387.05
19.00	.00

\* Pour 1 trottoirs

Sections [m]	Moments flechissants [t.m]
.00	.00
1.90	391.44
3.80	695.89
5.70	913.36
7.60	1043.84
9.50	1087.33
11.40	1043.84

13.30	913.36
15.20	695.89
17.10	391.44
19.00	.00

\* Pour 2 trottoirs

Sections [m]	Moments flechissants [t.m]
.00	.00
1.90	395.82
3.80	703.69
5.70	923.59
7.60	1055.53
9.50	1099.51
11.40	1055.53
13.30	923.59
15.20	703.69
17.10	395.82
19.00	.00

\*\*\* pour 2 voies : A= 1623.17 kg/m<sup>2</sup>  
 Qa = 9.74 t/ml

\* Pour 0 trottoirs

Sections [m]	Moments flechissants [t.m]
.00	.00
1.90	481.98
3.80	856.85
5.70	1124.62
7.60	1285.28
9.50	1338.83
11.40	1285.28
13.30	1124.62
15.20	856.85
17.10	481.98
19.00	.00

\* Pour 1 trottoirs

Sections [m]	Moments flechissants [t.m]
.00	.00
1.90	486.36
3.80	864.65
5.70	1134.85
7.60	1296.97

9.50	1351.01
11.40	1296.97
13.30	1134.85
15.20	864.65
17.10	486.36
19.00	.00

\* Pour 2 trottoirs

Sections [m]	Moments flechissants [t.m]
.00	.00
1.90	490.75
3.80	872.45
5.70	1145.08
7.60	1308.67
9.50	1363.20
11.40	1308.67
13.30	1145.09
15.20	872.45
17.10	490.75
19.00	.00

\*\*\*\*\* Système de charge Bc :

\*\*\*\* Coefficient de majoration dynamique = 1.14

\*\*\* pour 1 fils

\* Pour 0 trottoirs

Sections [m]	Moments flechissants [t.m]
1.90	323.42
3.80	550.63
5.70	778.57
7.60	909.07
9.50	941.53

\* Pour 1 trottoirs

Sections [m]	Moments flechissants [t.m]
1.90	5306.87
3.80	9410.10
5.70	12406.63
7.60	14198.29
9.50	14784.47

\* Pour 2 trottoirs

Sections [m]	Moments flechissants [t.m]
1.90	10290.33
3.80	18269.58
5.70	24034.70
7.60	27487.51
9.50	28627.40

\*\*\* pour 2 fils

\* Pour 0 trottoirs

Sections [m]	Moments flechissants [t.m]
1.90	646.83
3.80	1101.25
5.70	1557.13
7.60	1818.14
9.50	1883.06

\* Pour 1 trottoirs

Sections [m]	Moments flechissants [t.m]
1.90	10613.75
3.80	18820.21
5.70	24813.26
7.60	28396.58
9.50	29568.93

\* Pour 2 trottoirs

Sections [m]	Moments flechissants [t.m]
1.90	20580.66
3.80	36539.16
5.70	48069.39
7.60	54975.02
9.50	57254.80

\*\*\*\*\* Charge militaire Mc120 :

\*\*\*\* Coefficient de majoration dynamique = 1.13

Sections [m]	Moments flechissants [t.m]
.00	.00
1.90	505.46
3.80	898.56

5.70	1179.40
7.60	1347.94
9.50	1404.12
11.40	1347.92
13.30	1179.36
15.20	898.59
17.10	505.48
19.00	.00

\*\*\*\*\* Convoi exceptionnel (convoi D) :

Sections [m]	Moments flechissants [t.m]
.00	.00
1.90	543.47
3.80	966.15
5.70	1268.10
7.60	1449.29
9.50	1509.68
11.40	1449.28
13.30	1268.07
15.20	966.17
17.10	543.48
19.00	.00

#### COMBINAISONS DES CHARGES

Calcul des Moments ponderes majores repartis par la methode de COURBON

theta = .0002 < 0.3

On applique la methode de J.COURBON

1) Poids propre

Chargement A

1voie chargee

2) |\_\_\_\_|\*\*\*\*\*| ou |\*\*\*\*\*|\_\_\_\_|

2voies chargees

3) |\*\*\*\*\*|\*\*\*\*\*|

Charge Bc

1file

4) |\_\_\_\_|\*\*\*\*\*| ou |\*\*\*\*\*|\_\_\_\_|

2files

5) |\*\*\*\*\*|\*\*\*\*\*|

- 6) Charges militaires (Mc120)
- 7) Charges exceptionnelles (D240)
- 8) Chargement d'un seul trottoir
- 9) Chargement de deux (2) trottoirs

Combinaisons	Coef Rkj pour chaque poutre						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
1)	.143	.143	.143	.143	.143	.143	.143
2)	.031	.068	.106	.143	.180	.217	.254
3)	.143	.143	.143	.143	.143	.143	.143
4)	.087	.106	.124	.143	.161	.180	.199
5)	.143	.143	.143	.143	.143	.143	.143
6)	.143	.143	.143	.143	.143	.143	.143
7)	.143	.143	.143	.143	.143	.143	.143
8)	-.173	-.068	.037	.143	.248	.354	.459
9)	.143	.143	.143	.143	.143	.143	.143

- 1) Poids propre sans trottoirs
- 2) Poids propre + 1 trottoir
- 3) Poids propre + 2 trottoirs
- Poids propre + Chargement A 1 voie chargee sans trottoirs
- 4) |\_\_\_\_|\*\*\*\*| ou |\*\*\*\*|\_\_\_\_|
- Poids propre + Chargement A 1 voie chargee + 1 trottoir
- 5) |\_\_\_\_|\*\*\*\*| ou |\*\*\*\*|\_\_\_\_|
- Poids propre + Chargement A 1 voie chargee + 2 trottoirs
- 6) |\_\_\_\_|\*\*\*\*| ou |\*\*\*\*|\_\_\_\_|
- Poids propre + Chargement A 2 voies chargees sans trottoirs
- 7) |\*\*\*\*|\*\*\*\*|
- Poids propre + Chargement A 2 voies chargees + 1 trottoir
- 8) |\*\*\*\*|\*\*\*\*|
- Poids propre + Chargement A 2 voies chargees + 2 trottoirs
- 9) |\*\*\*\*|\*\*\*\*|
- Poids propre + Charge Bc 1 file sans trottoirs
- 10) |\_\_\_\_|\*\*\*\*| ou |\*\*\*\*|\_\_\_\_|
- Poids propre + Charge Bc 1 file + 1 trottoir
- 11) |\_\_\_\_|\*\*\*\*| ou |\*\*\*\*|\_\_\_\_|

- Poids propre + Charge Bc 1 file + 2 trottoirs  
 12) |\_\_\_\_|\*\*\*\*| ou |\*\*\*\*|\_\_\_\_|  
 Poids propre + Charge Bc 2 files sans trottoirs  
 13) |\*\*\*\*|\*\*\*\*|  
 Poids propre + Charge Bc 2 files + 1 trottoir  
 14) |\*\*\*\*|\*\*\*\*|  
 Poids propre + Charge Bc 2 files + 2 trottoirs  
 15) |\*\*\*\*|\*\*\*\*|  
 16) Poids propre + Charges militaires (Mc120)  
 17) Poids propre + Charges exceptionnelles (D240)

Combinaisons	Moment pour chaque poutre						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
1)	156.496	156.496	156.496	156.496	156.496	156.496	156.496
2)	155.569	156.801	158.034	159.266	160.499	161.731	162.964
3)	161.588	161.588	161.588	161.588	161.588	161.588	161.588
4)	143.940	181.608	219.277	256.946	294.615	332.284	369.953
5)	138.865	178.998	219.132	259.266	299.400	339.534	379.668
6)	148.582	186.251	223.920	261.588	299.257	336.926	374.595
7)	256.946	256.946	256.946	256.946	256.946	256.946	256.946
8)	255.569	256.801	258.034	259.266	260.499	261.731	262.964
9)	261.588	261.588	261.588	261.588	261.588	261.588	261.588
10)	153.389	162.710	172.032	181.354	190.676	199.998	209.320
11)	148.314	160.100	171.887	183.674	195.461	207.248	219.035
12)	158.031	167.353	176.675	185.997	195.319	204.641	213.962
13)	181.354	181.354	181.354	181.354	181.354	181.354	181.354
14)	179.977	181.209	182.442	183.674	184.907	186.139	187.372
15)	185.997	185.997	185.997	185.997	185.997	185.997	185.997
16)	256.571	256.571	256.571	256.571	256.571	256.571	256.571
17)	289.490	289.490	289.490	289.490	289.490	289.490	289.490

## RENFORCEMENT DES POUTRES PAR TFC

Le pont n'est pas besoin d'un renforcement

**V-6 Conclusion :**

Nous avons cité dans cette partie toutes les étapes de calcul effectué par le programme numérique, qui ont été résumé dans l'organigramme de calcul.

À travers le cas d'étude nous voyons bien la rapidité et la précision du calcul automatique qui nous permis de savoir les valeurs des différents chargements dans chaque section .

*Conclusion  
générale*

## CONCLUSION GENERALE

L'étude réalisée nous a permis d'identifier un certain nombre de phénomènes liés à la pathologie des ponts, ainsi que les différentes techniques de réparation appliqué sur les tabliers de ponts à poutres ,en béton armé .Parmi ces techniques qui représentent des solutions alternatives celle appelée « méthode de renforcement par collage des fibres de carbone » qui a pour avantages, durabilité , rigidité, simplicité de mise en œuvre ,et ne nécessitent pas des grands aménagements, ni trop de main d'œuvre.

Nous avons élaboré un programme en langage FORTRAN ou nous avons passé en détail les différentes étapes à suivre pour le calcul et le dimensionnement d'un tablier de pont à poutres sous chaussées en béton armé avec un champ d'application allant de 3 à 10 poutres transversalement, et avec diverses inerties ,tandis que dans le sens longitudinal notre programme peut prendre en charge 2 à 10 travées isostatiques.

Le calcul des moments fléchissants et des contraintes dans différentes sections nous a permis de prédire la stabilité de l'ossature par l'insertion de fibres de carbone collées à la partie inférieure des poutres maitresses.

Afin de valider notre travail analytique, basé sur le programme en question nous avons pris un exemple de pont déjà conçu et réalisé dans le but de quantifier les écarts éventuels (voire les dispersions).

A travers la présente étude, nous voyons comment un ingénieur peut être soulagé de calculs laborieux grâce au calcul automatique, qui a pour avantages :

- La rapidité de calcul donc gain du temps
- La précision de calcul
- La possibilité de faire de réelles études technico-économiques.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Cyril DOUTHE** « étude de structures élancées précontraintes en matériaux composites : application à la conception des gridshells », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées-Paris, 16 novembre 2007 ;
- [2] **Amelia Saskia JULICH SAAVEDRA** « contrôle de forme de passerelle composite », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées-Paris, 21 Décembre 2006 ;
- [3] **Jean LUYCKX** « Composites à fibres de carbone dans le génie civil », techniques de l'ingénieur-AM 5 620 ;
- [4] **El Houssain ROCHDI** « contribution à l'analyse du comportement mécanique de dalles en béton armé renforcées par matériaux composites » Thèse de doctorat-UNIVERSITÉ CLAUDE BERNARD-LYON 1, 2004
- [5] **ZE YI WU** « Etude expérimentale du comportement des poutres courtes en béton armé pré-fissurées et renforcées par matériaux composite sous chargement statique et de fatigue », Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 2004
- [6] **Tania CROSTON** « étude expérimentale du comportement d'une poutre en béton armé en flexion 3 points réparées par matériaux composites (approche probabiliste) », thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers-centre de Bordeaux, 2006.
- [7] **Jean-Marie BERTHELOT** « Livre matériaux composites »
- [8] **LAICHAOUI Ahmed** « Analyse expérimentale du comportement des poutres en béton armé renforcées par matériaux composites » mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique-Algérie – 2006
- [9] « **Use of Composite Materials in Civil Infrastructure in Japan** », International Technology Research Institute, August, 1998
- [10] **Benjamin LACLAU, Nicolas SALMON** « Étude des spécificités des bétons de la première moitié du 20<sup>ème</sup> siècle et leur adaptabilité aux nouvelles technologies de renforts composites » Fonds communs de coopération AQUITAINE / EUSKADI, 18 septembre 2009
- [11] **TOUHARI Mahfoud** « influence du renforcement par matériaux composites de fibres de carbone sur le comportement d'un pont à poutres en béton », mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique -Algérie, Mai 2010

[12] **R.BENZAID<sup>(1)</sup> et N.E. CHIKH<sup>(2)</sup>** « Reinforcement and reparation of R.C structures by composites materials », <sup>(1)</sup> laboratoire génie géologique faculté des sciences, université de Jijel, <sup>(2)</sup> Faculté de génie civil, faculté des sciences de l'ingénieur, université Mentouri, Constantine

[13] **NDZANA AKONGO Grégoire & TCHOUMI Samuel** « Réhabilitation des ouvrages en béton arme dégradés par la corrosion des armatures », Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technique, Memoires on line.

[14] « diagnostic et réparation d'un pont en béton arme », 2e Conférence spécialisée en génie des matériaux de la Société canadienne de génie civil.

[15] **Brahim Benmokrane, Ehab El-Salakawy, Dominique Nadeau, Thomas Lackey, et Marco Quirion** « Conception d'une nouvelle génération de tabliers de ponts en béton armé à l'aide d'armatures en matériaux composites », 2003

[16] **BOUAZZA HANANE** « Pathologie des infrastructures et fondations des ponts application des matériaux composites colles » , mémoire de fin d'étude ,UNIVERSITE DE BLIDA, 2006

[17] **FREYSSINET INTERNATIONAL**, Avis technique, référence 3/07-540, « Elément de structure renforcés par un procédé de collage de fibres de carbone », édition corrigée du 29 mai 2008

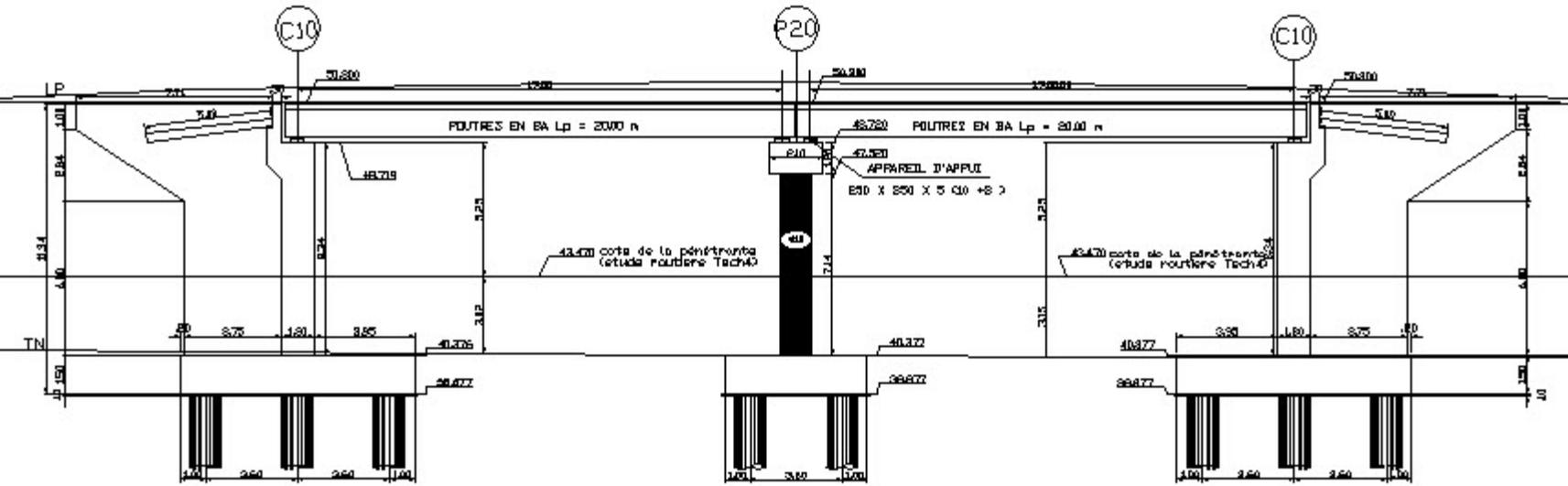
[18] Patrice LIGNELET « FORTRAN», techniques de l'ingénieur Doc. H 2 120

[19] « Les librairies en Fortran », Module d'informatique, Licence DSM ENS Lyon ,2002-2003

# *Annexes*

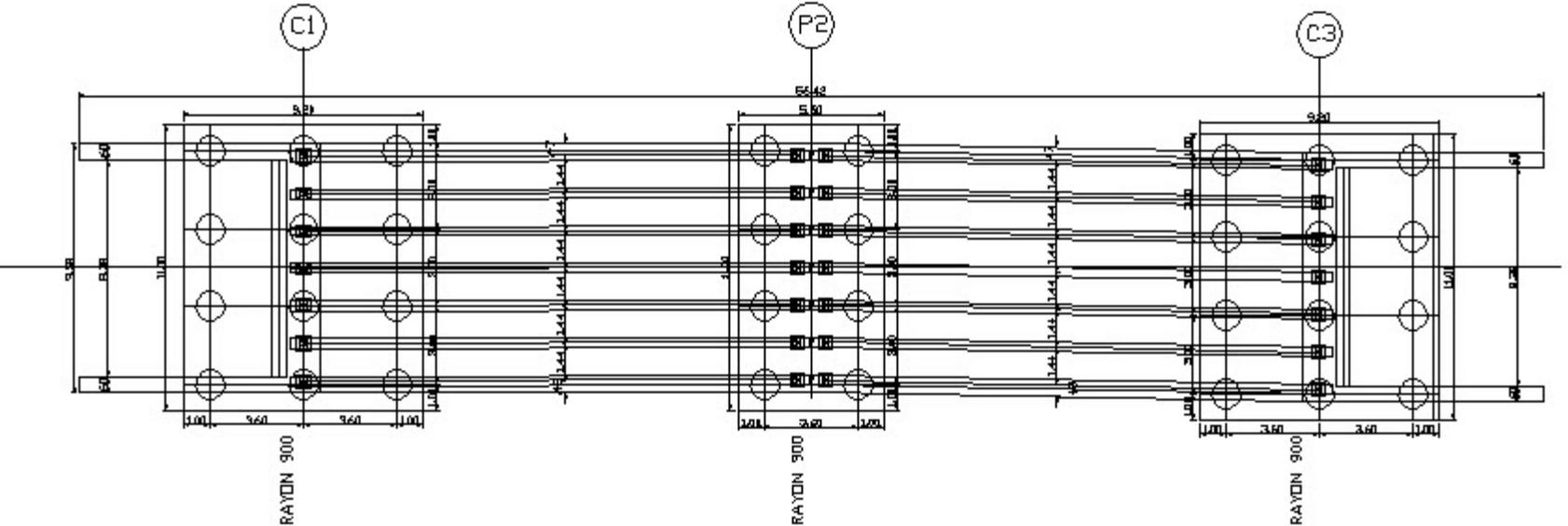
# COUPE TRANSVERSAL

Ech 1/100



# VUE EN PLAN

Ech 1/100



**I. ETUDE DE LA POUTRE****I. Evaluation des efforts :**

Section critique vis à vis du moment fléchissant est à mi travée  $L_p=20$  m.

**1-Evaluation des efforts :****1.1-charges permanentes :**

❖ **Poids propre des poutres :**  $P_p=138.6$  t

❖ **Poids de la dalle :**  $P_d=100$  t

❖ **Poids trottoirs :**  $P_{tr}=20.78$  t

❖ **Poids des corniches :**  $P_{cr}=25.23$  t

❖ **Poids du revêtement :**  $P_{rv}=24.64$  t

❖  **poids des glissières et du garde corps :**  $P_{gg}=8.00$  t

⇒ **Poids total du tablier :**  $G = \Sigma P = 337.05$  t

⇒ **Poids du tablier revenant à la culée:  $R_G=168.52$  t**

**1.2-Surcharges réglementaires :**❖ **Caractéristiques du pont :**

*Largeur totale :*  $l_T = 10$  m

*Largeur chargeable = Largeur roulable :*  $l_c = l_r = 7$  m

*Nombre de voies :*  $n = E (l_c / 3) = 2$  voies

*Largeur d'une voie :*  $l_v = l_c / n = 3,5$  m

*Classe du pont :* → pont de 1<sup>ème</sup> classe

**1.3- Évaluation des sollicitations :****Les charges et surcharges prises en consécration :**

- La charge du trottoir est de :  $0.15$  t/m<sup>2</sup>
- La surcharge :  $A(L) = 1.041$  t / m<sup>2</sup>
- La surcharge : D240
- La surcharge :  $B_c$

Le calcul est effectué par logiciel SAP2000, la modélisation et l'ensemble des résultats sont représentés ci-après :

Les résultats obtenus :

$$M_{\max} = 251.776 \text{ t.m}$$

**I. CALCUL de Section en Flexion Simple**

**II-1-Ferraillage Longitudinal :**

**Calcul de Section en Flexion Simple**

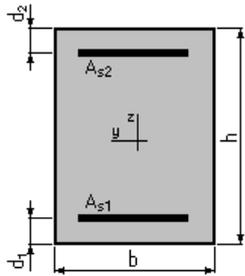
**1. Hypothèses:**

**Béton:  $f_{c28} = 25,0$  (MPa)**

**Acier:  $f_e = 400,0$  (MPa)**

- Fissuration préjudiciable
- Prise en compte des armatures comprimées
- Pas de prise en compte des dispositions sismiques
- Calcul suivant BAEL 91 mod. 99

**2. Section:**



$b_f = 1,44$  (m)

$b_w = 0,36$  (m)

$h = 1,30$  (m)

$h_f = 0,20$  (m)

$d_1 = 0,05$  (m)

$d_2 = 0,05$  (m)

**3. Moments appliqués:**

	$M_{max}$ (T*m)	$M_{min}$ (T*m)
Etat Limite Ultime ( fondamental )	0,00	0,00
Etat Limite de Service	251,78	0,00
Etat Limite Ultime ( Accidentel )	0,00	0,00

**4. Résultats:**

**Sections d'Acier:**

Section théorique	$A_{s1} = 107,85$ (cm <sup>2</sup> )	Section théorique	$A_{s2} = 0,00$ (cm <sup>2</sup> )
Section minimum	$A_{s_{min}} = 6,32$ (cm <sup>2</sup> )		
théorique	$\rho = 2,40$ (%)		
minimum	$\rho_{min} = 0,14$ (%)		

**Analyse par Cas:**

**Cas ELS**  $M_{\max} = 251,78$  (T\*m)  $M_{\min} = 0,00$  (T\*m)

Coefficient de sécurité: 1,00

Position de l'axe neutre:  $y = 0,78$  (m)

Bras de levier:  $Z = 1,14$  (m)

Contrainte maxi du béton:  $\sigma_b = 8,4$  (MPa)

Contrainte limite:  $0,6 f_{cj} = 15,0$  (MPa)

Contrainte de l'acier:

tendue:  $\sigma_s = 201,6$  (MPa)

Contrainte limite de l'acier:

$\sigma_{s \text{ lim}} = 201,6$  (MPa)

**Soit 4\*4 HA32**

## II- 2-Ferraillage transversal :

- Vérification de la contrainte de cisaillement :

$$\tau_u = \frac{Vu}{b_0 d}, Vu = 67.22t$$

$$\tau_u = \frac{67.22 \times 10^{-2}}{0.36 \times 0.99} = 1.88 \text{MPa} < 2.5 \text{Mpa}$$

- Pourcentage des aciers

On fixe  $S_t = 15\text{cm}$

$$At \geq \frac{S_t * b_0}{0.9 * f_e} (\tau_u - 0.3 K f_{t28})$$

$$At \geq \frac{0.15 * 0.36}{0.9 * 400} (1.88) \Rightarrow At = 2.829 \text{cm}^2$$

$$At \text{ min} \geq \frac{S_t}{f_e} b_0 \left[ \max \left( \frac{\tau_u}{2}; 0.4 \right) \right]$$

$$At \text{ min} > 1.273 \text{cm}^2$$

**Soit 4HA12 (2cadre de T12)**

# Fortran 90 Reference Card

(c) 2008 Michael Goerz <goerz@physik.fu-berlin.de>  
http://www.michaelgoerz.net

For a complete reference, I highly recommend  
Adams, Brainerd, Martin, Smith, Wagener, *Fortran 90 Handbook*, Intertext Publications, 1992.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-Noncommercial-Share Alike 3.0 License.  
To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/>

## 1 Data Types

### 1.1 Simple Data Types (entity-oriented declarations)

integer(*specs*) [, *attrs*] :: i=1 integer (with initialization)  
real(*specs*) [, *attrs*] :: r real number  
complex(*specs*) [, *attrs*] :: z complex number  
logical(*specs*) [, *attrs*] :: b boolean variable  
character(*specs*) [, *attrs*] :: s string  
real, parameter :: c = 2.998 constant declaration  
data i,j,k/3\*0/ initialize i,j,k to 0  
s2=s(2:5); s2=s(:5); s2=s(5:) substring extraction

**attributes:** parameter, pointer, target, allocatable,  
dimension, public, private, intent, optional, save,  
external, intrinsic

**specs:** kind=..., for character: len=...

### 1.1 Derived Data Types

type person Define person as derived data  
character(len=10) :: name type  
integer :: age  
end type person  
type(person) :: me instantiate person  
me = person("michael", 24) constructor  
name = me%name access structure component

### 1.2 Arrays and Matrices

real, dimension(5) :: v explicit array with index 1..5  
real, dimension(-1:1,3) :: a 2D array, index -1..1, 1..3  
integer :: a(-10:5), b(10,20) alternative array declaration  
real, allocatable :: a(:) alloc. array ("deferred shape")  
a=real(5,5); data a/25\*0.0/ initialize 2D array  
a=(/1.2,b(2:6,:),3.5/) array constructor  
a=(/(I\*\*2), I = 1, N)/ implied-do array constructor  
v = 1/v + a(1:5,5) array expression  
allocate(a(5),b(2:4),stat=e) array allocation

### 1.3 Pointers (avoid!)

real, pointer :: p declare pointer  
real, pointer :: a(:) alloc. array ("deferred shape")  
real, target :: r define target  
p => r set pointer p to r  
associated(p, [target]) pointer associated with target?  
nullify(p) associate pointer with NUL

### 1.4 Operators

.lt. .le. .eq. .ne. .gt. .ge. relational operators  
.not. .and. .or. .eqv. .neqv. logical operators  
x\*\*(-y) exponentiation  
'AB'/'CD' string concatenation

## 2 Control Constructs

if (*expr*) *action*  
[*name*:] **if** (*expr*) then  
    *block*  
else if (*expr*) then [*name*]  
    *block*  
else [*name*]  
    *block*  
end if [*name*]  
**select case** (number)  
    case (:0)  
        *block*  
    case (1:2)  
        *block*  
    case (3)  
        *block*  
    case (4:)  
        *block*  
    case default  
        *block*  
end select  
outer: **do**  
    inner: do i=from,to,step  
        if (...) cycle inner  
        if (...) exit outer  
    end do inner  
end do outer  
**do while** (*expr*)  
    *block*  
end do

## 3 Program Structure

**program** foo  
    use foo, lname => username  
    use foo2, only: [only-list]  
    implicit none  
    interface; ...  
    end interface  
    *specification statements*  
    *exec statements*  
    stop 'message'  
contains  
    *internal-subprograms*  
end program foo  
**module** foo  
    use foo  
    public :: f1, f2, ...  
    private  
    interface; ...  
    end interface  
    *specification statements*  
contains  
    *internal-subprograms*  
end module foo

if statement  
if-construct

select-statement  
everything up to 0 (incl.)

number is 1 or 2

number is 3

everything up from 4 (incl.)

fall-through case

controlled do-loop  
counter do-loop  
next iteration  
exit from named loop

do-while loop

main program  
used module, with rename  
selective use  
require variable declaration  
explicit interfaces

variable/type declarations, etc.  
statements  
terminate program

subroutines, functions

module  
used module  
list public subroutines  
make private what's not public  
explicit interfaces

variable/type declarations, etc.

“ module subprgs.”

**subroutine** foo(a,b,c,d,e,x,y)  
    integer, intent(in) :: a  
    integer, intent(inout) :: b  
    integer, intent(out) :: c  
    real, optional :: d  
    character(len=\*) :: e  
    real, dimension(2:, :) :: x  
    real, dimension(10, \*) :: y  
    if (present(d)) ...  
    return  
end subroutine foo  
call foo(1,2,3,e="s",x=a,y=b)  
[real] **function** f(a,g)  
    integer, intent(in) :: a  
    [real :: f]  
    interface  
        real function g(x)  
            real, intent(in) :: x  
        end function g  
    end interface  
end function f  
recursive function f(x) ...  
incr(x) = x + 1  
**interface**  
    *interface body*  
end interface  
interface *generic-name*  
    *interface body*  
    module procedure *list*  
end interface  
interface operator *op*  
    *interface body*  
    module procedure *list*  
end interface  
interface assignment (=)  
    *interface body*  
    module procedure *list*  
end interface

subroutine definition  
read-only dummy variable  
read-write dummy variable  
write-only dummy variable  
optional named argument  
assumed length string  
assumed-shape dummy array  
assumed-size dummy variable  
presence check  
forced exit

subroutine call  
function definition  
input parameter  
return type, if not in definition  
explicit interface block  
define dummy var as function

allow recursion  
statement function  
explicit interface of externals  
ext. subroutine/function specs

generic interface (overloading)  
external subroutines/functions  
internal subroutines/functions

operator interface  
external functions  
internal functions

conversion interface  
external subroutines  
internal subroutines

## 4 Intrinsic Procedures

### 4.1 Transfer and Conversion Functions

abs(a) absolute value  
aimag(z) imaginary part of complex z  
aint(x, kind), anint(x, kind) to whole number real  
dble(a) to double precision  
cmplx(x,y, kind) create x + iy (y optional)  
int(a, kind), nint(a, kind) to int (truncated/rounded)  
real(x, kind) to real  
conj(z) complex conjugate  
char(i, kind), achar(i) char of ASCII code (pure 7bit)  
ichar(c), iachar(c) ASCII code of character  
logical(l, kind) change kind of logical l  
ibits(i, pos, len) extract sequence of bits  
transfer(source, mold, size) reinterpret data

## 4.2 Arrays and Matrices

allocated(a)  
lbound(a, dim), ubound(a, dim)  
shape(a)  
size(array, dim)  
all(mask, dim), any(mask, dim)  
count(mask, dim)  
maxval(a, d, m), minval(a, d, m)  
product(a, dim, mask)  
sum(array, dim, mask)  
merge(tsource, fsource, mask)  
pack(array, mask, vector)  
unpack(vector, mask, field)  
spread(source, dim, n)  
reshape(src, shape, pad, order)  
cshift(a, s, d), eoshift(a, s, b, d)  
transpose(matrix)  
maxloc(a, mask), minloc(a, mask)

check if array is allocated  
lowest/highest index in array  
shape (dimensions) of array  
extent of array along dim  
check boolean array  
number of true elements  
find max/min in masked array  
product along masked dimension  
sum along masked dimension  
combine arrays as mask says  
packs masked array into vect.  
unpack vect. into masked field  
extend source array into dim.  
make array of shape from src  
(circular) shift  
transpose a matrix  
find pos. of max/min in array

## 4.3 Computation Functions

ceiling(a), floor(a)  
conj(z)  
dim(x, y)  
max(a1, a2, a3...), min(a1, ..)  
dprod(a, b)  
mod(a, p)  
modulo(a, p)  
sign(a, b)  
matmul(m1, m2)  
dot\_product(a, b)  
**more:** sin, cos, tan, acos, asin, atan, atan2, sinh, cosh, tanh, exp, log, log10, sqrt

to next higher/lower int  
complex conjugate  
max(x-y, 0)  
maximum/minimum  
dp product of sp a, b  
a mod p  
modulo with sign of a/p  
make sign of a = sign of b  
matrix multiplication  
dot product of vectors

## 4.4 Numeric Inquiry and Manipulation Functions

kind(x)  
digits(x)  
bit\_size(i)  
epsilon(x)  
huge(x)  
minexponent(x)  
maxexponent(x)  
precision(x)  
radix(x)  
range(x)  
tiny(x)  
exponent(x)  
fraction(x)  
nearest(x)  
rrspacing(x)  
scale(x, i)  
set\_exponent(x, i)  
spacing(x)  
kind-parameter of variable x  
significant digits in model  
number of bits for int in model  
small pos. number in model  
largest number in model  
smallest exponent in model  
largest exponent in model  
decimal precision for reals in base of the model  
dec. exponent range in model  
smallest positive number  
exponent part of x in model  
fractional part of x in model  
nearest machine number  
reciprocal of relative spacing  
 $x \cdot b^{**i}$   
 $x \cdot b^{**(i-e)}$   
absolute spacing of model

## 4.5 String Functions

lge(s1, s2), lgt, lle, llt  
adjustl(s), adjustr(s)  
index(s, sub, from\_back)  
trim(s)

string comparison  
left- or right-justify string  
find substr. in string (or 0)  
s without trailing blanks

len\_trim(s)  
scan(s, setd, from\_back)  
verify(s, set, from\_back)  
len(string)  
repeat(string, n)

## 4.6 Bit Functions (on integers)

btest(i, pos)  
iand(i, j), ieor(i, j), ior(i, j)  
ibclr(i, pos), ibset(i, pos)  
ishft(i, sh), ishftc(i, sh, s)  
not(i)

## 4.7 Misc Intrinsic Subroutines

date\_and\_time(d, t, z, v)  
mvbits(f, fpos, len, t, tpos)  
random\_number(harvest)  
random\_seed(size, put, get)  
system\_clock(c, cr, cm)

length of s, w/ trailing blanks  
search for any char in set  
check for presence of set-chars  
length of string  
concat n copies of string

test bit of integer value  
and, xor, or of bit in 2 integers  
set bit of integer to 0/1  
shift bits in i  
bit-reverse integer

put current time in d, t, z, v  
copy bits between int vars  
fill harvest randomly  
restart/query random generator  
get processor clock info

## 5 Input/Output

### 5.1 Format Statements

fmt = "(F10.3, A, ES14.7)"  
Iw Iw.m  
Bw.m Ow.m Zw.m  
Fw.d  
Ew.d  
Ew.dEe  
ESw.d ESw.dEe  
ENw.d ENw.dEe  
Gw.d  
Gw.dEe  
Lw  
A Aw  
nX  
Tc TLc TRc  
r/  
r(...)  
:  
S SP SS  
BN BZ  
w full length, m minimum digits, d decimal places, e exponent length, n positions to skip, c positions to move, r repetitions

### 5.2 Reading from and Writing to Files

call getarg(2, var)  
print '(i10)', 2  
print \*, "Hello World"  
write(unit, fmt, spec) list  
read(unit, fmt, spec) list  
open(unit, specifiers)  
close(unit, specifiers)  
inquire(unit, spec)  
inquire(file=filename, spec)  
inquire(iolength=iol) outlist  
backspace(unit, spec)  
endfile(unit, spec)  
rewind(unit, spec)

format string  
integer form  
binary, octal, hex integer form  
decimal form real format  
exponential form (0.12..E-11)  
specified exponent length  
scientific form (1.2...E-10)  
engineer. form (123.4...E-12)  
generalized form  
generalized exponent form  
logical format (T, F)  
characters format  
horizontal positioning (skip)  
move (absolute, left, right)  
vert. positioning (skip lines)  
grouping / repetition  
format scanning control  
sign control  
blank control (blanks as zeros)

put 2<sup>nd</sup> CLI-argument in var  
print to stdout with format  
list-directed I/O  
write list to unit  
read list from unit  
open file  
close file  
inquiry by unit  
inquiry by filename  
inquiry by output item list  
go back one record  
write eof record  
jump to beginning of file

## 5.3 I/O Specifiers (open)

iostat=*integer-variable*  
err=*label*  
file=*filename*  
status='old' 'new' 'replace'  
'scratch' 'unknown'  
access='sequential' 'direct'  
form='formatted' 'unformatted'  
recl=*integer*  
blank='null' 'zero'  
position='asis' 'rewind'  
'append'  
action='read' 'write'  
'readwrite'  
delim='quote' 'apostrophe'  
'none'  
pad='yes' 'no'  
**close-specifiers:** iostat, err, status='keep' 'delete'  
**inquire-specifiers:** access, action, blank, delim, direct, exist, form, formatted, iostat, name, named, nextrec, number, opened, pad, position, read, readwrite, recl, sequential, unformatted, write, iolength  
**backspace-, endfile-, rewind-specifiers:** iostat, err

save iocode (error) to variable  
label to jump to on error  
name of file to open  
status of input file  
access method  
formatted/unformatted I/O  
length of record  
ignore blanks/treat them as 0  
position, if sequential I/O

read/write mode  
delimiter for char constants

pad with blanks

## 5.4 Data-Transfer Specifiers (read, write)

iostat=*integer-variable*  
advance='yes' 'no'  
err=*label*  
end=*label*  
eor=*label*  
rec=*integer*  
size=*integer-variable*  
save iocode (error) to variable  
(non-)advancing data transfer  
label to jump to on error  
label to jump to on end of file  
label for end of record  
record number to read or write  
number of characters read