Ministère de l'enseignement supérieure et de la recherche scientifique

UNIVERSITÉ DE M'SILA

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

Département de génie civil

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention d'un diplôme de MASTER

Option : STRUCTURES

THEME

Analyse des caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés en construction mixte (acier-béton).

Proposé et dirigé par :

Mr : ***TITOUM Messaoud***

Mme : ***BAKIR Nassima***

Présenté par :

BOURAHLA Mohammed Ettahir

Promotion : 2013/2014


بسم الله الرحمن الرحيم

Dédicace

Tout d'abord je tien à remercier le Tout Puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour arriver à cet stade afin de réaliser ce travail que je dédie à:

A mes très chers parents.

A mon frère et mes sœurs.

A toute la famille BOURAHLA.

A mes amis et à toute la promotion 2014.

Et toute personne que je connais.

Med Ettahir

Remerciement

Tout d'abord, je remercier Allah, le clément et le miséricordieux de m'avoir donné la santé et la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Je voudrais exprimer mes remerciements à mon encadreur : Dr. TITOUM Messaoud, pour les orientations et les conseils qu'il a su ma prodiguer durant l'évolution de mon projet.

Je voudrais aussi remercier tous les professeurs qui ont contribué à ma formation.

Mes remerciements vont également à tous ceux qui de près ou de loin ma apporté aide et encouragement. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude.

Merci

SOMMAIRE

Introduction générale ……..……..……..….. 01

Chapitre I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Généralités sur les matériaux utilisés en construction mixte (acier – béton)

I -1- introduction ……...03

I-2- Description de différents éléments de construction mixte (acier-béton)…….....05

I-2-1- Poteaux mixtes (acier-béton).....06

I-2-2- Poutres mixtes (acier-béton).....08

I-2-3- Dalles mixtes (acier-béton) ……...10

I-3- Matériaux utilisés dans un élément mixte (acier-béton) ……..…….…..... 12

I-4- Caractéristiques Mécaniques des matériaux……...12

I-4-1- Béton …… 12

I-4-2- Acier d'armature ……...16

I-4-3- Acier de construction ……17

I-4-4- Tôles profilées en acier pour dalles mixtes ……...19

I-5- Raisons d'utiliser des structures mixtes acier-béton ……20

I-5-1- Aspects architecturaux ……20

I-5-2- Aspects économiques ……..21

I-5-3- Fonctionnalité ……21

I-5-4- Equipements et utilisation flexible du bâtiment ……22

I-6- Les inconvénients ……..22

I-7- Conclusion ……23

Chapitre II : ETUDE EXPERIMENTALE

Caractérisation des matériaux (caractéristiques mécaniques)

II-1- Introduction 24

II-2- Caractérisation du béton 24

Sommaire

II-2-1- Introduction.....24

II-2-2- Compositions des bétons.....27

II-2-3- Préparation du béton 28

II-2-4- Conservation des éprouvettes ……..29

II-2-5- Essais de compression ……..30

II-2-6- Loi de comportement (contrainte – déformation) ……34

II-2-6-1- Béton comprimée ……...…34

II-2-6-2- Béton tendu ……35

II-3- Caractérisation des aciers ……36

II-3-1- Acier de construction …….. 36

II-3-1-1- Préparation des éprouvettes ……..…… 36

II-3-1-2- Essai de traction ……..…….. 37

II-3-1-3- Résultats des essais …….……..…….…….. 38

II-3-2- Acier d'armature …….. 41

II-4- CONCLUSION …….. 42

Chapitre III : **EXEMPLE D'APPLICATION**

Analyse par éléments finis du comportement d'une poutre mixte

III-1 Introduction 43

III-2- Système de poutre mixte simplement appuyée.....43

III-3- Modèle d'éléments finis 44

III-3-1- Types d'éléments finis utilisés ……...44

III-3-2- Maillage et conditions aux limites …….....45

III-3-3- Modélisation des matériaux ……46

III-3-3-1- Béton de la dalle 46

III-3-3-2- Acier de construction et acier d'armature ……47

III-3-3-3- Modélisation du comportement des connecteurs ……48

III-3-4- Application des charges et critères de rupture ……48

III-4- Validation du modèle proposé ……49

III-5- CONCLUSION ……..52

Conclusion générale ……..…….…….....53

Bibliographie ……...…….... 55

Annexe -A-

A-1- Prélèvement en laboratoire (échantillonnage en laboratoire) ……..57

A-2- L'essai de L'équivalent de sable ……57

A-3- La masse volumique Absolue……..59

A-4- Analyse granulométrique ……61

A-5- Composition de béton (formulation) par la méthode de Dreux-Gorisse ……..62

A-5-1- Formulation du béton 1 ……63

A-5-2- Formulation du béton 2 ……69

A-5-3- Formulation du béton 3 ……72

Notations

f_{ck} : est la résistance caractéristique à la compression sur cylindre, mesurée à 28 jours.

f_{ctm} : est la résistance moyenne à la traction mesurée à 28 jours.

E_{cm} : est le module sécant d'élasticité à prendre en compte pour les actions de courte durée.

ε_{cu} : la déformation ultime correspondante à la rupture totale du béton comprimé.

ε_{cr} : déformation correspondante à la fissuration du béton tendu.

$E_{c\varphi}$: Module d'élasticité du béton pour les actions de longue durée.

φ : Coefficient de fluage du béton.

S220, **S400** et **S500** : les nuances d'acier.

f_{sk} : la limite d'élasticité caractéristique spécifiée d'acier d'armature.

E_s : Le module d'élasticité des armatures.

f_s^u : la résistance ultime caractéristique de l'acier d'armature.

ε^u_{sk} : l'allongement unitaire correspondant à l'atteinte de désigne la résistance ultime de l'acier d'armature.

f_y : la limite d'élasticité de l'acier de construction.

E_a : le module d'élasticité longitudinale de l'acier de construction.

f_u : la résistance ultime à la traction de l'acier de construction.

ε_u : l'allongement à la rupture de l'acier de construction.

G_a : Module de cisaillement.

ν_a : Coefficient de poisson.

ρ_a : Masse volumique.

α_T : Coefficient de dilatation thermique.

f_{yb} : valeurs nominales de la limite d'élasticité du tôle profilée de base.

M_f : Le module de finesse du sable.

P : la charge maximale de compression.

S : la section de l'éprouvette cylindrique.

f_{moy} : la résistance moyenne.

R_i : la résistance à la compression d'une éprouvette a 28 jours.

S_f : l'écart type.

f_{tj} : la résistance à la traction a le jour J.

f_{cj} : la résistance à la compression a le jour J.

A : la section du l'éprouvettes plates.

Ø : diamètres des éprouvettes de l'acier de construction.

$P(S)$: est la force de cisaillement appliqué sur le connecteur.

S : est la valeur du glissement relatif.

α **et** β : deux coefficients constants.

P_u : est la résistance ultime au cisaillement du connecteur.

d : est le diamètre du goujon.

Es : La mesure de l'équivalent de sable.

m : la masse de l'échantillon.

V : le volume de l'échantillon.

A_f : affaissement au cône.

$f`_{C28}$: Résistance moyenne visée en compression du béton à 28 jours en MPa.

F_{CE} : Classe vraie du ciment à 28 jours en MPa.

C : Dosage en ciment en kg par m^3 de béton.

E : Dosage en eau total sur matériau sec en litre par m^3 de béton.

G : Coefficient granulaire.

D_{max} : la dimension maximale des granulats.

K_s et K_p : des coefficients correctifs.

γ : Coefficient de compacité.

V_c : Le Volume absolu des grains de ciment.

V_g : Le Volume absolu de l'ensemble des granulats.

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure - I - 1: Effet de la solidarisation entre deux poutres en flexion élastique ……..……04

Figure - I - 2: Types de connecteurs utilisés en bâtiment ……..……04

Figure - I - 3: Exemples d'éléments mixtes acier-béton……05

Figure - I - 4: Types de poteaux mixtes……..…07

Figure - I - 5: différentes formes de poutre mixte……..……09

Figure - I - 6: exemples de type de profilé métallique……...……09

Figure - I - 7: connexion entre la dalle en béton et le profilé……10

Figure - I - 8: Dalle mixte acier-béton……...……11

Figure - I - 9: Modes d'adhérence des dalles mixtes……..……12

Figure - I - 10: Diagramme contrainte – déformation d'un béton normal……13

Figure - I - 11: Diagramme Contrainte-déformation pour l'acier d'armature……...……16

Figure - I - 12: Diagramme contrainte déformation pour l'acier de construction……..……17

Chapitre II

Figure - II - 1: Les constituants du béton ……..…….. 25

Figure - II - 2: les courbes granulométriques……..……27

Figure - II - 3: Conservation des éprouvettes avant démoulage……29

Figure - II - 4: Conservation des éprouvettes après démoulage……30

Figure - II - 5: Principe du Rectification……31

Figure - II - 6: La mise en charge jusque à la rupture……32

Figure - II - 7: la courbe contrainte-déformation du notre béton classe C 25/30……..……35

Figure - II - 8: Dimensions des éprouvettes……...……36

Figure - II - 9: Machine de traction et éprouvettes testées (acier de construction)……37

Figure - II - 10: éprouvettes testées (Apres sa rupture)……..……38

Figure - II - 11: Exemple d'une courbe (contrainte-déformation)……40

Figure - II - 12: Eprouvettes testées (acier d'armature)……..……41

Figure - II - 13: Diagramme (contrainte-déformation)……...……42

Chapitre III

Figure - III - 1: Système de poutre mixte simplement appuyée……..……44

Figure - III - 2: Maillage et conditions aux limites……45

Figure - III - 3: Diagramme (contrainte – déformation) pour le béton……...…46

Figure - III - 4: Diagramme contrainte-déformation pour l'acier……..……47

Figure - III - 5: Poutre mixte simplement appuyée……49

Figure - III - 6: Maillage et conditions aux limites de la poutre……50

Figure - III - 7: Courbes charge-flèche pour la poutre mixte……..50

Figure - III - 8: Distribution du glissement le long de la poutre……51

Figure - III - 9: Forme déformée de la poutre mixte……...51

Annexe - A -

Figure - A - 1: Opération de quartage……57

Figure - A - 2: l'essai de L'équivalent de sable……59

Figure - A - 3: série de tamis utilisé (analyse granulométrique)……...62

Figure - A - 4: dosage en ciment de béton 1……..64

Figure - A - 5: la courbe de référence de béton 1……67

Figure - A - 6: dosage en ciment de béton 2……70

Figure - A - 7: la courbe de référence de béton 2……71

Figure - A - 8: dosage en ciment de béton 3……73

Figure - A - 9: la courbe de référence de béton 3……74

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I

Tableau - I - 1: Principales caractéristiques des bétons de masse volumique normal……...……14

Tableau - I - 2: Nuances des principaux aciers de construction……18

Tableau - I - 3: Exemples de tôles profilées utilisées pour les dalles mixtes……20

Chapitre II

Tableau - II - 1: Analyse granulométrique du sable……..……25

Tableau - II - 2: Analyse granulométrique pour les granulats 8/15……...……26

Tableau - II - 3: Analyse granulométrique pour les granulats 15/25……..……26

Tableau - II - 4: Compositions des différents bétons……28

Tableau - II - 5: La résistance à la compression et les caractéristiques mécaniques des bétons...34

Tableau - II - 6: Caractéristiques mécaniques de l'acier de construction ...…….…… 39

Tableau - II - 7: Caractéristiques mécaniques de l'acier d'armature……..……41

Annexe - A -

Tableau - A - 1: évaluation de sable……..……58

Tableau - A - 2: La masse volumique Absolue de sable……...……60

Tableau - A - 3: La masse volumique Absolue de gravier 8/15……...……60

Tableau - A - 4: La masse volumique Absolue de gravier 15/25….....60

Tableau - A - 5: Coefficient granulaire G' en fonction de la qualité et D_{max}……..……64

Tableau - A - 6: Correction sur le dosage de pâte en fonction de D_{max} ……...…65

Tableau - A - 7: K, fonction de (forme des granulats, mode de vibration, dosage en ciment)…..66

Tableau - A - 8: Compacité du béton en fonction de D_{max}, de la consistance et du serrage…..…68

Résumé :

Un élément structural en construction est défini comme mixte s'il associe deux matériaux de nature et de propriétés différentes, avec l'objectif de tirer, sur le plan mécanique, le meilleur parti possible de cette association. Dans cette étude, est considéré le cas des matériaux les plus fréquemment utilisés dans les constructions mixtes : l'acier et le béton, avec l'idée d'utiliser le béton pour résister aux efforts de compression et l'acier pour résister aux efforts de traction.

On présente, dans ce projet de fin d'étude, les caractéristiques mécaniques principales des différents matériaux employés dans les constructions mixtes, à savoir le béton, l'acier d'armature et les aciers de construction afin de faciliter leur exploitation lors de la préparation d'un fichier de données pour l'analyse des constructions mixtes à l'aide de codes élaborés ou existants. Les références de base sont : Eurocode 2, Eurocode 3 et Eurocode 4 adoptés par le Comité Européen de Normalisation (CEN). Comme exemple d'application, on fait l'analyse par éléments finis d'une poutre mixte (acier-béton) à l'aide du logiciel ANSYS (version 12) en introduisant les lois de comportement de tous les matériaux constituant la structure étudiée (béton de la dalle, acier d'armature, acier de construction et connecteurs).

Mots clés :

Béton, acier d'armature, acier de construction, Poutre mixte, M.E.F, ANSYS.

الملخص :

يعرف عنصر هيكلي في بناء على انه مختلط اذا كان يجمع بين اثنين من المواد ذات الطبيعة و الخصائص مختلفة ، وذلك بهدف استخراج أفضل استخدام ميكانيكي لهذا الارتباط.
في دراستنا هته تعتبر المواد الاكثر استعمالا في البنايات المختلطة : الفولاذ و الخرسانة مع فكرة استغلال الخرسانة لتحمل قوى الضغط و الفولاذ لتحمل قوى الشد.
نبرز في هذا المشروع الخصائص الميكانيكية الرئيسية لمختلف المواد المستخدمة في البنايات المختلطة اي الخرسانة .فولاذ التسليح و فولاذ الهيكلة . وذلك لتسهيل استغلالها في تحضير ملف بيانات لتحليل بنايات مختلطة باستخدام مناهج متقدمة او موجودة . المراجع هي : اوروكود 2 ، اوروكود 3 و اوروكود 4. التي اعتمدتها اللجنة الأوروبية للتقييس. كمثال تطبيقي نقوم بتحليل عارضة مختلطة (خرسانة – فولاذ) باستخدام طريقة العناصر المحدودة بواسطة برنامج التحليل ANSYS الإصدار 12 بإدخال قانون سلوك جميع المواد المكونة للبناية المدروسة.

كلمات مفتحيه :

الخرسانة ، فولاذ التسليح ، فولاذ الهيكلة ، عارضة مختلطة ، طريقة العناصر المحدودة ، ANSYS.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction

La construction mixte (acier-béton) n'est pas récente, son utilisation dans le bâtiment et dans les ponts repose sur des qualités complémentaires connues depuis de nombreuses années. Dans tous les cas, il s'agit d'une combinaison entre deux matériaux l'acier et le béton armé.

Dans le cas des *poutres mixtes* et *dalles mixtes*, le profilé est connecté mécaniquement à la dalle de béton. Cette connexion offre une importante résistance au cisaillement à l'interface des deux matériaux, leur permettant de travailler ensemble en flexion. La dalle de béton, outre son rôle de surface porteuse, permet la reprise des efforts de compression ainsi qu'une protection complémentaire intéressante du profilé en acier contre la corrosion et l'incendie, l'acier reprenant principalement les efforts de traction.

Des recherches entreprises à travers le monde, ont démontré que l'association de l'acier et du béton entraîne une réduction des contraintes et des flèches.

Le comportement « monobloc » des deux matériaux exige l'emploi des éléments de connexion, appelés « connecteurs » qui empêchent le glissement et la séparation des deux matériaux.

Problématique

Les matériaux de bonnes caractéristiques donnent une construction mixte durable et les mauvaises caractéristiques des matériaux peuvent être la cause principale de rupture d'une construction.

La sécurité d'une construction mixte dépend, donc, du contrôle strict de la qualité des matériaux suivants :

- Le béton,
- L'acier des barres d'armature,
- L'acier des profilés métalliques,
- L'acier des connecteurs.

Objectif

L'objectif de ce travail de recherche est l'analyse des caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés en construction mixte (acier-béton).

Pour menu à bien notre travaille, nous allons suivre les étapes suivantes :

Nous présentons dans **le premier chapitre**, une étude bibliographique sur les différents éléments structuraux d'une construction mixte (acier-béton), et les caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés dans ces éléments mixtes. On commence par la définition d'une construction mixte et les différents éléments structuraux, ensuite, nous présentons le rôle des connecteurs et les caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés en construction mixte (béton, acier de construction, acier d'armature et tôle profilée en acier)

L'objet du **deuxième chapitre** est la caractérisation expérimentale des matériaux utilisés dans la construction mixte en utilisant des essais de compressions sur des éprouvettes en béton et des essais de tractions sur des éprouvettes normalisées en acier (acier de construction et d'armature).

Le troisième chapitre est consacré au l'analyse de poutre mixte par la méthode des éléments finis en utilisant les caractéristiques mécaniques et les lois de comportements obtenu.

Enfin, nous terminons notre mémoire par une **conclusion générale** pour ressortir tous les résultats importants de ce projet de fin d'études.

- ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE -
Généralités sur les matériaux utilisés en construction mixte (acier – béton)

I. 1 - Introduction

D'une manière générale, une structure peut être définie comme mixte si, au niveau de la plupart de ses éléments (poutres, poteaux, assemblages, dalles), elle associe deux matériaux de natures et de propriétés différentes, ici l'acier et le béton, avec l'objectif de tirer le Meilleur parti possible de cette association, tant sur le plan du fonctionnement structural que sur celui du coût de construction. Il convient en particulier de distinguer les structures mixtes des structures hybrides, parfois appelées improprement mixtes, composées d'éléments homogènes de matériaux différents, par exemple un bâtiment avec un noyau en béton armé sur lequel prend appui une charpente constituée exclusivement de poutres et poteaux en acier. Au premier abord, l'idée d'utiliser dans un élément mixte, par exemple une poutre mixte de section classique, d'une part le béton pour reprendre un effort de compression, d'autre part l'acier pour reprendre un effort de traction et un effort tranchant, ne Serait pas, à elle seule, très originale par comparaison au béton armé traditionnel.

En fait, ce qui est tout à fait spécifique du fonctionnement d'un élément mixte, c'est l'association mécanique des deux matériaux, Acier et béton, par l'intermédiaire d'une connexion située à L'interface des matériaux, qui va accroître à la fois la rigidité et la résistance de l'élément. Des modèles de calcul sont donnés ultérieurement pour une évaluation précise de cette rigidité et de cette résistance ; mais on peut illustrer simplement l'effet d'une connexion en considérant L'exemple de la flexion élastique de deux poutres, de Même section rectangulaire et d'un même matériau pour simplifier, dont l'une est supportée par l'autre; dans un cas on suppose qu'il n'y a pas de liaison à l'interface des poutres, dans l'autre que la solidarisation est parfaite (Fig. I. 1).

Un calcul élémentaire de résistance des matériaux montre alors Que les contraintes de flexion, par suite de la solidarisation, sont divisées par 2 et les flèches par 4.

Il convient de préciser qu'en général, dans les éléments mixtes, l'adhérence entre le composant en acier et celui en béton n'existe pas naturellement, et que la solidarisation doit être obtenue au moyen d'organes de liaison, appelés « connecteurs ».

Il existe une grande variété de connecteurs en construction mixte mais, à l'heure actuelle, en bâtiment, la connexion est le plus souvent réalisée par des goujons à tête, fixés sur l'élément métallique par soudage électrique à l'aide d'un pistolet adéquat (Fig. I. 2. *a*). En alternative aux

goujons soudés, on peut utiliser des cornières (fabriquées par pliage à froid) qui sont clouées à l'aide d'un pistolet à cartouches, donc ne nécessitant pas d'opération de soudage, mais présentant une résistance moindre que les goujons soudés (Fig. I. 2. *b*). On peut envisager également, mais cela est assez rare en bâtiment, l'utilisation de butées soudées, en forme de tasseau ou de tronçons découpés dans des profilés en cornière (Fig. I. 2. *c* et *d*), également dans des fers en T.

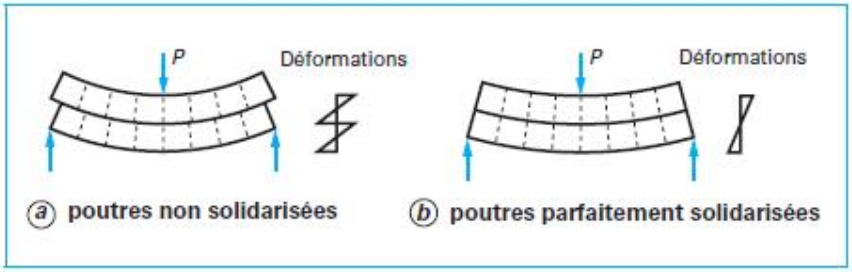


Figure - I - 1 : Effet de la solidarisation entre deux poutres en flexion élastique

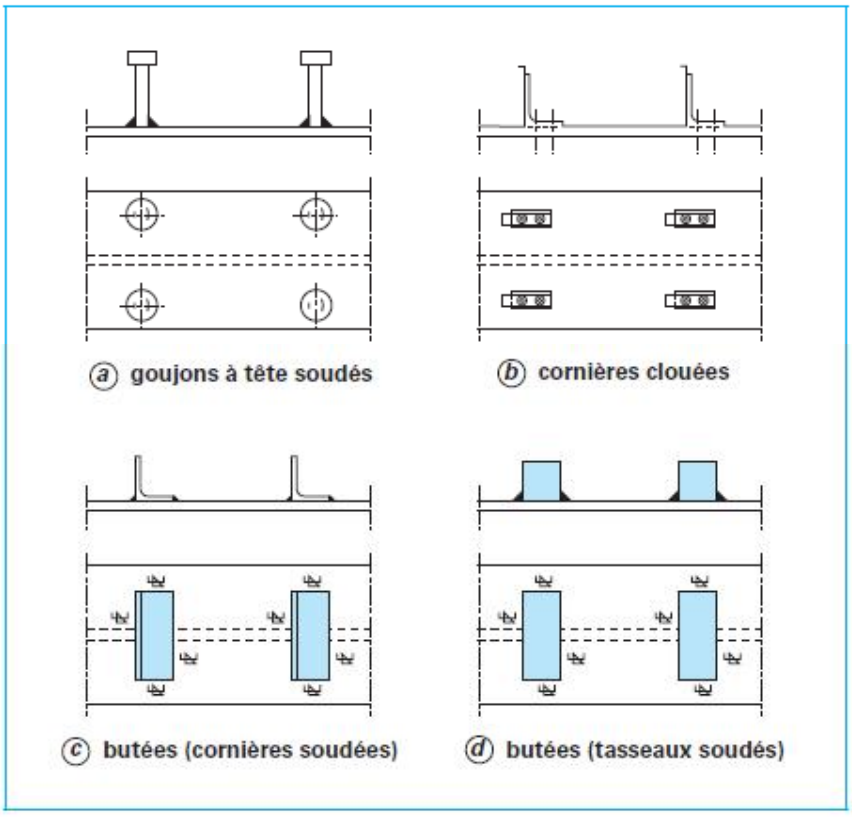


Figure - I - 2 : Types de connecteurs utilisés en bâtiment

Le rôle principal des connecteurs est d'empêcher, ou au moins de limiter, le glissement pouvant se produire entre l'acier et le béton, c'est-à-dire le déplacement relatif entre les deux matériaux parallèlement à leur interface. Selon l'importance de l'effort de cisaillement longitudinal à transférer entre les deux matériaux, on sera amené à distinguer par la suite deux modes de connexion, à savoir la « connexion complète » et la « connexion partielle », chaque mode relevant d'une méthode de dimensionnement spécifique **[1]**.

Un autre rôle des connecteurs est de s'opposer à la séparation des deux matériaux transversalement à leur interface ; ce rôle, qui n'exige pas de reprendre des efforts aussi importants que ceux venant du cisaillement longitudinal, est en général satisfait de par la forme même des connecteurs (tête d'un goujon, extrémité supérieure recourbée d'une cornière clouée) ou l'adjonction d'un dispositif simple (filant traversant une cornière soudée, arceau soudé sur une butée en tasseau).

Enfin, il convient de souligner que le mode de fonctionnement mixte avec son aspect connexion ne se limite pas au seul cas des poutres mais concerne, à des variantes près, tous les autres types d'éléments mixtes : poteaux, assemblages, dalles, etc.

I. 2 - Description de différents éléments de construction mixte (acier-béton)

Dans une construction mixte **[5]**, on peut distinguer trois types principaux d'éléments mixtes :

Les poutres mixtes - les dalles mixtes et les poteaux mixtes (Fig. I. 3).

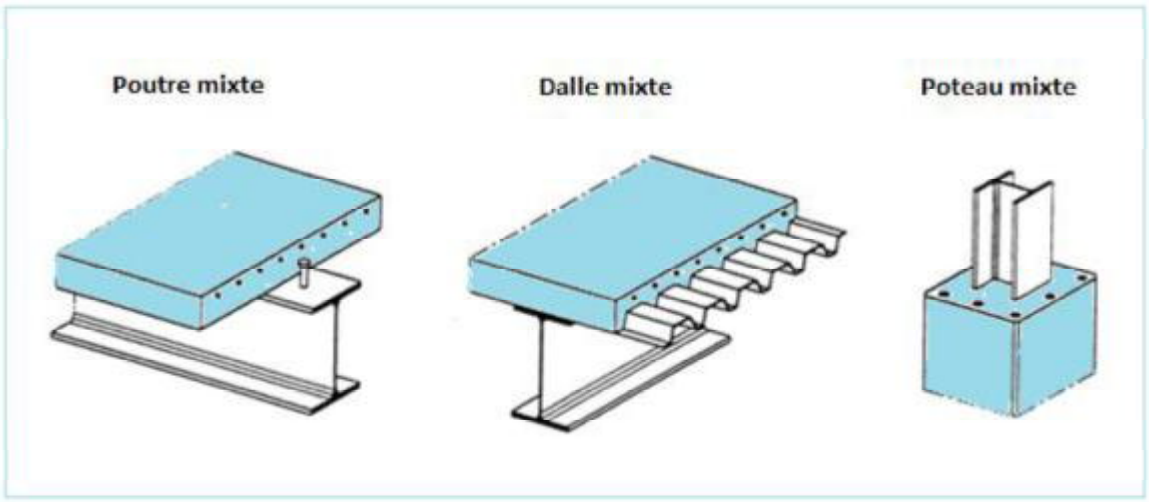


Figure - I - 3 : Exemples d'éléments mixtes (acier-béton)

I. 2. 1 - Poteaux mixtes (acier-béton)

Il existe une grande variété de poteaux mixtes. Les plus courants présentent une section carrée ou rectangulaire, obtenue à partir d'un profilé en acier, de type I ou H, enrobé totalement de béton (Fig. I. 4. *a*) ou partiellement enrobé dans les deux chambres comprises entre l'âme et les semelles (Fig. I. 4. *b*). Une section complètement enrobée peut fort bien contenir deux profilés juxtaposés à condition que soit ménagé un écart suffisant entre ces profilés permettant un remplissage correct du béton. La section cruciforme (Fig. I. 4. *c*) fait appel à deux profilés, identiques ou non, dont l'un est découpé en deux T qui sont ensuite ressoudés de part et d'autre de l'âme du second. Ce type de section ne peut se concevoir qu'avec des profilés nettement plus hauts que larges, d'une hauteur d'au moins 400 mm, la mise en place de l'armature des chambres n'étant pas très aisée et le bétonnage, s'il est réalisé au sol, nécessitant quatre opérations. Vu le caractère quasi isotrope de la résistance au flambement de ce type de poteau, il peut être intéressant de l'utiliser dans des zones de forte sismicité. Si l'on revient au cas d'un poteau rectangulaire, totalement ou partiellement enrobé de béton, avec un profilé de grande hauteur, il peut être avantageux de renforcer le profilé dans chaque chambre par un ou plusieurs petits profilés en H ou en T à ailes épaisses, soudés sur l'âme (Fig. I. 4. *d*) ; la résistance au flambement va s'en trouver améliorée, et en particulier de manière appréciable vis-à-vis de l'incendie. On rencontre également des poteaux mixtes constitués de profilés creux remplis de béton (en général armé mais pas nécessairement), de forme carrée, rectangulaire ou circulaire (Fig. I. 4. *e* et *f*) répondant à certains critères architecturaux et économiques (en France, ce type de poteau est très utilisé). La présence de barres longitudinales d'armature (dont le pourcentage ne dépasse guère 5 à 6 %) joue ici un rôle essentiel si le poteau doit satisfaire à une durée de résistance au feu de 90 ou 120 min. Dans certains cas, il arrive qu'un profilé en acier, de section I ou H, soit positionné à l'intérieur d'un profilé creux circulaire (Fig. I. 4. *g*).

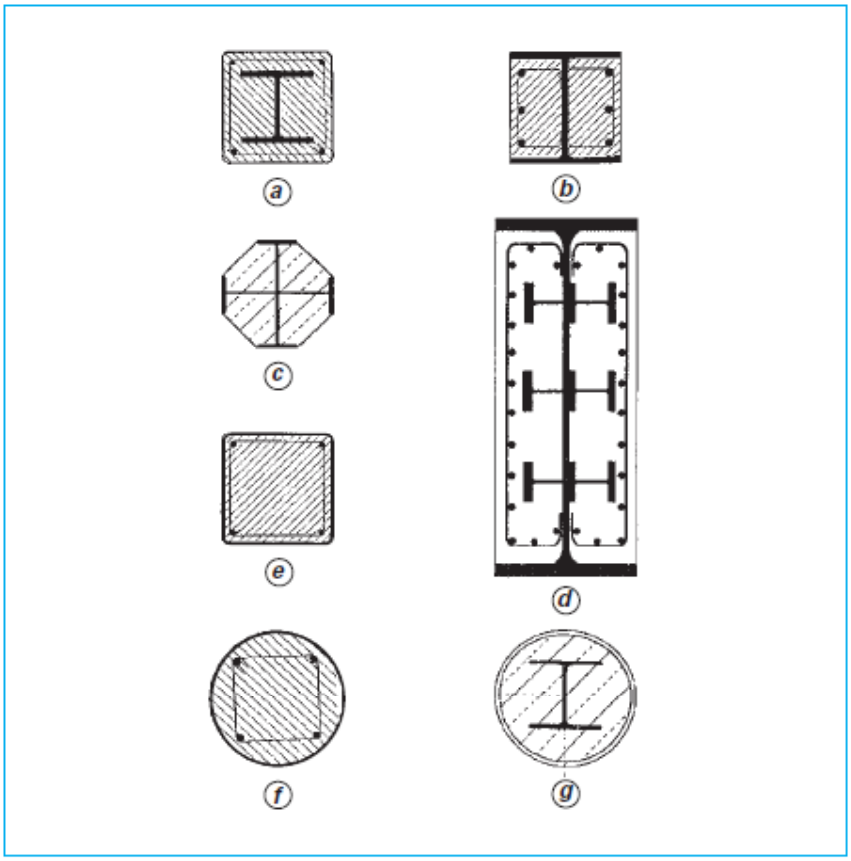


Figure - I - 4 : Types de poteaux mixtes

Le remplissage des profilés creux par le béton (sans excès d'eau, pour éviter une ségrégation, mais additionné de plastifiants) peut s'effectuer par gravité, par pompe à béton ou tube plongeur, ou encore par trémie à vidange par le fond (chaque fois que la dimension des profilés creux le permet, il est conseillé d'utiliser un tube plongeur).

Les poteaux étant des éléments essentiellement soumis à de la compression, même s'ils restent toujours des éléments comprimés et fléchis, le cisaillement longitudinal à l'interface acier-béton est nettement plus faible qu'avec les poutres mixtes, et il n'est pas nécessaire, en général, d'utiliser des connecteurs sur la partie courante de leur hauteur pour assurer la collaboration complète des deux matériaux. Il peut en aller différemment aux extrémités des poteaux où des efforts venant des poutres attachées (notamment des efforts tranchants) doivent être repris en section mixte de poteau sur une longueur, dite « de transfert », relativement courte (de l'ordre de deux fois la dimension transversale appropriée du poteau). L'ajout de connecteurs peut s'avérer nécessaire pour compléter la liaison par adhérence et frottement sur la longueur de transfert.

I. 2. 2 - Poutres mixtes (acier-béton)

Les poutres mixtes acier-béton sont des éléments porteurs fléchis et Il est connu que le béton a une bonne résistance à la compression mais une faible résistance à la traction, et l'acier se comporte aussi bien à la compression comme à la traction. L'élancement souvent élevé des éléments métalliques les rend sensibles à des phénomènes d'instabilité locaux dans les zones comprimées (Flambement, déversement et voilement).

La flexion d'une poutre composée d'un profilé métallique et d'une dalle en béton sans aucune liaison entre les deux ne procure pas une action mixte, car chaque élément fléchit d'une façon indépendante d'où un glissement entre les deux matériaux.

Dans le cas d'une connexion plus ou moins totale entre les deux matériaux permet une amélioration de la résistance et de la rigidité. Ceci dépend souvent du rapport entre les dimensions du profilé et l'épaisseur de la dalle.

- La section d'une poutre mixte est constituée d'une poutre métallique sur laquelle s'appuie une

Dalle en béton armé. La liaison acier-béton est réalisée par des connecteurs fixés sur la semelle

Supérieure du profilé métallique et noyés dans la dalle en béton, Elles peuvent être :

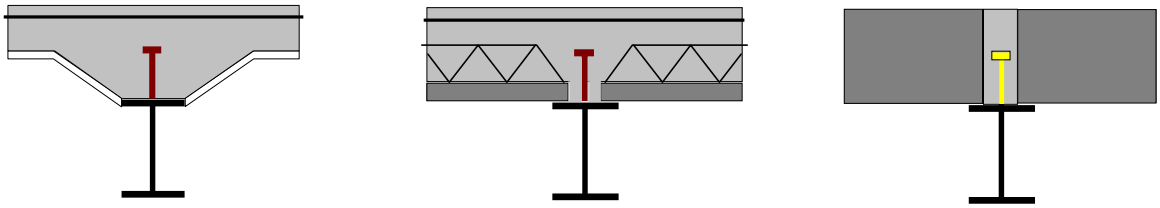
1-Des profilés métalliques plus des dalles coulées sur le coffrage.

2-Des profilés métalliques plus des dalles partiellement préfabriquées.

3-Des profilés métalliques plus des dalles complètement préfabriquées.

Il s'agit en général d'un profilé en acier connecté à une dalle de béton.

Cette dalle peut être coulée sur un coffrage non permanent ou sur un coffrage permanent, comme par exemple une tôle profilée en acier, ou une série de pré Dalles (Fig. I. 5).



Profilé+dalle coulée Sur place | Profilé+dalle partiellement préfabriquée | profilé+dalle complètement préfabriquée

Figure - I - 5 : différentes formes de poutre mixte. [2]

Il faut noter que le type de profilé métallique peut varier suivant le type d'application (Fig. I. 6)

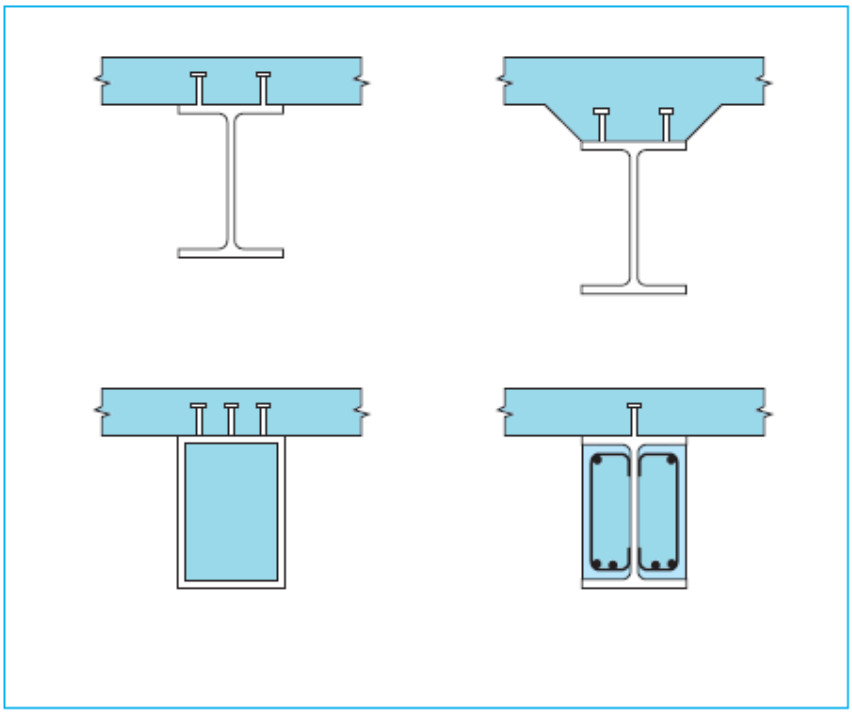


Figure - I - 6 : exemples de type de profilé métallique. [1]

Dans le cas d'un enrobage partiel du profilé en acier celui-ci procure une augmentation de la résistance au feu et au flambement.

Des connecteurs placés à l'interface entre le profilé et la dalle de béton (ou parfois soudés sur la Tôle profilée, comme dans le cas à la (Fig. I. 7) assurent une reprise des efforts de cisaillement

Longitudinaux appelés « effort rasant » ce qui permet d'obtenir une section mixte dont les différentes composantes travaillent ensemble en flexion.

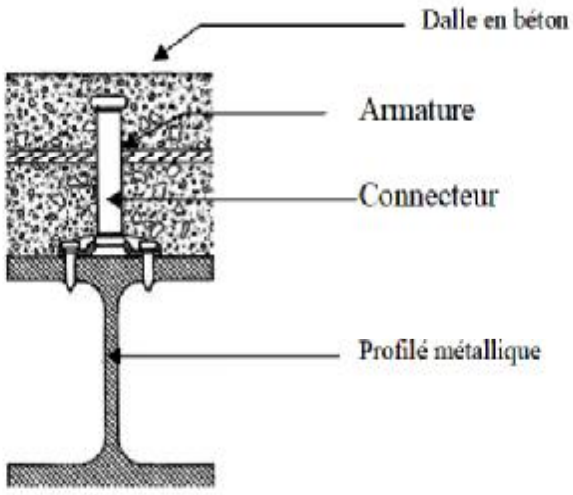


Figure - I - 7 : connexion entre la dalle en béton et le profilé. [3]

I. 2. 3 - Dalles mixtes (acier-béton)

Les ossatures de planchers mixtes sont constitués des solives supportant plus souvent des tôles profilées de forme généralement trapézoïdale, recouverte d'une dalle en béton, la liaison acier-béton est assurée soit par les nervures et les bossages soit par les connecteurs dans le cas des planchers collaborant (Fig. I. 8)

Différentes dalles mixtes peuvent être utilisées en combinaison avec une poutre en acier. Il s'agit:

- soit d'une dalle coulée in situ sur un platelage (tôles profilées en acier formées à froid) servant de coffrage permanent pour la dalle en béton; lorsque les nervures du platelage c'est-à-dire lorsqu'elles permettent de transmettre les efforts longitudinaux entre la tôle profilée en acier et le béton, la dalle finale agit comme une dalle mixte dans le sens des nervures du platelage
- soit d'une dalle composée d'éléments préfabriqués en béton (pré dalles ou hourdis) et de béton coulé sur chantier.

La hauteur totale des dalles mixtes varie en général de 120 à 180 mm; elle est fonction notamment de la résistance au feu exigée. La hauteur classique des nervures (de la tôle)

Se situe entre 40 et 85 mm. Les entraxes varient de 150 à 300 mm. L'épaisseur de la tôle utilisée varie entre 0,75 et 2 mm. Bien sûr, d'autres dimensions peuvent être utilisées en fonction de la destination du projet.

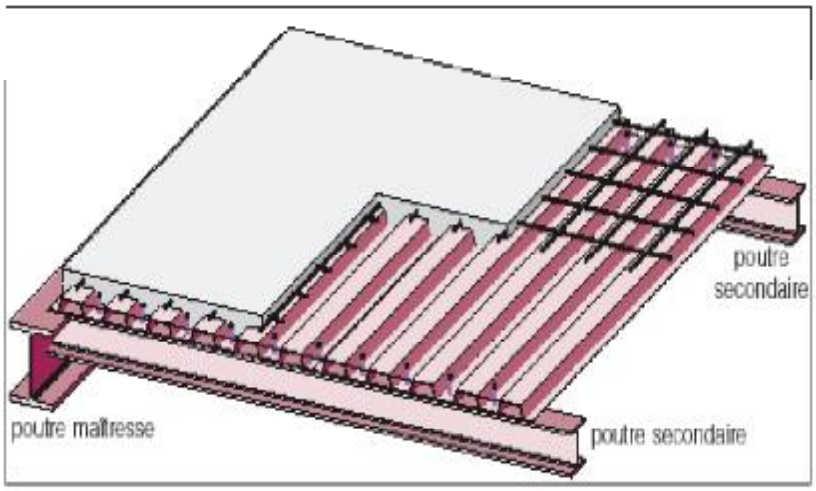


Figure - I - 8 : Dalle mixte acier-béton. [4]

L'adhérence du béton avec les tôles profilées est obtenue par liaison mécanique due à la présence de bossages ou d'embossages sur les parois des ondes de la tôle ou éventuellement de trous poinçonnés dans ces parois (Fig. I. 9. *a*), également par liaison de frottement en utilisant des ondes de formes rentrantes (Fig. I. 9. *b*), cette adhérence se trouve renforcée par l'ancrage d'extrémité assuré par la présence de goujons soudés ou autres connecteurs (Fig. I. 9. *c*), ou assuré par une déformation à l'écrasement partiel des ondes lorsque celles-ci sont de formes rentrantes (Fig. I. 9. *d*).

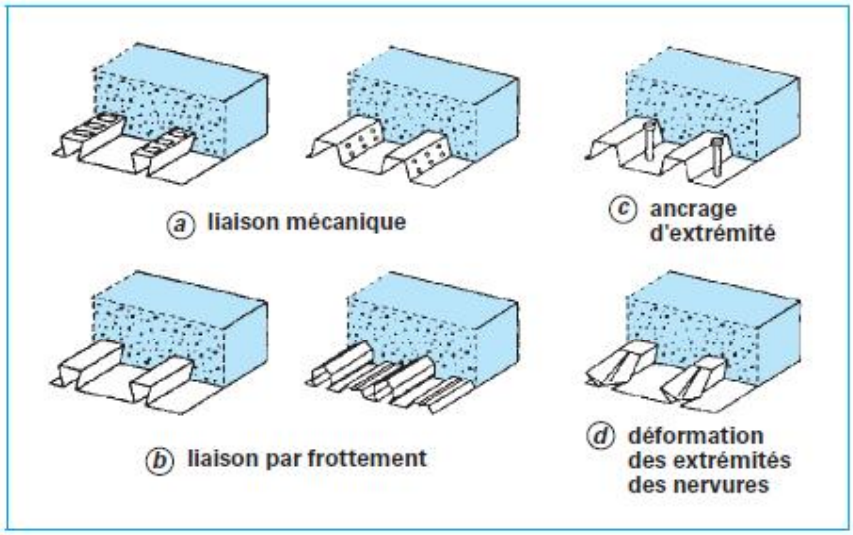


Figure - I - 9 : Modes d'adhérence des dalles mixtes. [1]

I. 3 - Matériaux utilisés dans un élément mixte (acier-béton)

Pour réaliser les différents éléments structuraux mixtes, on utilise généralement quatre matériaux de base :

- L'acier de construction
- L'acier d'armature
- Les tôles profilées en acier
- Le béton.

Ces matériaux sont décrits dans différentes codes [CBA93]. [CCM97]. Certaines exigences Essentielles sont abordées également dans des règlements comme les Eurocodes [EC2 .EC3. EC4]

I. 4 - Caractéristiques Mécaniques des matériaux

Pour effectuer les calculs de dimensionnement et de vérification des constructions mixtes, il faut donner les caractéristiques principales des différents matériaux, à savoir le béton, l'acier d'armature et les aciers de construction :

I. 4. 1 - Béton

Comme chacun le sait, la particularité principale du béton est de ne pas présenter le même comportement en compression et en traction, son comportement en traction est différent de celui en compression à cause de sa faible résistance à la traction (Fig. I. 10) présente l'allure de la

courbe expérimentale (contrainte-déformation) d'un béton normal ayant une résistance à la compression sur cylindre f_{ck} et une résistance à la traction f_{ctm} :

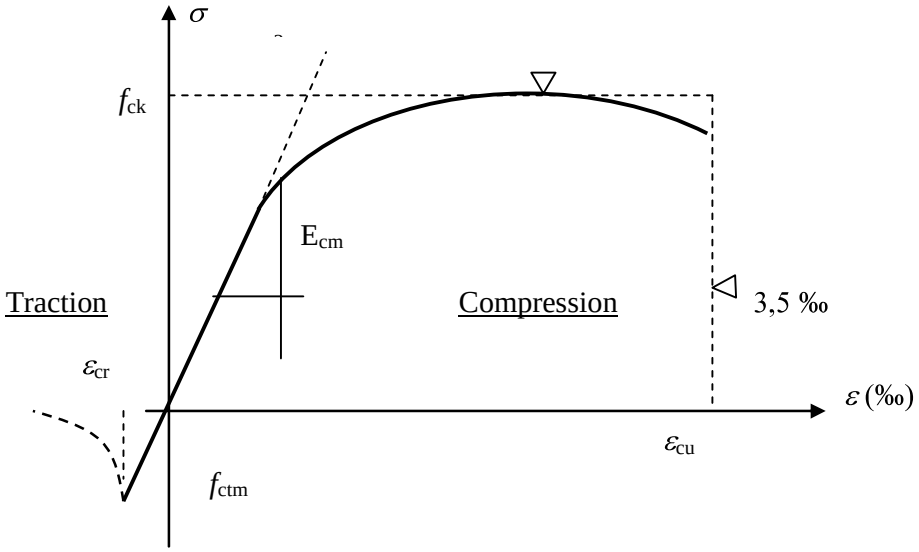


Figure - I - 10 : Diagramme contrainte – déformation d'un béton normal.

- Vu le comportement non-linéaire du béton, le module d'élasticité E_{cm} doit être interprété comme un module sécant moyen pour des contraintes de courte durée. Selon l'Eurocode 2 E_{cm} peut être établi à l'aide de la relation suivante :

$$E_{cm} = 9{,}5(f_{ck} + 8)^{1/3} \quad \ldots\ldots\ldots\

Tableau - I -1 : Principales caractéristiques des bétons de masse volumique normal. [6]

Classe de résistance du béton	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
f_{ck} (N/mm^2)	20	25	30	35	40	45	50
f_{ctm} (N/mm^2)	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1
E_{cm} (KN/mm^2)	29	30,5	32	33,5	35	36	37

- **Remarque:**

- La classe de résistance du béton (par exemple C20/25) se réfère à la résistance sur cylindre (f_{ck}=20N/mm^2), le deuxième nombre correspond à la résistance sur cube (f_c = 25 N/mm^2).

$f_{ck} \approx 0{,}8\ f_c$ …….…….(I. 2)

- ε_{cu} : la déformation ultime correspondante à la rupture totale du béton comprimé,

$\varepsilon_{cu} \approx 3{,}5$ ‰ ……...…….(I. 3)

- Le comportement du béton tendu est admis élastique linéaire jusqu'à la résistance maximale moyenne f_{ctm} pour une déformation de fissuration ε_{cr} ,

$\varepsilon_{cr} \approx 0{,}0001$ ……..……..(I. 4)

- La rupture est supposée fragile dès que ε_{cr} est atteint, et la résistance tombe brusquement à zéro pour toute déformation ultérieure (pour simplification, on néglige l'effet de raidissement du béton tendu entre les fissures « tension-stiffening-effect». **[9]**

- **Prise en compte des effets du fluage et de retrait**

Les propriétés du béton varient au cours du temps. Le fluage et le retrait sont les principaux phénomènes qui influencent le comportement du béton.

Fluage : le fluage est l'augmentation dans le temps de la déformation du béton soumis à une charge constante. Le mécanisme de fluage est lié aux mouvements de l'eau contenue dans les

micropores du gel de ciment hydraté. De nombreux facteurs comme la composition du béton, son âge lors de la mise en charge et les conditions climatiques influencent le fluage. Son évolution dans le temps dépend également des dimensions de la section. Dans le domaine élastique, le fluage du matériau **[5]** peut être pris en compte par l'intermédiaire du module d'élasticité $E_{c\varphi}$:

$E_{c\varphi} = E_{cm} / (1+\varphi)$ ……..…….(I. 5)

$E_{c\varphi}$: Module d'élasticité du béton pour les actions de longue durée ;

φ : Coefficient de fluage du béton.

Retrait : par retrait, on désigne le raccourcissement lent dans le temps d'un élément indépendamment de la charge. Le retrait est causé par l'évaporation de l'eau passive et par le rétrécissement du gel de ciment enrobant les granulats. La composition du béton, la géométrie de la pièce et les conditions climatiques sont les facteurs qui influencent ce retrait. Pour tenir compte le retrait du béton **[5]** :

$E_{c\varphi'} = E_{cm} / (1+0,5\varphi)$ …….(I. 6)

$E_{c\varphi'}$: Module d'élasticité du béton pour les actions de retrait.

- L'Eurocode 4 **[8]** propose d'adopter les valeurs suivantes pour le module d'élasticité longitudinale :

E_{cm} pour les actions de courte durée ;

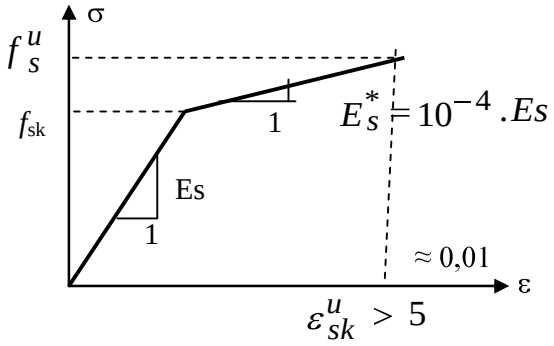
$E_{cm}/3$ pour les actions de longue durée ;

$E_{cm}/2$ pour les cas intermédiaires.

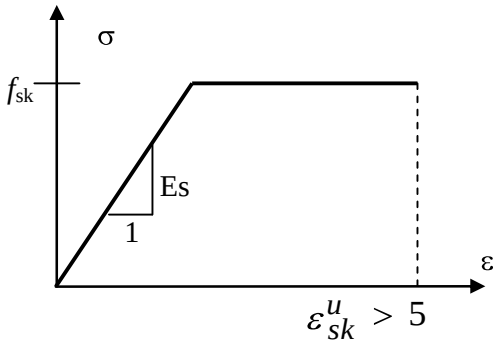
- En calcul plastique, l'influence du fluage et du retrait est négligeable du fait de la redistribution des moments de flexion qui efface l'effet de ces actions.

I. 4. 2 - Acier d'armature

Selon l'Eurocode 2 **[6]**, l'acier d'armatures est du type acier doux, son comportement est admis élasto-plastique écrouis-sable bilinéaire (Fig. I. 11. *a*) ou élastique parfaitement plastique comme cas particulier (Fig. I. 11.*b*) :



a) Elasto-plastique avec écrouissage linéaire (Module bilinéaire)



b) Elastique parfaitement plastique

Figure - I - 11 : Diagramme Contrainte-déformation pour l'acier d'armature

- Pour le calcul des constructions mixtes, l'Eurocode 4 **[8]** définit trois nuances d'acier d'armature, à savoir S220, S400 et S500, les nombres désignent la limite d'élasticité caractéristique spécifiée f_{sk} (en N/mm^2). La nuance S220 concerne les ronds lisses, alors que

Les nuances S400 et S500 concernent les barres à haute adhérence (y compris les treillis soudés).

• Le module d'élasticité E_s des armatures est de l'ordre de 190 à 200 KN/mm^2. Pour simplifier les calculs des éléments mixtes **[8]**, on prend pour E_s la valeur E_a = 210 KN/mm^2 de l'acier de construction.

• Pour le calcul plastique, on envisage essentiellement les nuances S400 et S500 satisfaisant à l'exigence de « haute ductilité ». Selon l'Eurocode 2 **[6]**, si f_s^u désigne la résistance ultime caractéristique de l'acier d'armature et ε^u_{sk} l'allongement unitaire correspondant à l'atteinte de cette résistance, l'exigence de haute ductilité répond aux critères suivants :

$\varepsilon^u_{sk} > 5$ ‰ et $f_s^u / f_{sk} > 1{,}08$ ……...….(I. 7)

I. 4. 3 - Acier de construction

Selon l'Eurocode 3 **[7]**, l'acier de construction a un comportement élasto-plastique avec un domaine de plasticité parfaite suivi du phénomène d'écrouissage (Fig. I. 12) présente le diagramme « contrainte – déformation » obtenu à partir d'un essai de traction sur éprouvettes en acier de construction.

• La courbe de comportement est supposé symétrique en traction et compression par rapport à l'origine, et caractérisée par la limite d'élasticité f_y, le module d'élasticité E_a , la résistance ultime à la traction f_u , et l'allongement à la rupture ε_u .

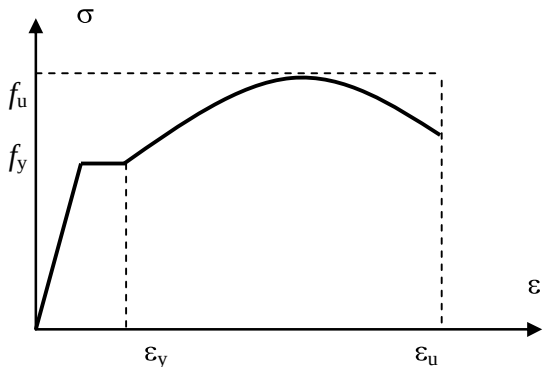


Figure - I - 12 : Diagramme contrainte déformation pour l'acier de construction

• L'Eurocode 4 **[8]** définit trois nuances d'acier de construction, à savoir S235, S275 et S355. La nuance d'un acier est définie par sa limite d'élasticité f_y. Le (Tableau. I. 2) donne la désignation et quelques caractéristiques des principaux aciers de construction :

Tableau - I - 2 : Nuances des principaux aciers de construction.

Nuance d'acier	Limite d'élasticité f_y (N/mm^2)	Résistance à la traction f_u (N/mm^2)	Allongement à rupture ε_u (%)	Ancienne dénomination
S235	235	360	26	E24
S275	275	430	22	E28
S355	355	510	22	E36

• L'analyse plastique des constructions mixtes exige que l'acier satisfasse aux trois conditions suivantes **[7]** :

- La résistance ultime en traction f_u doit être supérieure de 20 % au moins à la limite d'élasticité f_y :

$f_u \geq 1,20\, f_y$ ……..…….(I. 8)

- L'allongement à rupture ε_u doit être Supérieure à 15 % :

$\varepsilon_u \geq 0,15$ ……..…….(I. 9)

- L'allongement à rupture ε_u correspondant à f_u doit être supérieur à 20 fois l'allongement ε_y correspondant à f_y :

$\varepsilon_u \geq 20\, \varepsilon_y$ ……..…….(I. 10)

• Il existe d'autres caractéristiques communes pour toutes les nuances d'acier de construction :

- Module d'élasticité longitudinale

→ $E_a = 210.000$ N/mm^2

- Module de cisaillement

$\rightarrow$ $G_a = \frac{E_a}{2(1+\nu_a)}$ = 8100 N/mm^2

- Coefficient de poisson

$\rightarrow$ $\nu_a = 0,3$

- Masse volumique

$\rightarrow$ $\rho_a = 7850$ Kg/m^3

- Coefficient de dilatation thermique

$\rightarrow$ $\alpha_T = 10 \times 10^{-6}$ / °C

I. 4. 4 - Tôles profilées en acier pour dalles mixtes

- Dans une dalle mixte, la tôle mince profilée à froid sert de coffrage pendant le montage (avant durcissement du béton) ; en suite, après durcissement du béton, la tôle profilée joue le rôle d'une armature inférieure pour la dalle en béton.

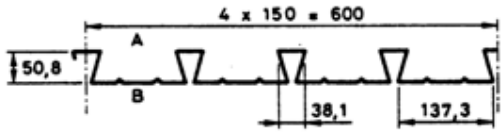
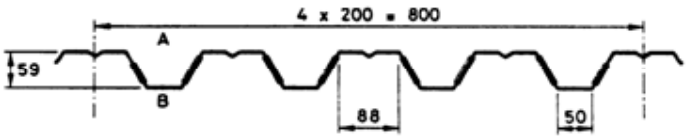
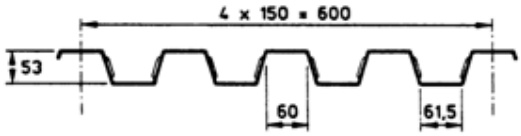
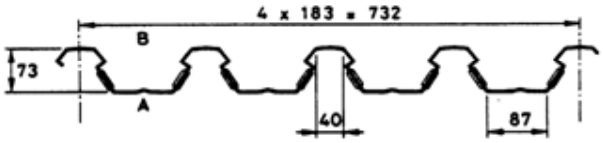
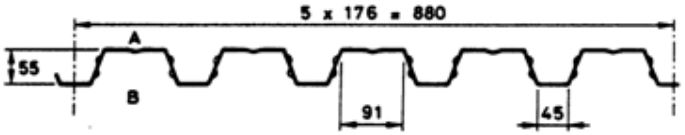
- Les formes des tôles profilées en acier (section et bossages) sont réalisées de manière à obtenir une bonne liaison entre la tôle et la dalle en béton (Tableau. I. 3)

- L'épaisseur des tôles est comprise entre 0,75 et 1,5 mm, chaque face étant protégée contre la corrosion par une couche de zinc d'épaisseur 0,02 mm environ (galvanisation à chaud).

- Le modèle de comportement élasto-plastique parfait avec le module d'élasticité longitudinal E_a = 210 KN/mm^2, qui s'applique aux aciers de construction, peut s'appliquer également aux matériaux de base des tôles profilées.

- L'Eurocode 4 **[8]** accepte les tôles profilées qui présentent des valeurs nominales de la limite d'élasticité du matériau de base f_{yb} allant de 220 à 350 N/mm

Tableau - I - 3 : Exemples de tôles profilées utilisées pour les dalles mixtes

TOLE PROFILEE	COUPE TYPE
HOLORIB 51	
COFRADAL 60	
HIBOND 55	
COFRASTRA 70	
HAIRCOL 55S	

I. 5 - Raisons d'utiliser des structures mixtes acier-béton

Tout dimensionnement doit non seulement prendre en compte l'optimisation de la résistance aux charges, de la raideur et de la ductilité mais également les aspects architecturaux, économiques, de fabrication et d'utilisation des poutres, dalles et poteaux.

I. 5. 1 - Aspects architecturaux

Les structures mixtes permettent de nombreuses variations architecturales pour combiner les différents éléments mixtes.

En plus de réduire les dimensions des poutres, la construction mixte permet

- des portées plus importantes

• des dalles plus minces

• des poteaux plus élancés et offre une grande flexibilité et de nombreuses possibilités lors de la conception.

I. 5. 2 - Aspects économiques

L'intérêt économique des structures mixtes provient de dimensions plus réduites (la rigidité plus élevée entraîne des flèches plus faibles, des portées plus grandes et des hauteurs totales plus faibles) et d'une construction plus rapide.

Les rapports portée sur hauteur (l/h=35) des poutres sont faibles et peuvent présenter plusieurs avantages:

• La réduction des hauteurs permet de réduire la hauteur totale du bâtiment et permet dès lors une diminution de la surface des murs extérieurs

• Les portées plus grandes pour des hauteurs identiques (par rapport aux autres méthodes de construction) permettent de réduire le nombre des poteaux par plancher ce qui offre plus de flexibilité

• Pour une même hauteur totale de bâtiment, celui-ci peut présenter plus d'étages.

Les structures mixtes sont simples à construire et présentent des temps de construction réduits:

--> Économie de coûts suite à la réalisation plus rapide du bâtiment

--> Coûts de financement plus faibles

--> Prêt à l'emploi plus rapidement et donc revenu d'utilisation plus élevé

I. 5. 3 - Fonctionnalité

Les structures métalliques traditionnelles présentent des systèmes de protection au feu rapportés qui permettent d'isoler l'acier de la chaleur due à l'incendie. Les structures métalliques et mixtes actuelles peuvent présenter une résistance au feu en utilisant les principes des constructions en béton armé dans lesquelles le béton protège l'acier grâce à sa masse élevée et sa conductivité thermique relativement faible.

Tout comme les planchers mixtes qui peuvent résister au feu, les poutres mixtes peuvent également être utilisés sans protection des semelles mais avec un enrobage de béton armé entre les semelles. Ce béton ne sert pas uniquement à maintenir des températures relativement basses dans la semelle supérieure et dans l'âme mais également à apporter de la résistance

flexionnelle compensant la perte de résistance de la semelle inférieure portée à haute température.

I. 5. 4 - Equipements et utilisation flexible du bâtiment

Les structures mixtes s'adaptent aisément aux modifications susceptibles de se produire durant la vie d'un bâtiment. Cela est particulièrement le cas lorsque la dalle est en présence de structures en portiques. Il est alors toujours possible de créer une nouvelle cage d'escalier entre deux planchers en ajoutant simplement les poutres de renvoi nécessaires. Les évolutions récentes dans les technologies informatiques, de communication et d'information ont montré l'importance d'être capable de modifier rapidement l'organisation des équipements d'un bâtiment. De plus, dans les bâtiments commerciaux ou en copropriété, il doit être possible de modifier les équipements sans occasionner d'inconvénient aux autres occupants. Pour résoudre ces problèmes, les ingénieurs doivent choisir entre plusieurs solutions. Il y a généralement trois manières d'installer les équipements:

- dans les faux-plafonds
- dans un faux-plancher
- dans des caissons situés le long des murs

L'espace entre les semelles d'une poutre mixte constitue une zone idéale dans laquelle les équipements peuvent être installés.

I. 6 - Les inconvénients

L'inconvénient principal de la construction mixte est la nécessité de la connexion au niveau de l'interface ce qui augmente le temps d'exécution et des dépenses.

- La difficulté de réaliser des assemblages lorsque l'élément mixte est complètement enrobé (exemple semelle de la poutre enrobée).
- Une méthode de construction légèrement plus compliquée par rapport aux méthodes traditionnelles et demande une main d'œuvre plus qualifiée.

Mais ces inconvenants sont rattrapés par le nombre important d'avantages déjà cités.

I. 7 - Conclusion

D'une manière générale, la construction mixte ; soit les poteaux, les poutres ou les dalles, présente un pas en avant pour la construction moderne, avec ces avantages elle autorise une grande flexibilité dans la conception globale et locale de la structure.

Cette flexibilité est obtenue par le large éventail de profilé en acier, tant sur le plan de leur géométrie que sur celui du type d'acier.

De plus, les connexions entre éléments, permettent aux matériaux constituant les éléments de se compléter sous sollicitations, pour faire face aux manques naturels dans les matériaux

Enfin, ce mode de réalisation, de par ses possibilités de combinaison avec le béton, offre de nombreux avantages économiques et techniques (montage rapide et précis, liaisons permettant de créer une structure monolithique,...).

Dans cette perspective ; cette étude consiste entre autres à étudier les avantages offrent par les constructions mixtes ; soit par les différentes poutrelles métalliques, soit par la dalle en béton et même la connexion entre les deux matériaux, on se limite, dans notre étude aux poutres mixtes acier-béton.

Et La connaissance des matériaux utilisés en construction mixte est nécessaire pour définir les caractéristiques mécaniques et intrinsèques de chaque matériau qui sont indispensables dans les phases de conception et de calcul.

- ETUDE EXPERIMENTALE -
Caractérisation des matériaux (caractéristiques mécaniques)

II. 1 - Introduction

Les essais mécaniques se considèrent comme étape indispensable pour accéder aux grandeurs caractéristiques des matériaux, (les contraintes de rupture, les modules d'Young, les limites d'élasticité, les limites de plasticité …).

Les essais utilisés dans notre étude sont **l'essai de compression et l'essai de traction** préparés selon les techniques expérimentales les plus couramment utilisées, aussi bien dans les laboratoires universitaires qu'industriels, pour caractériser le comportement mécanique des matériaux.

II. 2 - Caractérisation du béton

II. 2. 1 - Introduction

Les bétons sont des matériaux de construction qui contiennent du ciment, de l'eau, du sable et des granulats.

Ils peuvent être très différents les uns des autres selon la nature, les pourcentages des constituants, le malaxage et la mise en œuvre.

Le béton est constitué de :

- Liant (ciment)
- Eau
- Sable
- Granulats

- Les constituants (Fig. II. 1) qui nous avons utilisé pour notre béton est :

- Le ciment est **CPJ-CEM II / B** dans la classe **42.5** de masse volumique Absolue : **3.1 g/cm^3**.
- Le sable provient de l'oued **(sable roulés)** de diamètre maximum de **5mm** de masse volumique: **2.56 g/cm^3**.
- Les granulats sont de natures **concassés** de qualité courante leur diamètre varie de 8 à 25 mm de masse volumique : Les granulats 8/15 = **2.49 g/cm^3**
  et Les granulats 15/25 = **2.51 g/cm^3** ***(Voir ANNEXE -A- / A.3)***



Figure - II - 1 : Les constituants du béton

- Les résultats de l'analyse granulométrique par tamisage sur le sable est les granulats sont présentés dans les tableaux suivants : (***Voir ANNEXE -A- / A.4)***

Tableau - II - 1 : Analyse granulométrique du sable

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
5	0	0	0	100
2.5	140	140	9.35	90.65
1.25	157	297	19.83	80.17
0.63	107	404	26.98	73.02
0.315	387	791	52.84	47.16
0.16	513	1304	87.1	12.9
0.125	130	1434	95.79	4.21
0.08	48	1482	98.99	1.01
Fond	15	1497	100	0

Tableau - II - 2 : Analyse granulométrique pour les granulats 8/15

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
16	50	50	3.34	96.66
12.5	901	951	63.52	36.48
10	427	1378	92.05	7.95
8	111	1489	99.46	0.54
6.3	6	1495	99.86	0.14
Fond	2	1497	100	0

Tableau - II - 3 : Analyse granulométrique pour les granulats 15/25

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
25	0	0	0	100
20	910	910	45.52	54.48
16	897	1807	90.39	9.61
12.5	176	1983	99.2	0.8
10	2	1985	99.3	0.7
Fond	14	1999	100	0

Les valeurs données sur les différents tableaux ci-dessus nous permettent de tracer les courbes granulométriques pour chaque type de granulats (Fig. II. 2).

Le module de finesse est particulièrement appliqué aux sables dont il est une caractéristique importante.

C'est le centième de la somme des refus (exprimé en pourcentage de poids) aux tamis de

(0.16 ; 0.315 ; 0.63 ; 1.25 ; 2.5 ; 5) mm

M_f = (0+9.35+ 19.83+26.98 +52.84 +87.1) /1OO = **1.96**

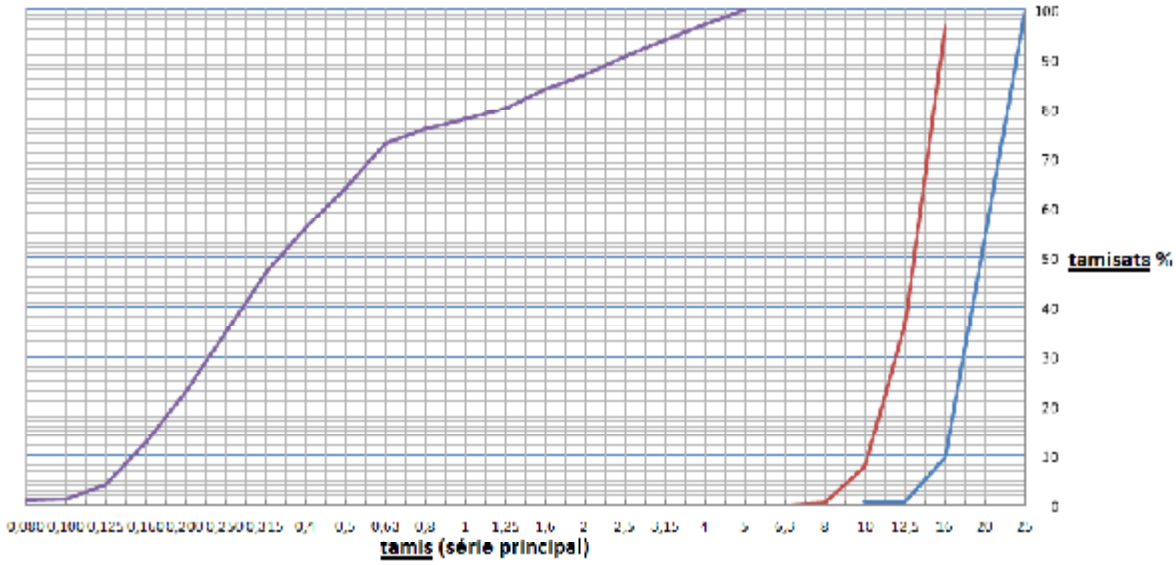


Figure - II - 2 : les courbes granulométriques

II. 2. 2 - Compositions des bétons *(Voir ANNEXE -A- / A.5)*

Les différentes compositions utilisées dans cette étude ont été déterminées par la méthode de Dreux-Gorisse **[13,14]**.

Le (Tableau. II.4) résume l'ensemble des trois compositions testées, à savoir les bétons B1, B2 et B3.

5 éprouvettes (16/32) ont été préparées pour chaque composition.

Les éprouvettes ont été démoules 24 heures après le coulage et testées à 28 jours d'âge.

Tableau - II - 4 : Compositions des différents bétons

Bétons / composition : Kg/m^3	Béton 1	Béton 2	Béton 3
Sable	761.52	715.8	665.9
Gravier 8/15	473	443.85	451.7
Gravier 15/25	575.7	605.3	609.9
Ciment	320	375	420
Eau	202.5	202.7	198.1

La masse volumique théorique des bétons entre 2300 et 2400 Kg /m^3

II. 2. 3 - Préparation du béton

1. Mettre la bétonnière en marche. Pendant qu'elle est en train de tourner, verser 1/2 à 2/3 de l'eau nécessaire à la gâchée
2. Verser le gravier et laisser tourner quelques secondes pour qu'il soit bien mouillé
3. Verser le ciment qui va se délayer dans l'eau et se répartir uniformément autour des grains de gravier
4. Verser le sable au seau ou à la pelle, après avoir repéré le volume d'une pelletée
5. En surveillant le mélange, verser un peu d'eau en complément, sans dépasser le dosage prévu.

- **Temps de gâchage**

Une bétonnière met un temps très court pour gâcher du béton : 2 à 3 min seulement. Un temps de malaxage trop long peut nuire à l'homogénéité du béton. Le malaxage du béton accéléré la prise du ciment.

- **Préparation et remplissage des moules:**

Si une rehausse de remplissage est utilisée, la quantité de béton destinée à remplir les moules doit être suffisante pour qu'il reste (**éprouvettes cylindriques 16×32 cm^2)**, après serrage, une couche de béton dans celle-ci, ayant une épaisseur de 10 % a 20% de la hauteur de l'éprouvette.

Les échantillons doivent être serres en au moins deux couches, mais l'épaisseur dune couche ne doit pas dépasser 100mm.

II. 2. 4 - Conservation des éprouvettes

Les éprouvettes doivent rester dans la moule et être protégées contre les chocs, les vibrations et La dessiccations pendant 24 h, a la température de 20 C $\pm$ 5 C (Fig. II. 3)



Figure - II - 3 : Conservation des éprouvettes avant démoulage

Apres démoulage, les éprouvettes doivent être entreposées dans l'eau jusqu'au moment de l'essai (28 jours), a une température de 20 C $\pm$ 2 C, ou dans une chambre a 20 C $\pm$ 2 C et une hygrométrie relative >= 95% (Fig. II. 4)

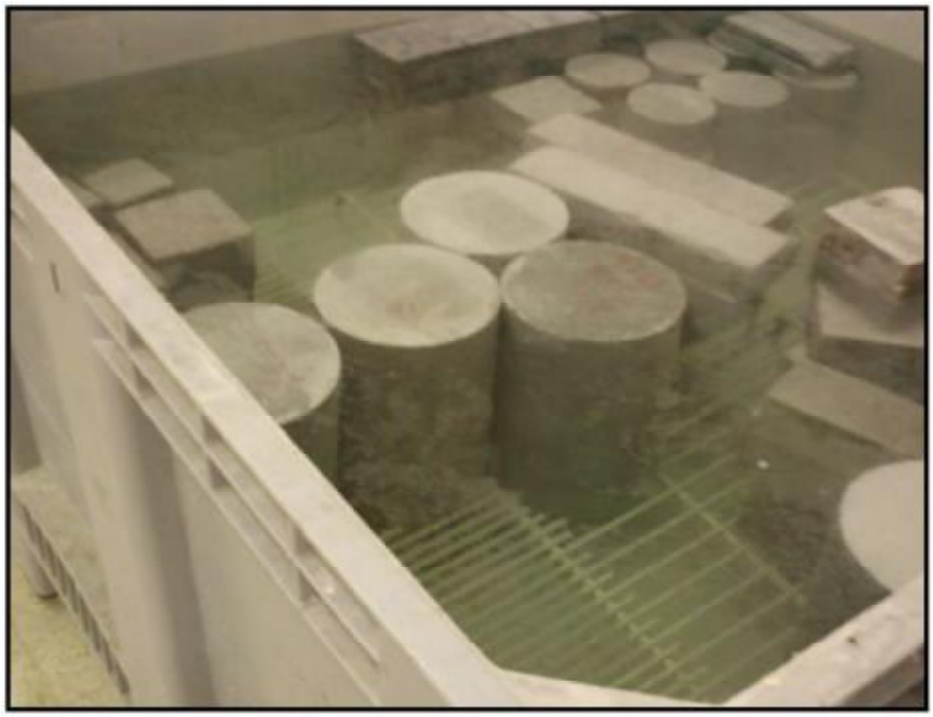


Figure - II - 4 : Conservation des éprouvettes après démoulage

II. 2. 5 - Essais de compression (EN 12309-3) [15]

- **Objectif de l'essai**

L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression du béton, qui peut être mesurée en laboratoire sur des éprouvettes.

- **Principe de l'essai**

Les éprouvettes étudiées sont soumises à une charge croissante jusqu'à la rupture. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette.

- **Equipement nécessaire**

  - Une machine d'essai qui est une presse de force et de dimension appropriées à l'éprouvette à tester.
  - Un moyen pour rectifier les extrémités des éprouvettes.

Rectification des extrémités des éprouvettes

L'essai de compression est effectué sur des éprouvettes cylindriques dont les extrémités ont été préalablement rectifiées. En effet, si les éprouvettes étaient placées telles quelles sur les plateaux

de la presse, on ne serait pas assuré de la planéité des surfaces au contact et de leur perpendicularité aux génératrices de l'éprouvette. La rectification consiste donc à rendre ces surfaces planes et perpendiculaires aux génératrices de l'éprouvette (Fig. II.5).

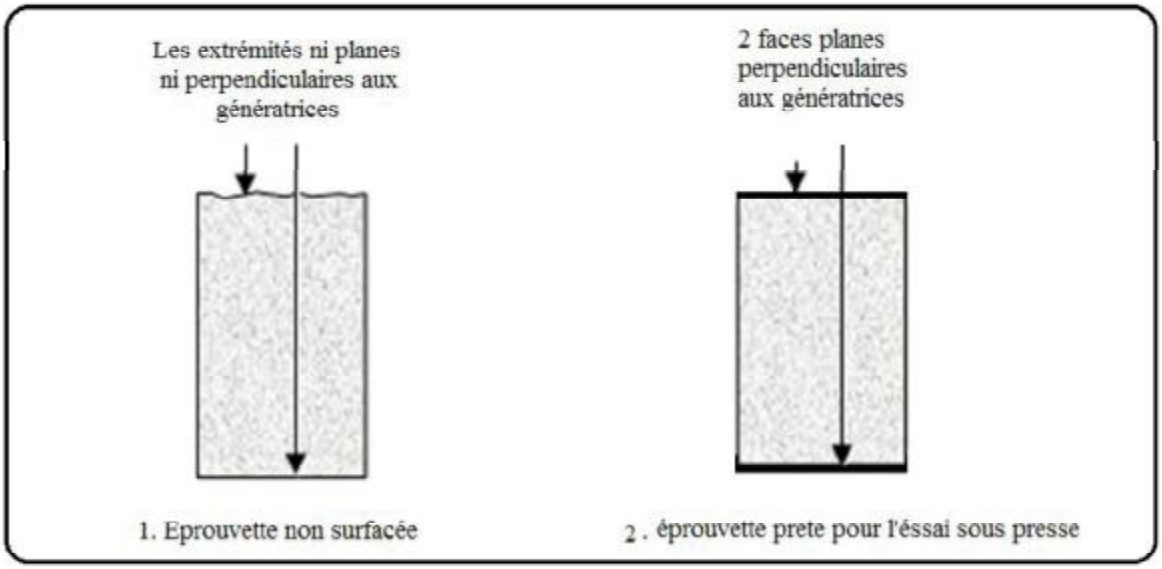


Figure - II - 5 : Principe du Rectification

L'éprouvette, une fois rectifiée, doit être centrée sur la presse d'essai (état d'humidité de l'éprouvette au moment de l'essai est **SEC**).

La mise en charge doit être effectuée à raison de 0,5 Mpa/s avec une tolérance de 0,2 MPa/s. Pour des éprouvettes 11×12 cela signifie une montée en charge de 5KN/s±2KN/s et pour des éprouvettes 16 × 32 de 10 KN/s ±4 KN/s (Fig. II. 6).



Figure - II - 6 : La mise en charge jusque à la rupture

La charge de rupture, P, est la charge maximale enregistrée au cours de l'essai. Soit S la section orthogonale de l'éprouvette.

$$f_c = \frac{P}{S} \quad \text{.....(II. 1)}$$

Où **P** est la charge maximale,

ET **S** la section de l'éprouvette.

Dans la relation ci-dessus f_c est directement obtenue en Mpa si P est exprimée en méga newton (MN) et S en m^2

- Les résultats de l'essai de compression (l'écrasement d'éprouvette) sont présentés dans le tableau : (Tableau. II. 5) (NF P 18-305) **[16]**

- La résistance caractéristique (f_{ck}) étant toujours inférieur a la valeur moyenne (f_{moy})

f_{ck} = min {(f_{moy}) -1.2 S_f ; ($R_{i\,min}$) + 4 MPa}.....(II. 2)

- f_{moy} : la résistance moyenne = (ΣR_i /n)
- avec **n** le nombre des éprouvettes.
- R_i : la résistance à la compression d'une éprouvette a 28 jours.

- S_f : l'écart type = $([\Sigma(f_{moy} - R_i)^2]^{1/2} /n-1)$ ……..…(II. 3)

- La valeur du module d'élasticité instantané E_c dépende fortement de f_{ck} .selon l'Eurocode 2. E_c peut être établi à l'aide de la relation suivante :

$$E_C = 9500\ (f_{ck} + 8)^{1/3} \text{……(II. 4)}$$

- E_c est exprimé en (N/mm^2)
- f_{ck} en (N/mm^2)

- L'Eurocode 2 précise que la résistance à la rupture a la compression

$$f_{cu} = 0.85\ f_{ck} \text{……(II. 5)}$$

- L'Eurocode 2 précise que la résistance à la traction à **j** jours peut être prise égale à :

pour des bétons < C 50/60 $f_{tj} = 0.3\ (f_{cj})^{2/3}$ …….(II. 6)

Tableau - II - 5 : La résistance à la compression et les caractéristiques mécaniques des bétons

Bétons	Classe	éprouvette	R_i MPa	f_{moy} MPa	f_{ck} MPa	$f_{t\,28}$ MPa	E_c MPa
1	C 20/25	1	23.5	22.6	21.2	2.3	29253.95
		2	20				
		3	21.5				
		4	26				
		5	22				
2	C 25/30	1	28.5	27	25.9	2.62	30746.11
		2	26.5				
		3	27.5				
		4	24				
		5	28.5				
3	C 30/37	1	33.5	33.4	32.5	3.05	32624.35
		2	31.5				
		3	35				
		4	32.5				
		5	34.5				

II. 2. 6 - Loi de comportement (contrainte – déformation)

II. 2. 6. 1 - Béton comprimée

Les règles EN 1992 -1-1 :2004 (Eurocode 2)**[6]** définit une loi de comportement en compression (relation contrainte – déformation) par :

$$f_c / f_{ck} = (K \,.\, \eta - \eta^2) / 1 + (K-2)\,\eta \quad \text{.....(II. 7)}$$

$\rightarrow f_c = f_{ck} .(K . \eta - \eta^2) / (1+(K-2)\eta)$

et : $\eta = \varepsilon / \varepsilon_c$ et : $K=1.05\ E_C\ (\varepsilon_c / f_{ck})$

Avec : $\varepsilon_{ce} = 0.002$

$\varepsilon_{cu} = 0.0035$

II. 2. 6. 2 - Béton tendu

$\varepsilon_{cr} = 0.0001$

$\varepsilon_{tu} = 0.002$

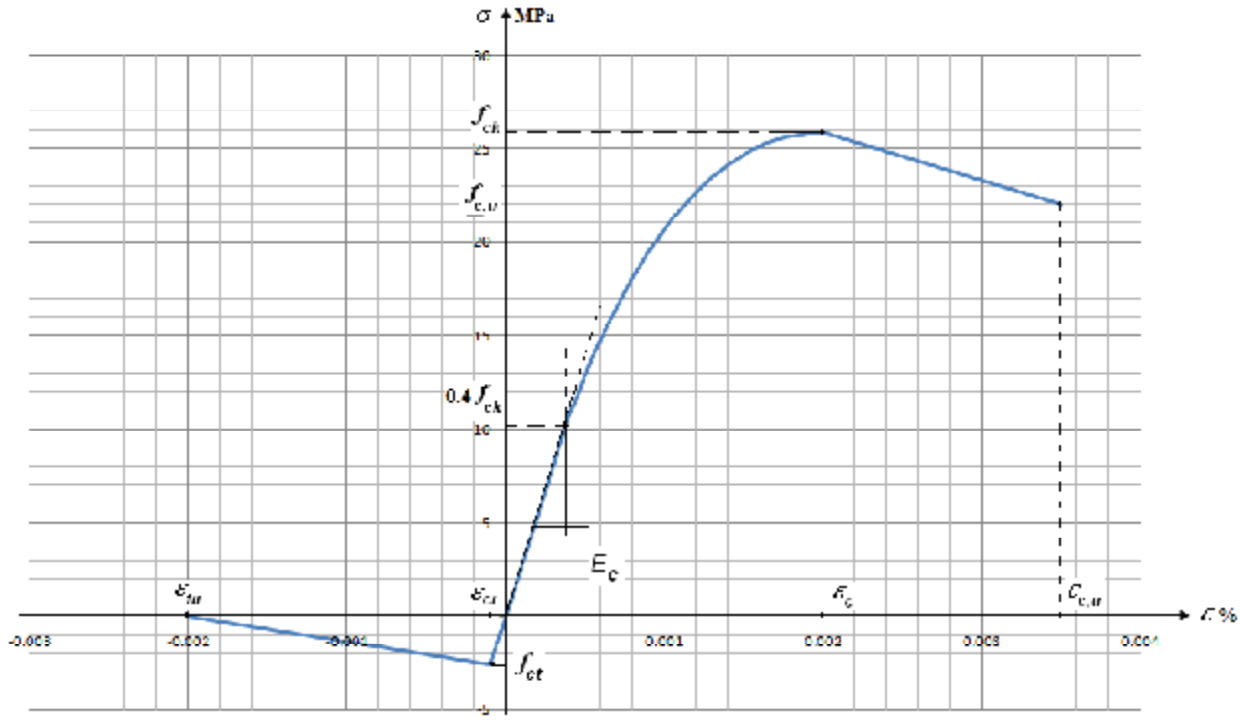


Figure - II -7 : la courbe contrainte-déformation du notre béton classe C 25/30

II. 3 - Caractérisation des aciers

L'essai de traction constitue un des essais les plus utilisés pour la caractérisation mécanique des aciers

II. 3. 1 - Acier de construction

Les caractéristiques mécaniques de l'acier de construction sont déterminées à partir des essais de traction réalisés sur des éprouvettes normalisées découpées des profilés métalliques. Dans cette section, nous donnons, tout d'abord, les dimensions des éprouvettes testées, ensuite, le principe de l'essai de traction et les résultats des essais.

II. 3. 1. 1 - Préparation des éprouvettes

Trois éprouvettes identiques en acier ont été enlevées de l'âme des profilés métalliques IPE80, IPE100 et IPE120. Les dimensions des éprouvettes plates sont préparées selon la norme américaine **ASTM [17]** de façon à respecter la relation entre la longueur de l'éprouvette et sa section transversale (Fig. II. 8). Avec $\boldsymbol{A}$ aire initiale de la section transversale de l'éprouvette et $\boldsymbol{L_0}$ la longueur initiale entre les repères de mesure, la norme exige que la longueur $\boldsymbol{L_0}$ de l'éprouvette doit respecter la condition suivante :

$$L_0 = 2.825\sqrt{A} \quad \text{.....(II. 8)}$$

A en mm^2 $\rightarrow L_0$ en cm

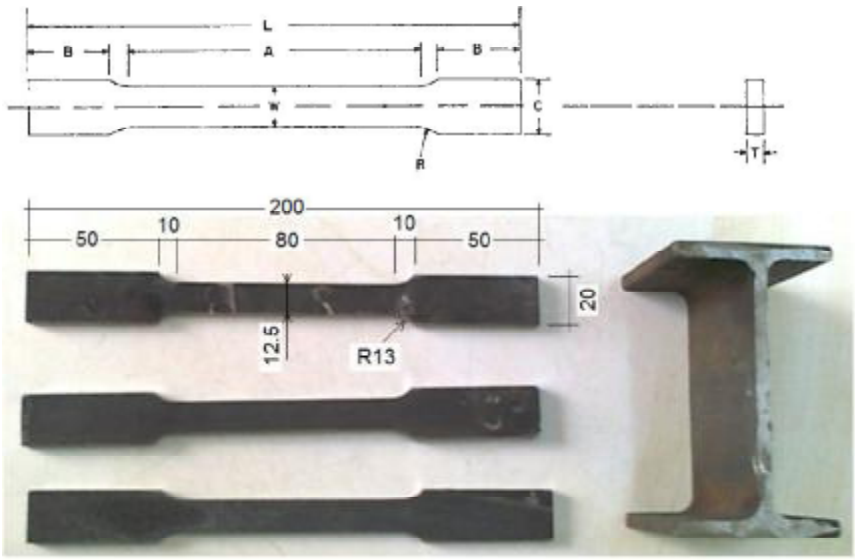


Figure - II - 8 : D**imensions des éprouvettes**

II. 3. 1. 2 - Essai de traction

L'essai de traction consiste à exercer un effort de traction progressif sur une éprouvette en acier jusqu'à sa rupture (Fig. II. 10). En utilisant une machine de traction équipée d'un capteur de force de capacité égale à 120 KN (Fig. II. 9). Le chargement a été appliqué lentement par incréments de charges jusqu'à la rupture de l'éprouvette. La durée de l'essai étant environ 15 minutes.

Pendant chaque incrément de charge, l'allongement de l'éprouvette a été mesuré à l'aide d'un capteur de déplacement ayant une course de ± 20 millimètres.

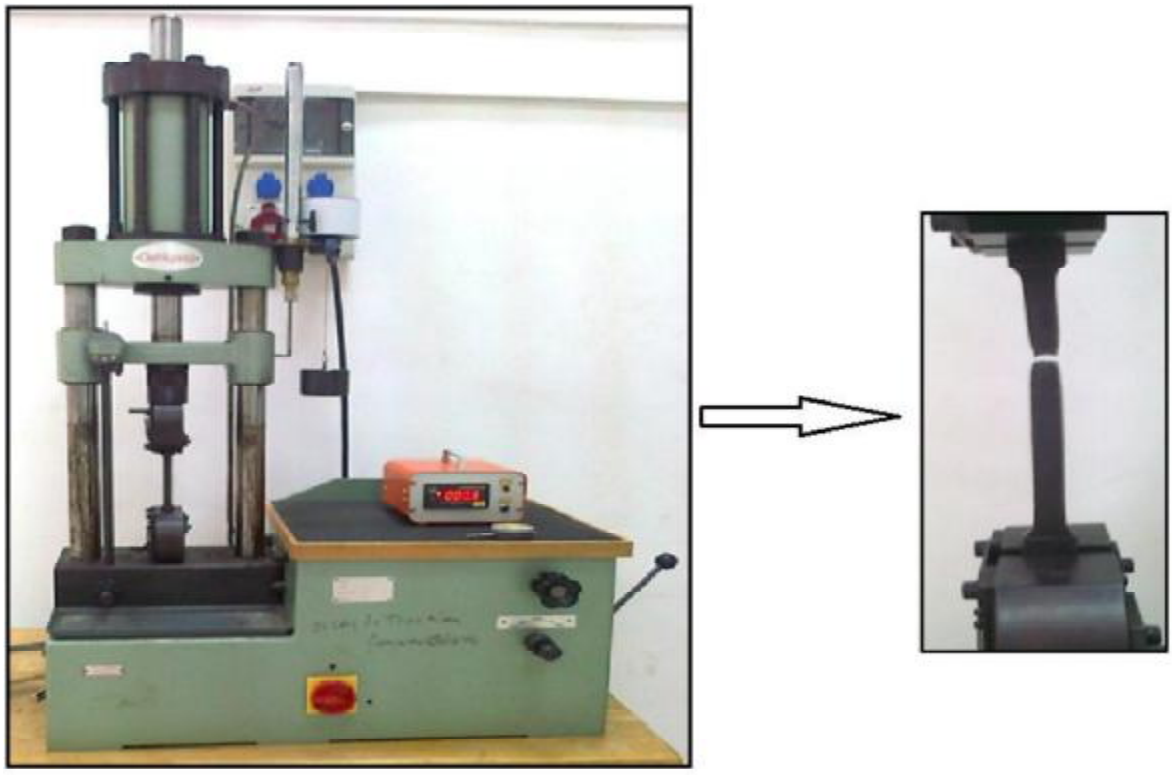


Figure - II - 9 : Machine de traction et éprouvettes testées (acier de construction)



Figure - II - 10 : éprouvettes testées (Apres sa rupture)

II. 3. 1. 3 - Résultats des essais

Les résultats des essais de traction exercés sur des éprouvettes prélevées de l'âme des profilés métalliques sont présentés dans le (Tableau. II. 6). Ce tableau inclut la résistance élastique (f_y), la résistance ultime (f_u) et l'allongement relatif maximal (ε_u).

Tableau - II - 6 : Caractéristiques mécaniques de l'acier de construction

Profilé Nuance	Eprouvette (i)	$f_{y\,i}$ (MPa)	f_y moyenne (MPa)	$f_{u\,i}$ (MPa)	f_u moyenne (MPa)	$\varepsilon_{u\,i}$ (%)	ε_u moyen (%)
IPE80 (S235)	1	236	233	347	344	23	21
	2	231		343		18	
	3	232		342		22	
IPE100 (S235)	1	239	241	353	356	26	27
	2	243		357		28	
	3	241		358		27	
IPE120 (S235)	1	239	237	349	350	25	24
	2	234		353		22	
	3	238		348		26	

Un enregistrement graphique mesure l'allongement de l'éprouvette en fonction de l'effort de traction appliqué. On obtient un diagramme effort/allongement que l'on peut traduire en (contrainte – déformation) selon la (Fig. II. 11) avec :

$$\sigma = F/A \ (N/mm^2) \ldots\ldots\ldots \text{(II. 9)}$$

$$\varepsilon = \Delta L/L_0 \ (\%) \ldots\ldots\ldots\ldots \text{(II. 10)}$$

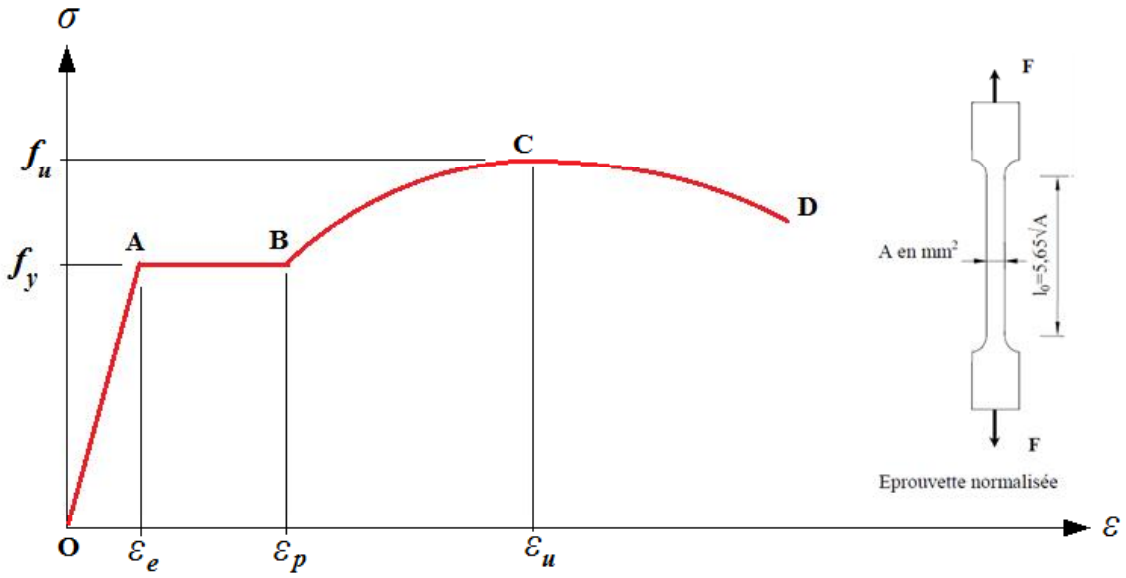


Figure - II - 11 : Exemple d'une courbe (contrainte-déformation)

Ce diagramme se décompose en deux zones distinctes :

Zone OA : zone rectiligne, les allongements sont proportionnels aux efforts appliqués, c'est la zone élastique, si l'on supprime l'effort N, l'éprouvette revient à sa position initiale, l'allongement est donc réversible, la loi de Hooke est applicable, $\sigma = E.\varepsilon$.

Zone AC : c'est la zone plastique qui comprend trois phases :

- **Phase A B** : c'est un palier horizontal qui représente le début de la zone plastique, il traduit un allongement sous charge constante, on dit qu'il y a un écoulement du matériau.
- **Phase B C** : le chargement croit à nouveau avec les allongements jusqu'au point **C** qui exprime la charge maximale que peut supporter l'éprouvette, le point **C** correspond à la valeur de la résistance à la rupture en traction f_u , c'est le domaine de l'écrouissage.
- **Phase CD** : l'allongement continue, bien que la charge soit décroissante jusqu'au point **D** qui correspond à la rupture.

En pratique, le comportement réel de l'acier en traction est modélisé par un comportement élasto-plastique parfait, ceci simplifie les calculs et donne à la structure plus de sécurité.

II. 3. 2 - Acier d'armature

Comme pour l'acier de construction, nous avons effectué des essais de traction sur l'acier d'armature. Trois éprouvettes identiques en acier ont été découpées des barres d'armature à haute adhérence H.A. de nuance S400 et de diamètres Ø8 et Ø10 (Fig. II. 12). Les résultats des essais de traction effectués sur ces éprouvettes sont présentés dans le (Tableau. II.7).

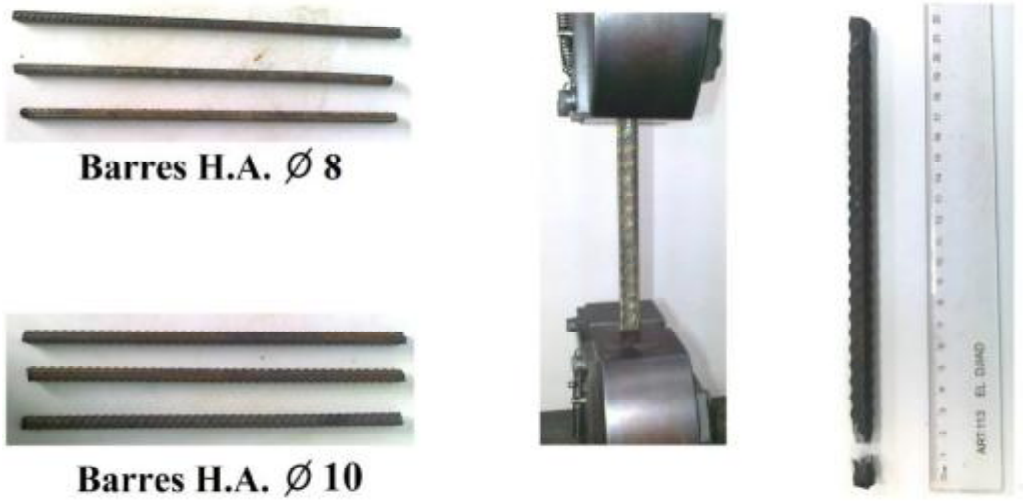


Figure - II - 12 : Eprouvettes testées (acier d'armature)

Tableau - II - 7 : Caractéristiques mécaniques de l'acier d'armature

Barres H.A. Nuance	Eprouvette (i)	$f_{y\,i}$ (MPa)	f_y moyenne (MPa)	$f_{u\,i}$ (MPa)	f_u moyenne (MPa)	$\varepsilon_{u\,i}$ (%)	ε_u moyen (%)
Ø 8 (S400)	1	408	411	601	605	14	13
	2	413		609		10	
	3	412		605		15	
Ø 10 (S400)	1	239	404	353	593	16	15
	2	243		357		14	
	3	241		358		15	

Les valeurs des allongements mesurées au cours du chargement permettent de tracer le diagramme (force-allongement) convertis à la courbe (contrainte-déformation) indiquée à la

(Fig. II.13).

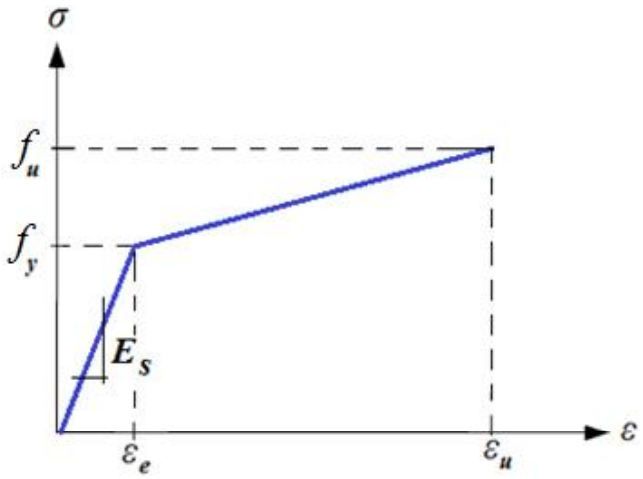


Figure - II - 13 : Diagramme (contrainte-déformation)

Ce diagramme se caractérise par deux branches, une branche élastique et une branche plastique. Il est caractérisé par le module d'Young à l'origine E_s, la résistance élastique f_y et les coordonnées (ε_u , f_u) du point ultime.

II. 4 - CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté les caractéristiques mécaniques nécessaires des matériaux (béton, acier de construction et acier d'armature) utilisés dans les constructions mixtes à l'aide des essais pratiques.

Les essais réalisés montrent que :

- Malgré que les cinq éprouvettes cylindriques sont prélevées d'un seul mélange de béton mais après l'écrasement elles donnent des résistances légèrement différentes.
- Avant d'écraser les éprouvettes en béton il faut faire un surfaçage strict afin d'obtenir des résultats correctes.
- Les essais de traction effectués sur les éprouvettes en acier montrent un comportement élasto-plastique.

Les essais sont réalisés dans le laboratoire de mécanique et laboratoire de génie civil de l'université de M'sila.

- EXEMPLE D'APPLICATION - Analyse par éléments finis du comportement d'une poutre mixte (acier-béton)

III. 1 - Introduction

Depuis le début des années 1980, la modélisation par éléments finis des poutres mixtes s'occupe de plus en plus du problème de glissement qui se produit toujours a l'interface entre la dalle en béton et la poutre métallique, soit en connexion complète ou en connexion partielle, à cause de l'utilisation des connecteurs ductiles (goujons à tête, équerres clouées HVB,….). Les modèles monodimensionnels donnent des résultats satisfaisants pour le comportement global, mais, ils ne peuvent pas fournir des résultats concernant le comportement local, par exemple la distribution des contraintes et des déformations dans tous les points de la section mixte et la localisation des zones de plastification dans le profilé d'acier. Cependant, les modèles bidimensionnels (2D) et tridimensionnels (3D) peuvent simuler des structures plus complexes et peuvent fournir tous les détails de comportement. Mais à cause de la complexité des modèles tridimensionnels (difficulté de maillage, occupation de grand espace de mémoire, problèmes de convergence numérique, temps de résolution important, difficulté d'interprétation des résultats), nous avons choisi pour notre étude la modélisation bidimensionnelle car elle est simple et plus pratique.

Dans ce chapitre on présente un modèle d'éléments finis bidimensionnel en utilisant le code ANSYS **[21]** pour l'analyse du comportement des poutres mixtes simplement appuyées. La validation du modèle proposé se fait par comparaison des résultats numériques avec des résultats expérimentaux tirés de la littérature.

III. 2 - Système de poutre mixte simplement appuyée

Le système étudié est une poutre mixte simplement appuyée. La section de la poutre mixte est constituée d'une poutre en acier de profilé en « I » connectée à une dalle pleine en béton armé à l'aide de connecteurs fixés sur la semelle supérieure de la poutre métallique et ancrés dans la dalle en béton (Fig. III. 1).

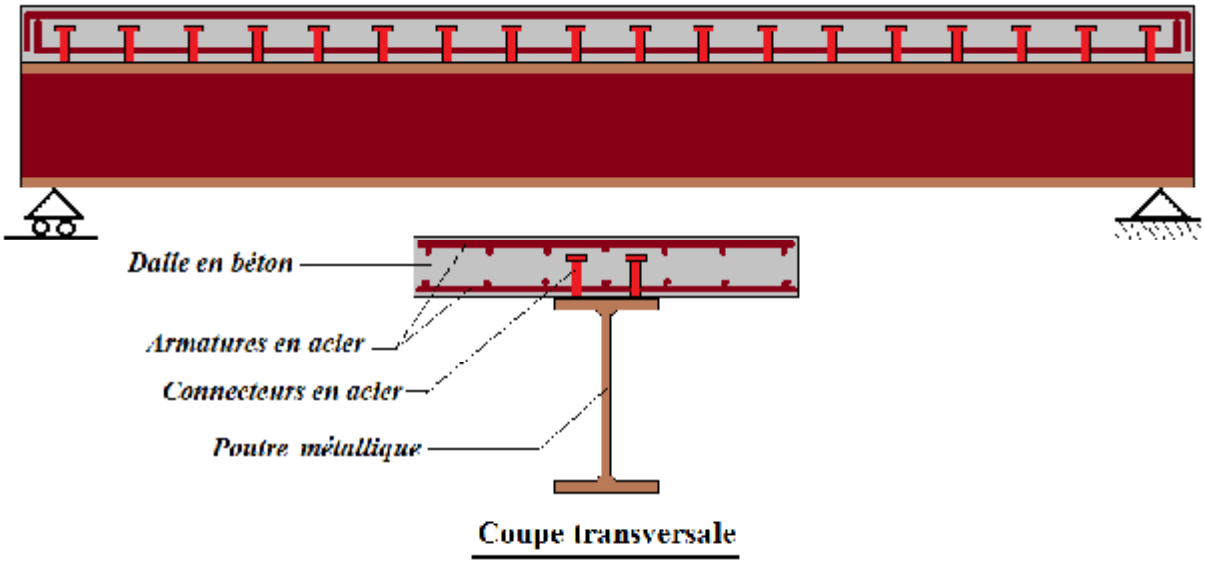


Figure - III - 1 : Système de poutre mixte simplement appuyée

III. 3 - Modèle d'éléments finis

Le système de poutre mixte présenté à la (Fig. III. 1) est simulé par une modélisation bidimensionnelle en utilisant le code d'éléments finis ANSYS **[21]**. Les parties constituant ce système sont la dalle en béton, la poutre métallique, les barres d'armature et les connecteurs. Afin d'obtenir une simulation correcte, toutes ces parties doivent être modélisées en tenant compte leur non-linéarité matérielle.

III. 3. 1 - Types d'éléments finis utilisés

- La dalle en béton est modélisée par des éléments plans a quatre nœuds (PLANE 42) avec une épaisseur qui correspond à la largeur effective (b_{eff}) de la dalle ;
- Les barres d'armatures sont modélisées de manière discrète par des éléments barres à deux nœuds (LINK1) en supposant une adhérence parfaite avec le béton car la prise en compte du glissement entre armatures et béton n'apporte pas de modification significative au comportement global à cause de nombreuses barres transversales placées pour éviter la fissuration longitudinale.
- Pour la poutre métallique, on utilise des éléments plans à quatre nœuds (PLANE42) en prenant en compte la différence d'épaisseur entre âme et semelle, pour l'âme on prend l'épaisseur t_w, pour les semelles on prend la largeur b_f comme épaisseur de l'élément fini plan.

- Les connecteurs sont modélisés par des éléments ressorts non-linaires (spring éléments : COMBINE39) qui sont attachés aux nœuds de la face supérieure de la poutre métallique et aux nœuds de la face inférieure de la dalle en béton en respectant leurs positions réelles.
- Afin de transmettre les charges de la dalle en béton à la poutre métallique, on fait le couplage des nœuds qui sont situés en coïncidence à l'interface acier-béton. Cet arrangement empêche le chevauchement ou la séparation des nœuds à l'interface de liaison acier-béton tout en permettant leur glissement relatif.

III. 3. 2 - Maillage et conditions aux limites

Par symétrie, on ne représente que la moitié de la structure modélisée (Fig. III. 2) en respectant les conditions aux limites suivantes :

- Les nœuds de la dalle en béton et les nœuds de la poutre métallique par lesquels passe l'axe de symétrie sont bloqués horizontalement (dans la direction X) ;

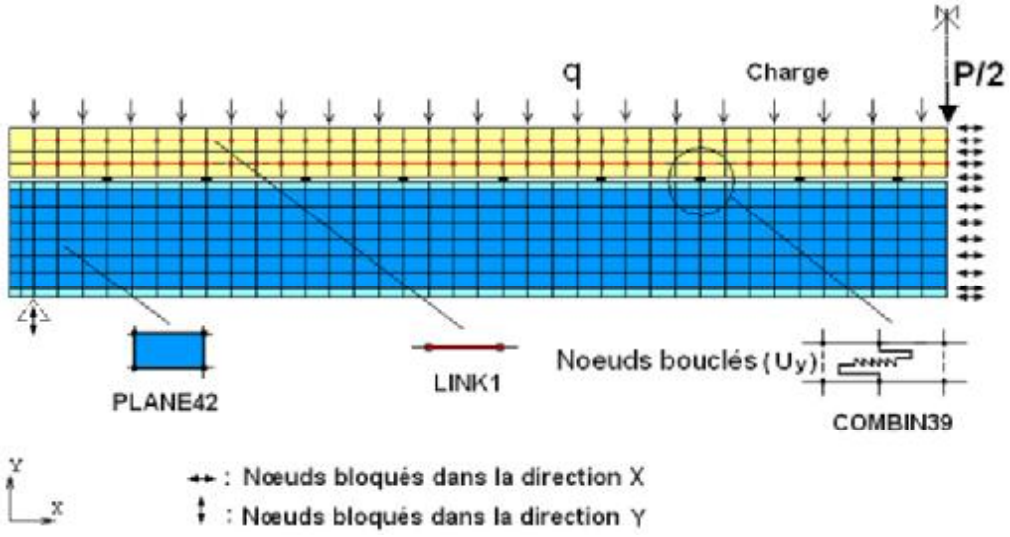


Figure - III - 2 : Maillage et conditions aux limites

III. 3. 3 - Modélisation des matériaux

Le modèle bidimensionnel proposé tient en compte la non-linéarité matérielle du béton de la dalle, de l'acier d'armature et de l'acier de construction de la poutre métallique, il tient aussi en compte le comportement non-linéaire des connecteurs au cisaillement, mais la non- linéarité géométrique n'est pas prise en considération parce que les déformations sont très faibles par rapport aux dimensions de la structure.

III. 3. 3. 1 - Béton de la dalle

Le modèle utilisé pour le béton est celui proposé par l'Eurocode 2 **[19]** qu'il a une forme non-linéaire en compression et bilinéaire en traction en admettant que le béton tendu résiste encore après sa fissuration grâce à l'adhérence entre le béton et les barres d'armature. Cet effet de raidissement appelé « tension stiffening » est pris en compte en considérant qu'à partir de f_t la courbe devient horizontale (Fig. III. 3).

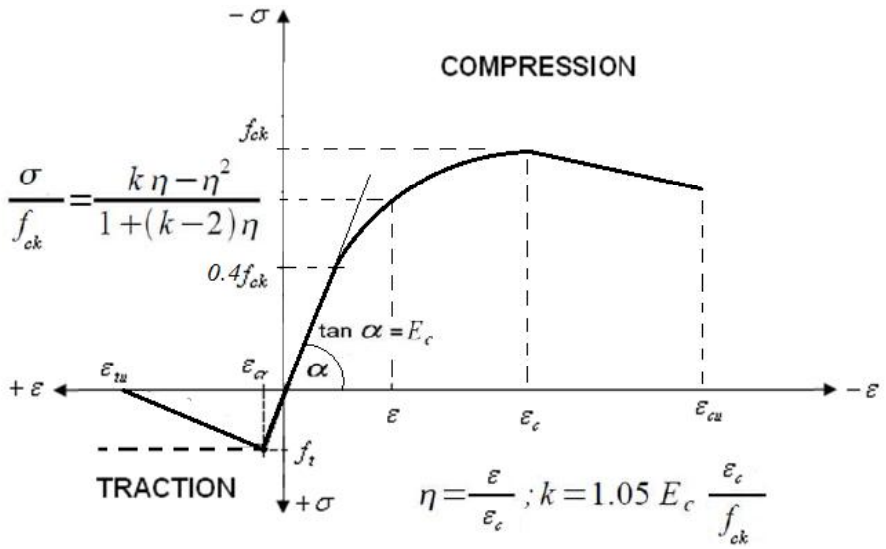


Figure - III - 3 : Diagramme (contrainte – déformation) pour le béton

- Vu le comportement non linéaire du béton, le module d'élasticité E_c doit être interprété comme un module sécant moyen. Selon l'Eurocode 2 **[19]**, E_c peut être établi à l'aide de la relation suivante :

$$E_c = 9{,}5\left(f_{ck} + 8\right)^{1/3} \qquad \text{.....(III. 1)}$$

E_c est exprimé en KN/mm^2 ;

f_{ck} en N/mm^2.

- La déformation correspondante à la résistance maximale f_{ck} est prise égale à ε_c = 0.002, bien que la déformation ultime correspondante à la rupture du béton comprimé est prise égale à ε_{cu} = 0.0035.

III. 3. 3. 2 - Acier de construction et acier d'armature

Le modèle utilisé pour l'acier de construction et l'acier des barres d'armature est un modèle élasto-plastique bilinéaire symétrique en traction et en compression par rapport à l'origine (Fig. III. 4). L'utilisateur doit, donc, introduire comme données les valeurs suivantes :

- le module d'élasticité E et le coefficient de Poisson ν ,
- la limite d'élasticité f_y et la résistance ultime en traction et en compression f_u ,
- la déformation élastique ε_y et la déformation ultime en traction et en compression ε_u .
- L'écrouissage est pris en compte par un module d'élasticité $E_h = \dfrac{\left|f_u - f_y\right|}{\left|\varepsilon_u - \varepsilon_y\right|}$.

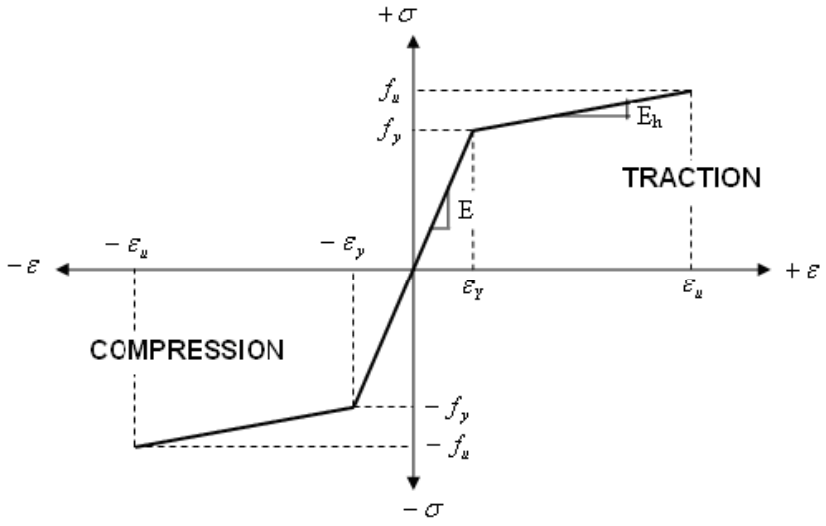


Figure - III - 4 : Diagramme contrainte-déformation pour l'acier

III. 3. 3. 3 - Modélisation du comportement des connecteurs

Les essais de cisaillement « Push-Out » effectués sur des connecteurs de type goujon à tête montrent que leur comportement est généralement non linéaire. Ce comportement peut être modélisé par la loi exponentielle proposée par Ollgaard, Slutter et Fisher **[20]** :

$$P(S) = P_u(1-e^{-\beta|S|})^{\alpha} \quad \text{……...…. (III. 2)}$$

Où $P(S)$: est la force de cisaillement appliqué sur le connecteur ;

S : est la valeur du glissement relatif ;

α et β sont deux coefficients constants ;

P_u : est la résistance ultime au cisaillement du connecteur,

$$P_u = \min\left[0.8 f_u\left(\pi d^2/4\right); 0.29 d^2 \sqrt{f_{ck} E_c}\right] \text{.....(III. 3)}$$

Où f_u : est la résistance ultime en traction de l'acier du goujon ;

d : est le diamètre du goujon ;

f_{ck} : est la résistance du béton à la compression (sur éprouvette cylindrique) ;

E_c : est le module d'élasticité du béton.

III. 3. 4 - Application des charges et critères de rupture

Les charges sont appliquées aux nœuds de la face supérieure de la dalle en béton par manière incrémentale et croissante jusqu'à la rupture du système de la poutre mixte qui se produit par l'une des causes suivantes ou par la combinaison de celles-ci :

- Ecrasement du béton en compression à des déformations ultimes ε_{cu} .
- Plastification de l'acier de construction à des déformations ultimes ε_{au} .
- Fissuration du béton et rupture des barres d'armature par traction à des déformations ultimes ε_{su} .

- Rupture des connecteurs par cisaillement lorsque le glissement maximal dépasse leur capacité de glissement S_u .

III. 4 - validation du modèle proposé

Pour s'assurer de la bonne représentativité du modèle proposé, on présente ici les résultats d'analyse numérique en les comparants à ceux obtenus expérimentalement de la poutre mixte simplement appuyée testée par Abdel Aziz **[18]**.

La (Fig. III. 5) présente la poutre mixte isostatique (P14) testée par Abdel Aziz **[18]**. Sa section transversale est constituée :

- d'une poutre en acier de profilé IPE 400,
- d'une dalle en béton de dimension 800×100, armée par deux nappes d'armature de $5\phi10$ (le taux d'armature est égale a 1%),
- les connecteurs utilisés sont des goujons à tête de 19mm de diamètre et de 80mm de hauteur, 9 paires de goujons régulièrement répartis sont utilisés pour assurer une connexion partielle avec un degré de connexion de 41%.

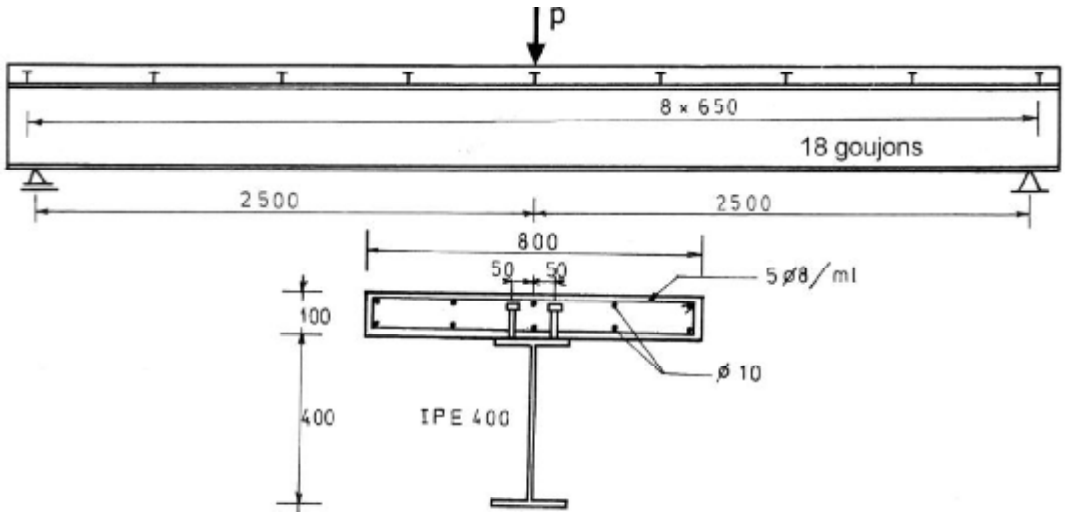


Figure - III - 5 : Poutre mixte simplement appuyée (P14)

● A cause de la symétrie, on ne présente que la moitié de la poutre mixte étudiée, la (Fig. III. 6) présentes les types d'éléments finis utilisés, le maillage et les conditions aux limites.

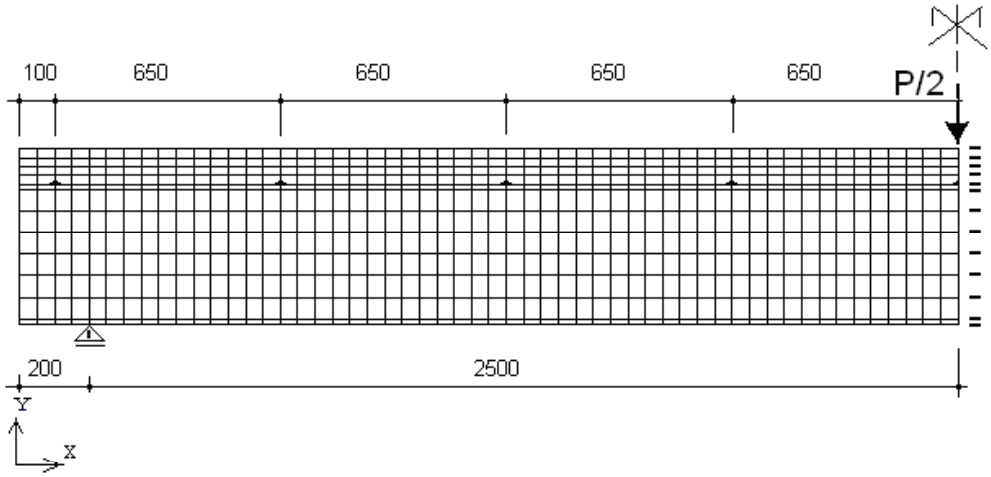


Figure - III - 6 : Maillage et conditions aux limites de la poutre (P14)

Les (figures III. 7 et III. 8) montrent la comparaison entre les résultats numériques et ceux obtenus expérimentalement. La (Fig. III. 7) est relative à la variation de la flèche en fonction du chargement et la (Fig. III. 8) concerne la distribution du glissement à l'interface acier-béton le long de la poutre mixte. A partir de cette comparaison, on remarque une bonne concordance entre les courbes numériques et expérimentales.

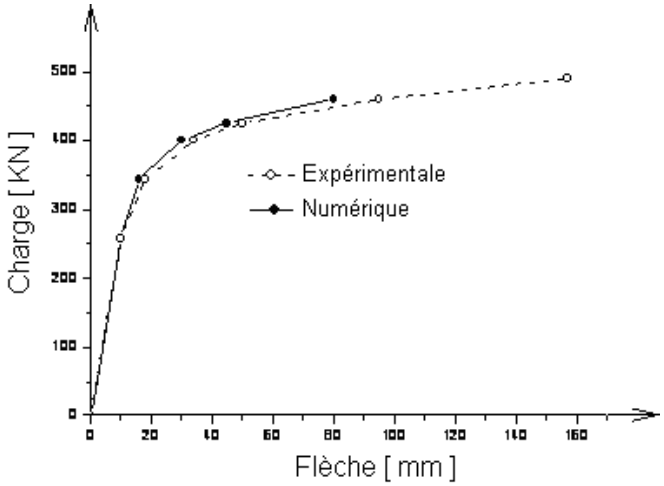


Figure - III - 7 : Courbes charge - flèche pour la poutre mixte (P14)

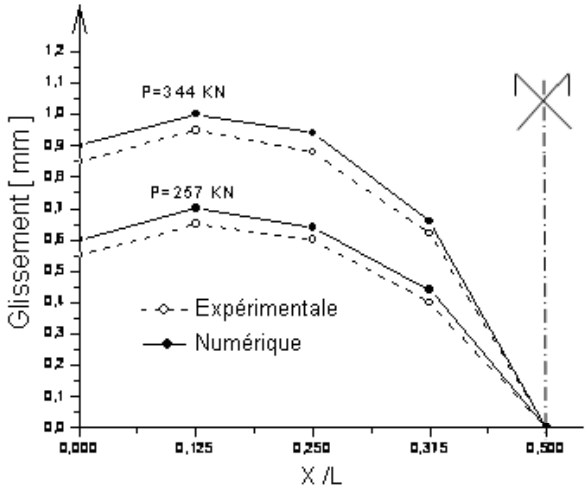


Figure - III - 8 : Distribution du glissement le long de la poutre (P14)

La forme déformée indiquée à la (Fig. III. 9) montre clairement le glissement relatif à l'extrémité de la poutre mixte.

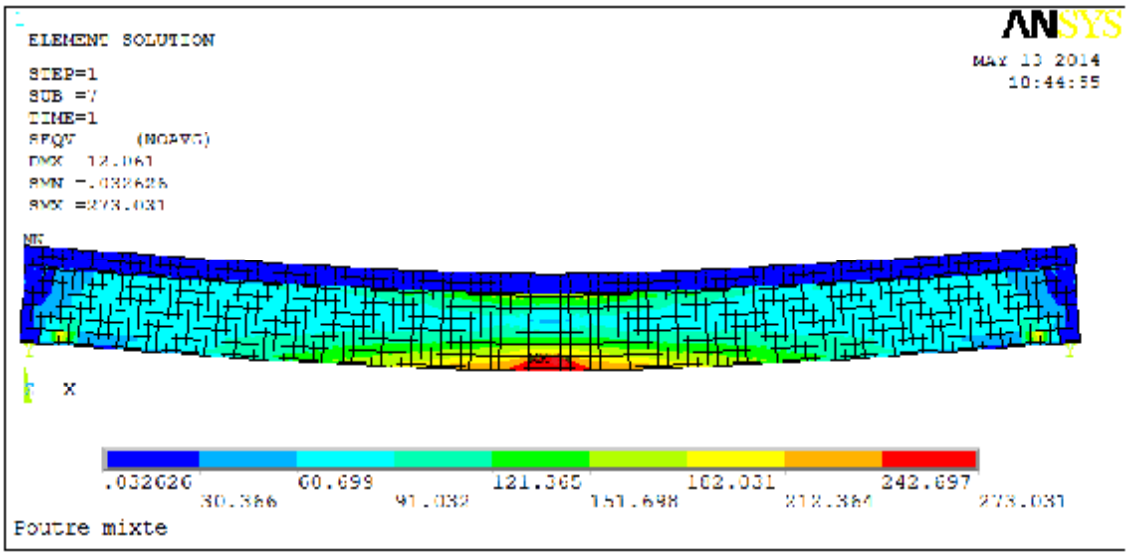


Figure - III - 9 : Forme déformée de la poutre mixte (P14)

III. 5 - CONCLUSION

Un modèle d'éléments finis bidimensionnel en utilisant le code ANSYS a été proposé pour simuler le comportement des poutres mixtes simplement appuyées avec une connexion partielle. La validation du modèle proposé a été faite par comparaison des résultats numériques avec des résultats expérimentaux tirés de la littérature. Les résultats obtenus concernent les flèches, les glissements et la distribution des contraintes et des déformations dans la poutre mixte.

A l'aide de ce modèle, on peut faire une étude paramétrique pour mettre en évidence l'influence des paramètres suivants :

- effets de la résistance du béton.
- effets de la résistance de l'acier de construction.
- effets de la résistance de l'acier d'armature.
- effets de la résistance des connecteurs.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusions

Ce travail de fin d'étude avait pour objectif d'analyser les caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés en construction mixte (acier-béton).

Pour cela, comme point de départ, une large recherche bibliographique a été donnée dans le **premier chapitre** pour étudier les différents éléments structuraux d'une construction mixte (acier-béton) et présenter théoriquement les caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés dans ces éléments mixtes. A partir de cette recherche bibliographique, on peut conclure que :

- Dans une construction mixte, on peut distinguer trois types principaux d'éléments mixtes : les poutres mixtes - les dalles mixtes et les poteaux mixtes.
- La connexion réalisée à l'aide des connecteurs situés à l'interface (acier-béton) peut accroître la rigidité et la résistance de l'élément mixte.
- La particularité principale du béton est de ne pas présenter le même comportement en compression et en traction (faible résistance à la traction) mais on peut rattraper cette inconvénient par l'emplacement des barres d'armature qui possèdent une bonne résistance a la traction.

En suite, une étude expérimentale a été présentée dans le **deuxième chapitre** afin de déterminer les principales caractéristiques des matériaux suivants : béton, acier de construction et acier d'armature en utilisant des essais de compression sur des éprouvettes cylindriques en béton et des essais de traction sur des éprouvettes découpées des profilés métalliques et des barres d'armature. A partir de ces essais on a déterminé :

- la résistance à la compression du béton et ses caractéristiques mécaniques.
- la résistance à la traction des aciers (contrainte élastique et contrainte de rupture)
- les lois de comportement et les courbes (contrainte – déformation)

Comme exemple d'application, nous avons fait dans le **troisième chapitre** l'analyse par éléments finis d'une poutre mixte en introduisant les caractéristiques mécaniques et les lois de comportement de tous les matériaux constituant la structure. A partir de cette étude, on constate que :

- Le comportement non-linéaire des matériaux influe considérablement sur la réponse de la structure ;
- La présence des connecteurs à l'interface de liaison change favorablement le comportement des matériaux de façon à comprimer tout le béton de la dalle et mettre toute la section du profilé métallique en traction.

Perspectives

Comme perspective, nous proposons de poursuivre les recherches dans ce domaine en étudiant les points suivants :

- Influence des caractéristiques des matériaux sur le comportement des poutres mixtes,
- Réalisation des essais expérimentaux sur les bétons de fibre pour remplacer le béton ordinaire des dalles mixtes.

Enfin, d'un point de vue personnel se projet de fin d'études a été l'occasion pour nous de maitriser les manipulations expérimentales, d'exploiter le logiciel ANSYS et d'approfondir nos connaissances dans le domaine des constructions mixtes.

Références bibliographiques

[1] : ARIBERT Jean-Marie. « Constructions mixtes acier-béton » Technique de l'ingénieur, Vol.6, Euroles 2003.

[2] : Rachid-h« étude de la performance des poteaux mixtes acier-béton sous différentes sollicitations». Magister 2008 université mntouri constantine.

[3] : AMIRAOUI Akram (Caractérisation de la connexion acier béton dans les structures mixtes) mémoire de magister.2004

[4] : Delincé D: La construction mixte acier-béton 2e partie : Vérification des états limites de service selon l'Eurocode 4. Les Dossiers du CSTC – Cahier n° 7 – 4e trimestre 2004 – p1-11
www.staalplaatbetonvloeren.be

[5] : Manfred A. Hirt et Rolf Bez. « Construction Métallique – Vol.10 : Notions fondamentales et méthodes de dimensionnement ». E. P. F. L. de Lausanne, 1994.

[6] : Comité Européen de Normalisation (CEN) EUROCODE 2 -« Calcul des structures en béton – Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments », ENV 1992-1-1 (D.A.N.), Norme AFNOR – Déc. 1992.

[7] : Comité Européen de Normalisation (CEN) EUROCODE 3 -« Calcul des structures en acier – Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments », ENV 1994-1-1 (D.A.N.), Norme AFNOR – Fév. 1993.

[8] : Comité Européen de Normalisation (CEN) EUROCODE 4 -« Conception et dimensionnement des structures mixtes acier-béton – Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments », ENV 1993-1-1 (D.A.N.), Norme AFNOR – Sept. 1994.

[9] : Studer M. A.« Modélisation du béton armé et non armé pour le calcul non linéaire des structures planes en poutres par éléments finis », EPFL,Rapport interne 85/2 – 1985 .

[10] : la norme française NF P 18-553 Granulats - Préparation d´un échantillon pour essai

[11] : la norme française NF P 18-598 Octobre 199 Granulats (essai de l'équivalent de sable)

[12] : la norme française (NFX 18-304) (essai de granulométrique par tamisage)

[13] : G. Dreux, "Nouveau guide du beton", Editions Eyrolles, Paris (1981), France.

[14] : F. Gorisse, "Essais et contrôle des bétons", Editions Eyrolles, Paris, (1978), France.

[15] : Norme Européenne EN 12309-3, "Essais pour béton durci-partie 3 : Resistance a la compression des éprouvettes", CEN, février 2003.

[16] : (NF P 18-305) la détermination de la résistance caractéristique d'une éprouvette cylindrique de béton.

[17] : American Society for Testing and Materials (2008). ASTM: E8 -69. Standard Methods of Tension Testing of Metallic Materials, Annual Book of Standards. Washington.

[18] : Abdel Aziz K. -« Modélisation et étude expérimentale des poutres mixtes acier-béton à connexion partielle ou espacée ». Thèse de doctorat N°. D. 86-3-INSA de Rennes, octobre 1986.

[19] : Comité Européen de Normalisation (CEN) - Eurocode 2 -« Calcul des Structures en béton.

Partie 1-1 : Règles Générales et Règles pour les bâtiments » , ENV 2005.

[20] : Ollgaard J.G., Slutter R.G. et Fisher J.W. -« Shear strength of stud connectors in lightweight and normal weight concrete ». AISC Engineering Journal 1971;(8), PP.55-64.

[21] : Swanson Analysis Systems, ANSYS. Online manual, version 12. and Theory Reference.

Annexe -A-

A. 1 - Prélèvement en laboratoire (échantillonnage en laboratoire) NF P 18-553 [10]

Le passage de l'échantillon total sur le tas à l'échantillon réduit nécessaire à l'essai, peut se faire par quartage (Fig. A. 1) ou à l'aide d'un échantillonneur. L'échantillon doit être séché à l'étuve à105 C°.

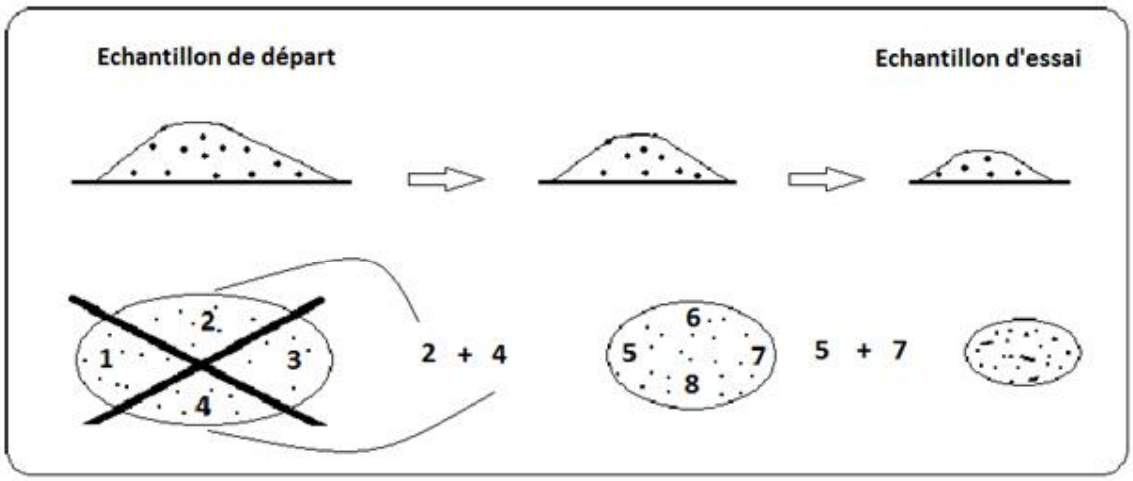


Figure - A - 1 : Opération de quartage.

A. 2 - L'essai de L'équivalent de sable (NF P 18-598) [11]

La mesure de l'équivalent de sable a l'avantage d'être réalisable sur le chantier et a pour but d'apprécier la qualité d'un sol sablonneux en évaluant la proportion relative des poussières fines ou des éléments argileux dans ce sol par rapport aux éléments sableux (Tableau. A .1).

Tableau - A -1 : évaluation de sable

ES à vue	ES au piston	Nature et qualité du sable
ES< 65%	ES<60%	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement. Sable à rejeter pour des bétons de qualité.
65%≤ES<75%	60%≤ES<70%	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour les bétons de qualité courante quand le retrait n'a pas de conséquence notable sur la qualité du béton.
75%≤ES<85%	70%≤ES<80%	Sable propre à faible proportion de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
ES≥85%	ES≥80%	Sable très propre. L'absence presque totale de fines argileuses

- L'essai se fait sur un sable, laver l'échantillon et laisser reposée après un temps proscrie et mesurer :

- h2 : la hauteur de sable propre+élément fin
- h1 : la hauteur de sable propre

Fin de l'essai :

En distingue dans l'échantillon à trois couches différentes de hauteur.

En bas crus, le sable propre de hauteur h1.

En dessus h1 on trouve les éléments fins « floculats » de hauteur (h2-h1) et en haut de l'échantillon en trouve l'eau (Fig. A. 2).

$$ES = \frac{H_1}{H_2} \times 100 \quad \text{…….. (A. 1)}$$

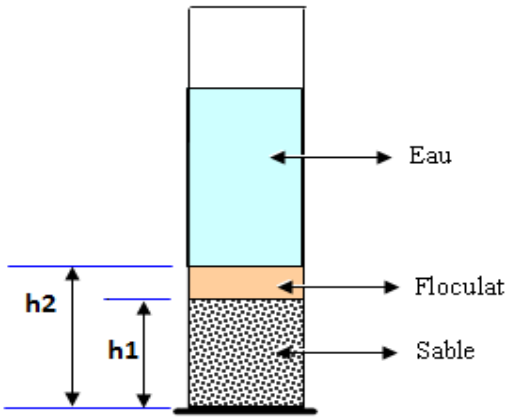


Figure - A -2 : l'essai de L'équivalent de sable

- Esv : H1=91 mm , H2=129 mm , Esv =91/129 x 100 → Esv= 70.5 %
- Esp H1=88.5 mm , H2=129 mm , Esp =88.5/129 x 100 → Esp =68.6 %

On a : Esv = 70.5% et Esp = 68.6 % → Sable légèrement argileux de propreté admissible pour les bétons de qualité courante quand le retrait n'a pas de conséquence notable sur la qualité du béton.

A. 3 - La masse volumique Absolue

Le volume absolu d'un corps est généralement (Tableau. A. 2 et 3 et 4) déterminé en mesurant le volume d'un liquide (en générale de l'eau) que déplace l'introduction de ce corps.

-mettre dans une éprouvette graduée un volume (V1) d'eau.

-peser une masse (m) du matériau.et l'introduire dans l'éprouvette (matériau sec)

-Bien éliminer les bulles d'air. $\rho_{abs} = \frac{M}{V}$ .....(A. 2)

-Lire le nouveau volume (v2)

Tableau - A - 2 : La masse volumique Absolue de sable

N.de l'essai	1	2	3
Volume V1 (cm³)	200	200	200
Masse du Sable(g)	300	300	300
Volume V2 (cm³)	315	315	320
Volume absolu V (cm³)	115	115	120
Masse volumique absolue (g/cm³)	2.6	2.6	2.5
Moyenne (g/cm³)	2.56		

Tableau - A - 3 : La masse volumique Absolue de gravier 8/15

N.de l'essai	1	2	3
Volume V1 (cm³)	200	200	200
Masse du Sable(g)	300	300	300
Volume V2 (cm³)	320	321	320
Volume absolu V (cm³)	120	121	120
Masse volumique absolue (g/cm³)	2.5	2.48	2.5
Moyenne (g/cm³)	2.49		

Tableau - A - 4 : La masse volumique Absolue de gravier 15/25

N.de l'essai	1	2	3
Volume V1 (cm³)	300	300	300
Masse du Sable(g)	300	300	300
Volume V2 (cm³)	420	420	418
Volume absolu V (cm³)	120	120	118
Masse volumique absolue (g/cm³)	2.5	2.5	2.54
Moyenne (g/cm³)	2.51		

A. 4 - Analyse granulométrique (NFX 18-304) [12]

La composition du béton a pour but déterminer les proportions des divers constitutions (ciment, eau, sable, graviers) en produisant un béton dont l'ouvrabilité est compatible avec les moyens de mise en œuvre et qui possédera, après durcissement les meilleurs caractéristiques (bonne étanchéité, bonne résistance mécanique, faible retrait, bonne durabilité …) pour définir ces proportions on doit passer tout d'bord à l'essai de l'analyse granulométrique puis choisir une méthode de composition de béton parmi celles proposées par des spécialistes tels que Bolomey, Faury, Vallette, Dreux-Gorisse ….etc

L'analyse granulométrique sert à déterminer la distribution en poids des particules d'un matériau suivant leurs dimensions.

- **Principe de l'essai**

L'essai consiste à fractionner, au moyen d'une série de tamis, un matériau en plusieurs catégories de grains décroissantes.

- **équipements utilisés**

Pour réalisé cette opération, nous avons utilisé les équipements suivants :

- Une série de tamis dont les diamètres varient comme suit
  5-2.5-1.25-0.63-0.315-0.160-0.125-0.08 (mm) et un fond.

  Ce sont des tamis de contrôle dont l'ouverture sera conforme à la norme

- Un échantillon pour chaque matériau.
  La masse testée répond à la condition suivante
  200 D < M <600 D . D : la taille maximale des granulats.
- Une balance de précision, de force 5 kg
- Une étuve thermo statée.
- Un vibro-tamis électrique.

- **Description de l'essai**

Les granulats utilisés pour préparer le béton leur diamètre est de 0/5, 8/15 et 15/25 (mm)

Une fois ces matériaux lavés, ils seront ensuite séchés pendant 72 heurs à l'étuve à une température maximale de 105 C°, on emboite les tamis les uns sur les autres dans un ordre décroissant du front de la colonne vers le bas. En partie inférieure on dispose d'un fond étanche qui permettra de récupérer les fillers, un couvercle sera disposé en haut de la colonne a fin

d'interdire tout perte de matériau pendant le tamisage (Fig. A. 3). On appellera tamisât le poids de matériau passant à travers un tamis donné et refus le poids de matériau retenu par ce même tamis.

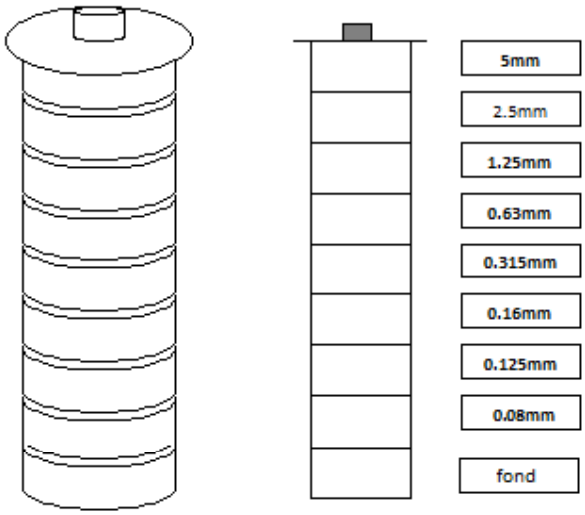


Figure - A - 3 : série de tamis utilisé (analyse granulométrique)

Le matériau étudié est versé en haut de la colonne de tamis et celle-ci est vibrée à l'aide de la tamiseuse électrique, on considère que le tamisage est terminé lorsque le refus ne varie pas.

Le refus du tamis ayant la plus grande maille est pesé. Soit R_1 la masse de ce refus. Le refus du tamis immédiatement inférieur est pesé avec le refus précédent. Soit R_2 la masse des deux refus. Cette opération est poursuivie pour tous les tamis pris dans l'ordre des ouvertures décroissantes. Ceci permet de connaitre la masse des refus cumulé R_n, aux différents nivaux de la colonne de tamis. Le tamisât présent sur le fond de la colonne de tamis est également pesé.

A. 5 - Composition de béton (formulation) par la méthode de Dreux-Gorisse [13,14]

La méthode de formulation de Dreux-Gorisse permet de déterminer les quantités optimales de matériaux (eau E, ciment C, sable S et gravier G) nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton conformément au cahier des charges **(Critère de maniabilité et Critère de résistance).** Plusieurs étapes de calcul successives sont nécessaires à l'obtention de la formulation théorique de béton :

- Détermination du rapport C/E
- Détermination de C et E
- Détermination du mélange optimal à minimum de vides
- Détermination de la compacité du béton
- Détermination des masses de granulats

A. 5. 1 - Formulation du béton 1

Critère de résistance : Béton de fc28 = 20 MPa

Critère de maniabilité : Béton de consistance plastique, L'ouvrabilité désirée est caractérisée par un affaissement au cône A_f = 7 cm et La vibration sera considérée normale.

La résistance visée : $f`_C$ =1.15 $f_{c\,28}$ =1.15 (20) = 23 MPa

Le rapport C / E :

Le rapport C / E est calculé grâce à la formule de Bolomey :

$$f`_{C28} = G\, F_{cE}\, (C / E - 0.5)$$ …….(A. 3)

Avec :

$f`_{C28}$ = Résistance moyenne visée en compression du béton à 28 jours en MPa

F_{CE} = Classe vraie du ciment à 28 jours en MPa

C = Dosage en ciment en kg par m^3 de béton

E = Dosage en eau total sur matériau sec en litre par m^3 de béton

G = Coefficient granulaire (Tab- A.5) en fonction de la qualité et de la dimension maximale des granulats.

C / E = ($f`c$ / G F_{cE}) +0.5

On a : F_{cE} = 42.5 MPa et G = 0.5 voir le (Tableau. A. 5)

→ **C / E** = (23/(0.5×42.5) +0.5 = 1.58

Tableau - A - 5 : Coefficient granulaire G' en fonction de la qualité et de la taille maximale des granulats D max.

Qualité des granulats	Dimension Dmax des granulats		
	Fins Dmax ≤ 16 mm	Moyens 25 ≤ Dmax ≤ 40 mm	Gros Dmax ≥ 63 mm
Excellente	0.55	0.6	0.65
Bonne, courante	0.45	0.5	0.55
Passable	0.35	0.4	0.45

Détermination de C :

La valeur de C est déterminée grâce à l'abaque de la (Fig. A. 4) en fonction des valeurs de C/E et de l'affaissement au cône d'abrams.

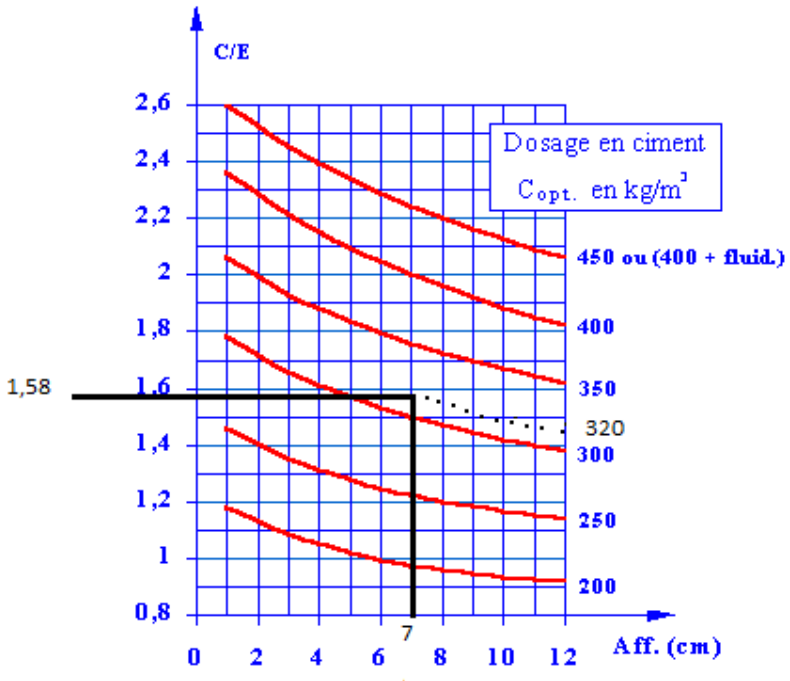


Figure - A - 4 : dosage en ciment de béton 1

Dosage en ciment par m^3 de béton : C =320 Kg

Dosage en eau E :

On a C / E=1.58 et C = 320 Kg/m³ →E =202.5 Kg/m³

Corrections sur le dosage en ciment C et le dosage en eau E :

Lorsque la dimension maximale des granulats Dmax est différente de 25 mm, une correction sur la quantité de pâte est nécessaire à l'obtention de la maniabilité souhaitée.

Les corrections sont à apporter sur les quantités d'eau et de ciment (le rapport C/E reste inchangé). (Tableau. A. 6)

Tableau - A - 6 : Correction sur le dosage de pâte en fonction de D_{max}.

Dimension maximale des granulats (D_{max} en mm)	5	10	16	25	40	63	100
Correction sur le dosage en eau (en %)	15	9	4	0	-4	-8	-12

On a : D_{MAX} = 25mm → La correction égal 0

Détermination du mélange optimal à minimum de vides :

Il s'agit de déterminer les pourcentages de sable, de gravillons et de cailloux qui vont permettre la réalisation d'un squelette granulaire à minimum de vides. Les quantités des matériaux de chaque classe granulaire doivent être judicieuses pour que les plus petits éléments viennent combler les vides laissés par les plus gros. La courbe granulométrique théorique d'un matériau à minimum de vides peut être schématisée par une droite brisée. La démarche proposée par Dreux pour déterminer le mélange optimum à minimum de vides est la suivante :

- Tracé de la droite brisée de référence
- Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériaux

Tracé de la droite de référence de Dreux :

La droite de référence de Dreux représente la courbe idéale d'un matériau à minimum de vides. C'est une droite brisée dont le point de brisure est défini par son abscisse X et son ordonnée Y :

Tracé de la courbe de référence : (Fig. A. 5)

Origine O (tamis 0.08 ; 0%) et Extrémité B (tamis D_{max} ; 100%)

Le point A

- **En abscisse :**

  Si $D_{max} \leq 20$ mm $X = D_{max} / 2$

  Si $D_{max} > 20$ mm Module (X) = (Module (D_{max}) + 38) / 2

On a : D_{max}= 25 mm → X_A entre le module 41 et 42 (les tamis 10 et 12.5)

- **En ordonnée :**

$$Y_A = 50 - (D_{max})^{0.5} + K + Ks + K\,p \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (A.\,4)$$

Y_A est donné en pourcentage de passants cumulés

K est un coefficient donné par le (Tableau. A. 7), Ks et Kp étant des coefficients correctifs définis par :

Ks (correction supplémentaire fonction de la granularité du sable) :

Ks = (6 Mfs– 15) avec Mfs le module de finesse du sable.

SI : Mfs < 2 → Ks = 0

On a : M.F = 1.96 < 2 → Ks = 0

Kp (correction supplémentaire si le béton est pompable) :

Kp = +5 à +10 selon le degré de plasticité désiré.

Kp = 0 si le béton est non pompable.

On a : le béton est non pompable → Kp = 0

Tableau - A - 7 : K, fonction de la forme des granulats, du mode de vibration et du dosage en ciment

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
Forme des granulats (du sable en particulier		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en Ciment	400 + Fluid	-2	0	-4	-2	-6	-4
	400	0	2	-2	0	-4	-2
	350	2	4	0	2	-2	0
	300	4	6	2	4	0	2
	250	6	8	4	6	2	4
	200	8	10	6	8	4	6

Donc : K = 2 → Y_A = 47 %

Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériaux :

Pour déterminer les pourcentages en volumes absolus de granulats permettant la confection d'un mélange à minimum de vide il est nécessaire de tracer comme indiqué sur la (Fig. A. 5) des droites reliant deux à deux les courbes granulométriques des matériaux du mélange.

Ces droites sont définies par 5 % de refus pour le matériau à faible granularité et par 5 % de passant pour le matériau à forte granularité. L'intersection des droites ainsi tracées avec la droite brisée de Dreux permet, par prolongement sur l'axe des ordonnées, de déterminer les pourcentages en volumes absolus de chaque matériau. Ces pourcentages doivent permettre
L'obtention d'un mélange dont la courbe granulométrique est proche de la droite brisée de Dreux. Si la courbe du mélange obtenue est trop éloignée de la courbe de Dreux, un ajustement de ces pourcentages peut s'avérer nécessaire.

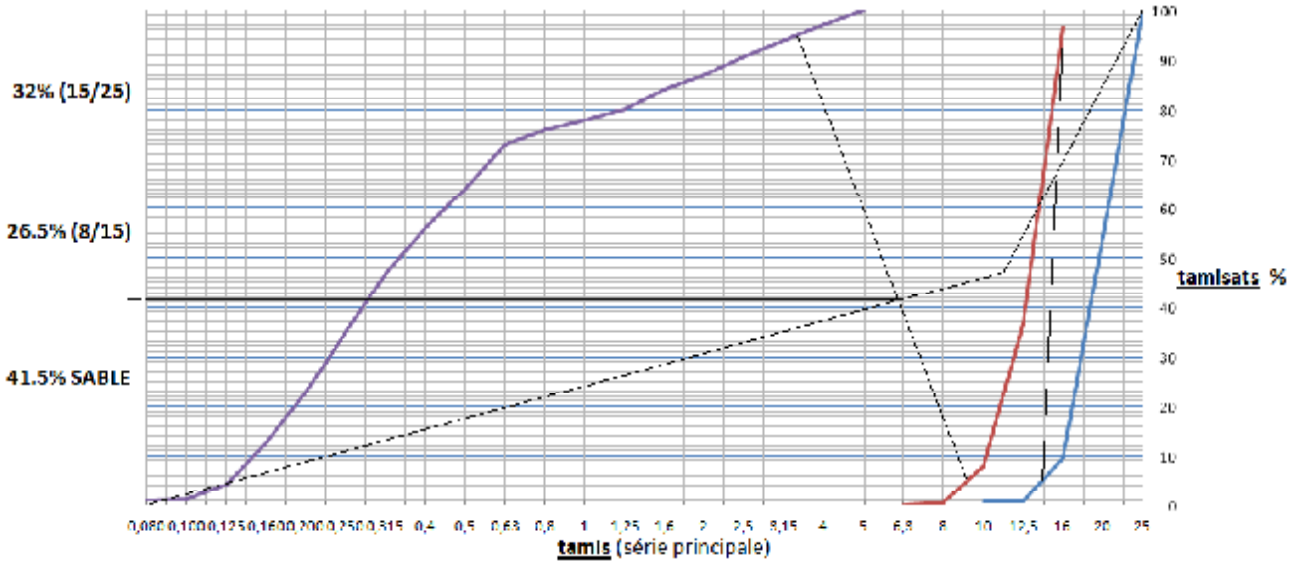


Figure - A - 5 : la courbe de référence de béton 1

Sable (0/5) = 41.5 %

Gravier (8/15)= 26.5 %

Gravier (15/25)= 32 %

Détermination de la compacité du béton

Pour déterminer les masses de granulats entrant dans la composition de béton, il est nécessaire de déterminer la compacité du béton qui correspond au volume absolu en m3 de solide contenu dans un mètre cube de béton (volumes absolus de ciment, de sable et de gravier). Sa valeur de base γ est fonction de la taille des granulats, de la consistance du mélange et des moyens de vibration mis en œuvre (Tableau. A. 8).

La valeur de la compacité c du béton permet de déterminer le volume total absolu V de granulats intervenant dans la formulation du béton : V = (c – Vc) où Vc est le volume de ciment défini par Vc = C / rs(c) où rs(c) est la masse volumique absolue du ciment utilisé.

Tableau - A - 8 : Compacité du béton en fonction de D_{max}, de la consistance et du serrage.

Consistance	Serrage	compacité γ						
		D*max* =5	D*max* = 10	D*max* =12,5	D*max* =20	D*max* = 31,5	D*max* = 50	D*max* = 80
Molle	Piquage	0.75	0.78	0.795	0.805	0.81	0.815	0.82
	Vibration faible	0.755	0.785	0.8	0.81	0.815	0.82	0.825
	Vibration normale	0.760	0.79	0.805	0.815	0.82	0.825	0.83
Plastique	Piquage	0.73	0.79	0.805	0.815	0.82	0.825	0.83
	Vibration faible	0.765	0.795	0.81	0.82	0.825	0.83	0.835
	Vibration normale	0.77	0.8	0.815	0.825	0.83	0.835	0.84
	Vibration puissante	0.775	0.805	0.82	0.83	0.835	0.84	0.845
Ferme	Vibration faible	0.775	0.805	0.82	0.83	0.835	0.84	0.845
	Vibration normale	0.78	0.81	0.825	0.835	0.84	0.845	0.85
	Vibration puissante	0.785	0.815	0.83	0.84	0.845	0.85	0.855

Nota :

* Ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés sinon il conviendra d'apporter les corrections suivantes :

Sable roulé et gravier concassé (c1 = - 0,01)

Sable et gravier concassé (c1 = - 0,03)

Coefficient de compacité $\gamma = 0.83$

ON a : Sable roulé et gravier concassé (c1 = - 0,01)

$\rightarrow \gamma = 0.83 - 0.01 = 0.82$

Le volume absolu totale : $V = 1000\,\gamma \rightarrow V = 1000 \times 0.82 = 820$ L

Le Volume absolu des grains de ciment : V_c=C/3.1 → V_c=320/3.1 = 103.2 L

Le Volume absolu de l'ensemble des granulats : V_g= 820 - 103.2 = 716.8 L

Les quantités par m^3 = V_g × % × Densité

Sable (0/5) = 716.8 × 0.415 × 2.56 = 761.52 Kg

Gravies (8/15) = 716.8 × 0.265 × 2.49 = 473 Kg

Gravies (15/25) = 716.8 × 0.32×2.51 = 575.7 Kg

Les quantités des divers matériaux (+ 20% de pertes) pour la fabrication de

5 éprouvettes cylindriques 16 × 32 Cm^2 :

$V_{ép} = \pi r^2 h = 3.14 \times (0.08)^2 \times 0.32 = 0.00643$ m³

5 éprouvettes → 5×0.00643 = 0.03215 m³

ON a : 20% de pertes → 1.2 (0.03215) = 0.03858 m³

Le Sable 1 m³→ 761.52 Kg

0.03858 m³→ x → Le Sable =29.37 Kg

Le Gravies (8/15)= 18.25 Kg

Le Gravies (15/25)= 22.2 Kg

Le Ciment =12.35Kg

Eau = 7.8 Kg

A. 5. 2 - Formulation du béton 2

Critère de résistance : Béton de fc28 = 25 MPa

Critère de maniabilité : Béton de consistance plastique, L'ouvrabilité désirée est caractérisée par un affaissement au cône A_f = 7 cm et La vibration sera considérée normale.

La résistance visée : $f`_C$ =1.15 $f_{c\,28}$ =1.15 (25) = 28.75 MPa

Le rapport C / E : C / E = ($f`$c / G F_{cE}) +0.5

On a : F_{cE} = 42.5 MPa et G = 0.5 voir le (Tableau. A. 5)

→ **C / E** = (28.75/(0.5×42.5) +0.5 = 1.85

Dosage en ciment par m³ de béton : C =375 Kg voir (Fig. A. 6).

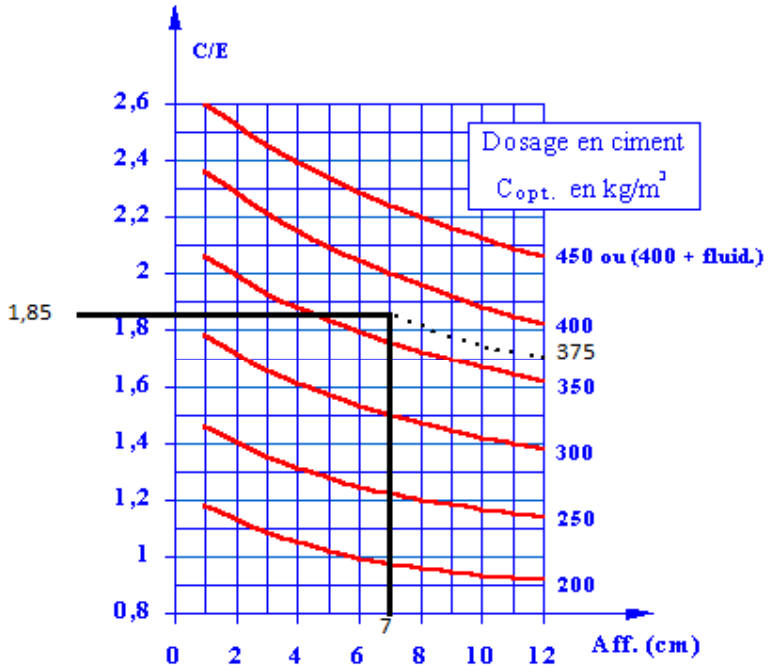


Figure - A - 6 : dosage en ciment de béton 2

Dosage en eau E :

On a C / E=1.85 et C = 375 Kg/m³ →E =202.7 Kg/m³

Corrections sur le dosage en eau E et le dosage en ciment C :

La correction égal 0 voir le (Tableau. A. 6)

Tracé de la courbe de référence : (Fig. A. 7)

Origine O (tamis 0.08 ; 0%) et Extrémité B (tamis D_{max} ; 100%)

Le point A

En abscisse :

ON a : D_{max}= 25 mm → X_A entre le module 41 et 42 (les tamis 10 et 12.5)

En ordonnée :

$Y_A = 50 - (D_{max})^{0.5} + K + Ks + Kp$

K = 0 voir le (Tableau. A. 7)

On a M.F = 1.96 < 2 → Ks = 0

Kp = 0 (le béton est non pompable)

Donc : Y_A = 45 %

Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériaux :

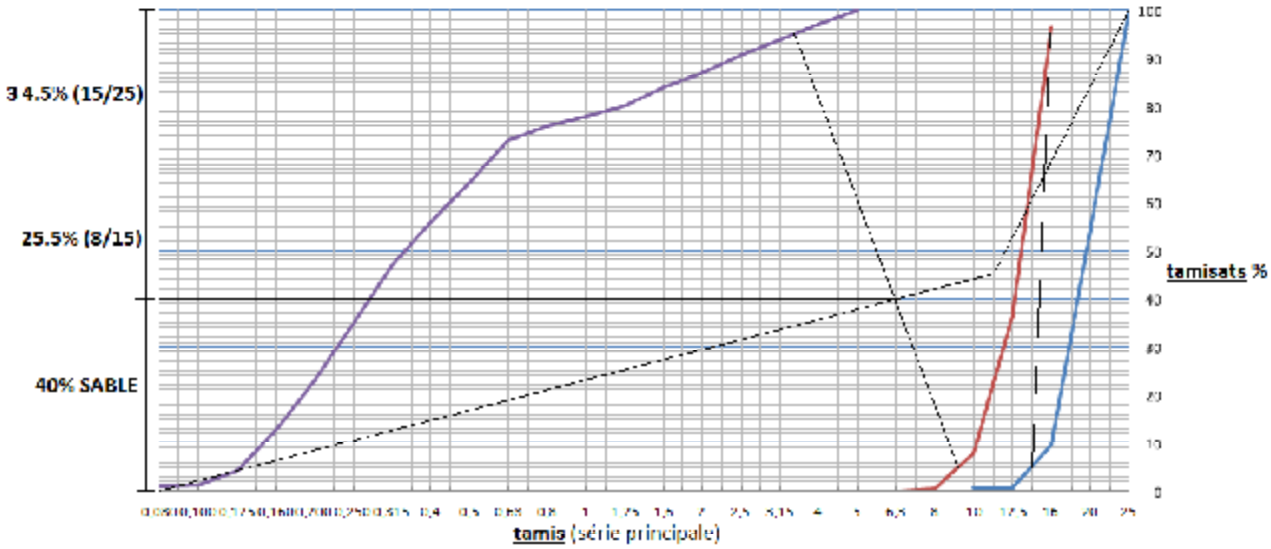


Figure - A - 7 : la courbe de référence de béton 2

Sable (0/5) = 40 %

Gravier (8/15)= 25.5 %

Gravier (15/25)= 34.5 %

Détermination de la compacité du béton :

Coefficient de compacité γ = 0.83

ON a : Sable roulé et gravier concassé (c1 = - 0,01) voir le (Tableau. A. 8)

$\rightarrow \gamma = 0.83 - 0.01 = 0.82$

Le volume absolu totale : $V = 1000\ \gamma \rightarrow V = 1000 \times 0.82 = 820$ L

Le Volume absolu des grains de ciment : $V_c = C/3.1 \rightarrow V_c = 375/3.1 = 120.96$ L

Le Volume absolu de l'ensemble des granulats : $V_g = 820 - 120.96 = 699.04$ L

Les quantités par m^3 $= V_g \times \% \times$ Densité

Sable (0/5) = $699.04 \times 0.4 \times 2.56 = 715.8$ Kg

Gravies (8/15) = $699.04 \times 0.255 \times 2.49 = 443.85$ Kg

Gravies (15/25) = $699.04 \times 0.345 \times 2.51 = 6O5.3$ Kg

Les quantités des divers matériaux (+ 20% de pertes) pour la fabrication de

5 éprouvettes cylindriques 16 × 32 Cm^2 :

Le Sable $1\ m^3 \rightarrow 715.8$ Kg

$0.03858\ m^3 \rightarrow x$ $\rightarrow$ Le Sable =27.6 Kg

Le Gravies (8/15)= 17.12 Kg

Le Gravies (15/25)= 23.35 Kg

Le Ciment =14.46 Kg

Eau = 7.82 Kg

A. 5. 3 - Formulation du béton 3

Critère de résistance : Béton de $f c28 = 30$ MPa

Critère de maniabilité : Béton de consistance plastique, L'ouvrabilité désirée est caractérisée par un affaissement au cône $A_f = 7$ cm et La vibration sera considérée normale.

La résistance visée : $f`_C = 1.15\ f_{c\,28} = 1.15\ (20) = 34.5$ MPa

Le rapport C / E : C / E $= (f`c / G\ F_{cE}) + 0.5$

On a : $F_{cE} = 42.5$ MPa et $G = 0.5$ voir le (Tableau. A. 5)

→ **C / E** = (34.5/(0.5×42.5) +0.5 = 2.12

Dosage en ciment par m³ de béton : C =420 Kg voir (Fig. A. 8).

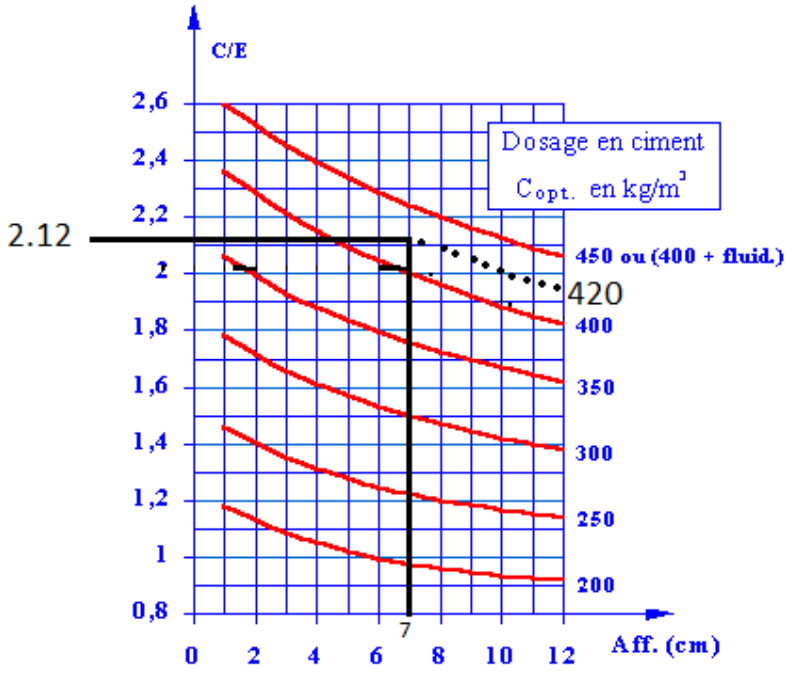


Figure - A - 8 : dosage en ciment de béton 3

Dosage en eau E :

On a C / E=2.12 et C = 420 Kg/m³ →E =198.1 Kg/m³

Corrections sur le dosage en eau E et le dosage en ciment C :

La correction égal 0 voir le (Tableau. A. 6)

Tracé de la courbe de référence : (Fig. A. 9)

Origine O (tamis 0.08 ; 0%) et Extrémité B (tamis D_{max} ; 100%)

Le point A

En abscisse :

ON a : D_{max}= 25 mm → X_A entre le module 41 et 42 (les tamis 10 et 12.5)

En ordonnée :

$Y_A = 50 - (D_{max})^{0.5} + K + Ks + Kp$

K = -2 voir le (Tableau. A. 7)

On a M.F = 1.96 < 2 → Ks = 0

Kp = 0 (le béton est non pompable)

Donc : $Y_A = 43$ %

Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériaux :

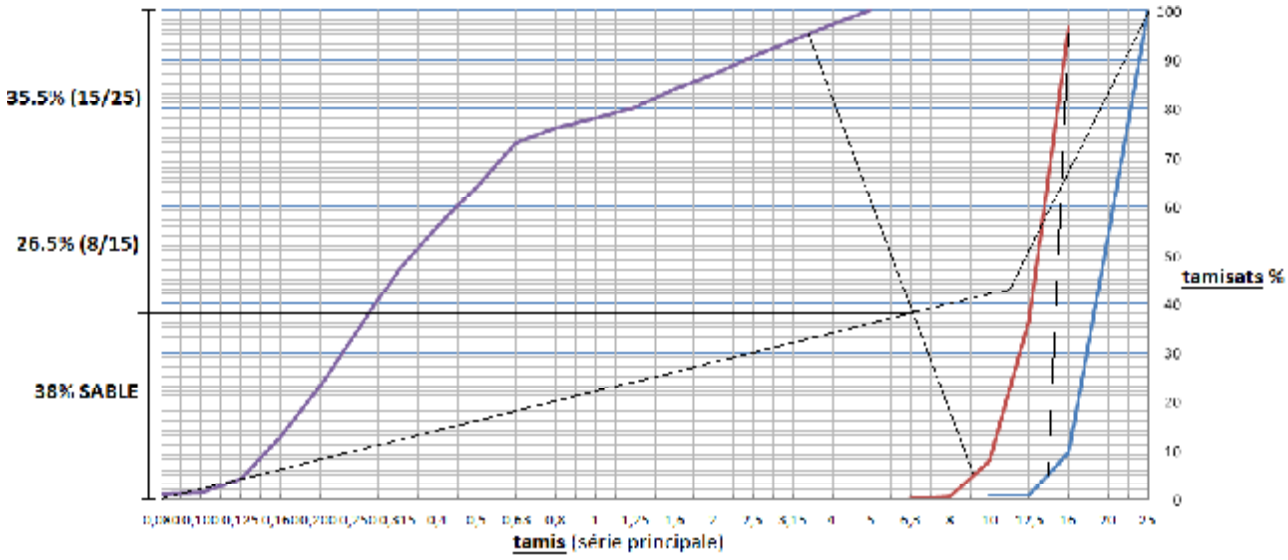


Figure - A - 9 : la courbe de référence de béton 3

Sable (0/5) = 38 %

Gravier (8/15)= 26.5 %

Gravier (15/25)= 35.5 %

Détermination de la compacité du béton :

Coefficient de compacité $\gamma = 0.83$

ON a : Sable roulé et gravier concassé (c1 = - 0,01) voir le (Tableau. A. 8)

→ $\gamma = 0.83 - 0.01 = 0.82$

Le volume absolu totale : $V = 1000\ \gamma \rightarrow V = 1000 \times 0.82 = 820$ L

Le Volume absolu des grains de ciment : $V_c = C/3.1 \rightarrow V_c = 420/3.1 = 135.48$ L

Le Volume absolu de l'ensemble des granulats : $V_g = 820 - 135.48 = 684.52$ L

Les quantités par m^3 $= V_g \times \% \times$ Densité

Sable (0/5) = 684.52 × 0.38 × 2.56 = 665.9 Kg

Gravies (8/15) = 684.52 × 0.265 × 2.49 = 451.7 Kg

Gravies (15/25) = 684.52 × 0.355 ×2.51 = 609.9 Kg

Les quantités des divers matériaux (+ 20% de pertes) pour la fabrication de 5 éprouvettes cylindriques 16 × 32 Cm^2 :

Le Sable 1 $m^3 \rightarrow$ 665.9 Kg

0.03858 $m^3 \rightarrow$ x $\rightarrow$ Le Sable =25.7 Kg

Le Gravies (8/15)= 17.42 Kg

Le Gravies (15/25)= 23.53 Kg

Le Ciment =16.2 Kg

Eau = 7.64 Kg

تم بحمد الله