



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Republique Algerienne Democratique Et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة العربي التبسي - تبسة

Université Larbi Tébessi – Tébessa –

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Civil

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de Master Académique**

En : Génie Civil

Spécialité : Structures

Par : Benmehania Hellal

Sujet

ETUDE DU PHENOMENE D'ADHERENCE ACIER-BETON DANS LES STRUCTURES SOUMISES A LA TRACTION MONOTONE

Présenté et soutenu publiquement, le 12 /06 /2022, devant le jury composé de :

Mr.Boudjlel Abdel Wahab

MCA

Président

Mr.Ayeb Belkhir

MAA

Encadreur

Mr.Salhi Mohamed Amine

MAA

Examineur

Promotion : 2021/2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma gratitude.

Je voudrais tout d'abord adresser toute ma reconnaissance à la directrice de ce mémoire, M. Ayele B, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Je désire aussi remercier les professeurs de l'université de Larbi Tebessi de Tébessa, qui m'ont fourni les outils nécessaires à la réussite de mes études universitaires.

Dédicaces

*A mon cher père, A ma chère mère, A mes grands-parents A mes frères,
Ma femme future, A mes amis*

Table des matières

Table des matieres.....	I
Liste des figures.....	V
Liste des tableaux	V
Notations	VI
Introduction generale.....	VII

Chapitre I

Recherche bibliographique

I.1) Introduction	2
I.1.1) Définition.....	2
I.1.2) Le Rôle De L'adhérence	3
I.1.3) Nature de l'adhérence	3
I.1.4) La force d'adhérence	3
I.1.5) Facteurs influant sur l'adhérence	3
I.1.6) Comportement du béton et de l'acier	4
I.1.7) Adhérence dans le BAEL 91	5
I.1.8) Adhérence dans l'EUROCODE 2	14
I.1.8.1) Longueur d'ancrage conventionnelle de référence	14
I.1.8.2) Longueur d'ancrage de calcul	14
I.1.8.3) Longueur d'ancrage minimale	15
I.1.8.4) Ancrages courbes.....	15
I.1.8.5) Ancrages des armatures d'effort tranchant	

Chapitre II

Calcul Analytique

II.1) Calcul des efforts de traction (dosage 250 kg/m ³)	17
II.1.1) Age 1 : 7 jours	17
II.1.1.1) Calcul de la contrainte d'adhérence τ_s	17
II.1.1.2) calcul de L'effort de traction	18
1) ancrages rectilignes (BAEL 91 ver 99)	18
2) Ancrage par courbure des barres tendues	18
II.1.2) Age 2 : 14 jours	21
II.1.2.1) Calcul de la contrainte d'adhérence τ_s	21
II.1.2.2) calcul de L'effort de traction	22
1) ancrages rectilignes (BAEL 91 ver 99)	22
2) Ancrage par courbure des barres tendues	22
II.1.3) Age 3 : 28 jours.....	24
II.1.3.1) Calcul de la contrainte d'adhérence τ_s	24
II.1.3.2) calcul de L'effort de traction	24
1) ancrages rectilignes (BAEL 91 ver 99)	24

2) Ancrage par courbure des barres tendues.....	25
II.2) Calcul des efforts de traction (dosage 350 kg/m ³)	27
II.2.1) Age 1 : 7 jours.....	27
II.2.1.1) Calcul de la contrainte d'adhérence τ_s	27
II.2.1.2) calcul de L'effort de traction	27
1) ancrages rectilignes (BAEL 91 ver 99)	27
2) Ancrage par courbure des barres tendues.....	28
II.2.2) Age 2 : 14 jours.....	30
II.2.2.1) Calcul de la contrainte d'adhérence τ_s	30
II.2.2.2) calcul de L'effort de traction.....	30
1) ancrages rectilignes (BAEL 91 ver 99)	30
2) Ancrage par courbure des barres tendues.....	31
II.2.3) Age 3 : 28 jours.....	33
II.2.3.1) Calcul de la contrainte d'adhérence τ_s	33
II.2.3.2) calcul de L'effort de traction.....	33
1) ancrages rectilignes (BAEL 91 ver 99)	33
2) Ancrage par courbure des barres tendues.....	33

Chapitre III

Etude expérimentale

III.1) Objectif de l'essai	38
III.2) Protocole de l'essai	38
III.2.1) Préparation des moules	38
III.2.3) Préparation des barres d'acier.....	39
III.2.4) Échantillonnage	39
III.2.5) Béton	40
III.2.5.1) Formulation du béton.....	40
III.2.5.2) Coulage de béton.....	41
III.3) Essai expérimental	41
III.3.1) La machine de l'essai.....	41
III.3.1.1) Caractéristiques de la machine de traction	41
III.3.1.2) Dispositif d'adaptation	43
III.4) Résultats	44
III.4.1) Sous forme de tableaux.....	44
III.4.2) Sous forme de Courbes	47-59

Chapitre IV

Analyse des résultats

IV.1) Tableaux comparatif (expérimental / analytique)	61
IV.1.1) Pour le dosage 250 kg/m ³	61
IV.1.2) Pour le dosage 350 kg/m ³	62
IV.2) Courbes comparatives.....	63
IV.2.1) Pour le dosage 250 kg/m ³	63
IV.2.2) Pour le dosage 350 kg/m ³	64
IV.3) Conclusions.....	65
IV.4) Perspectives.....	65

Liste des figures

CHAPITRE I

Figure I.1 : Arrachement d'une barre scellée dans un massif en béton.....	2
Figure I.2 : Scellement de la barre dans le béton.....	3
Figure I.3 : Distribution de la fissuration.....	3
Figure I.4 : Barres à haute adhérence (HA).....	3
Figure I.5 : les 4 phases de comportement du béton armé en zone tendue.....	4
Figure I.6 : Les différentes dispositions.....	5
Figure I.7 : schéma d'ancrage par courbure.....	10
Figure I.8 : schéma du rayon de courbure.....	11
Figure I.9 : schéma du rayon de courbure.....	12
Figure I.10 : schéma du Longueur d'ancrage.....	13
Figure I.11 : méthode d'ancrages autres que le scellement droit.....	15
Figure I.12 : ancrage des armatures transversales.....	15

CHAPITRE II

Figure II.1: les trois modes de rupture.....	17
Figure II.2: schéma d'ancrage.....	17
Figure II.3: Définition d'un ancrage courbe.....	18
Figure II.4: Dimensions des barres façonnées.....	18
Figure II.5: Types des ancrages courbe.....	19
Figure II.6: Schéma d'ancrage 45°.....	19
Figure II.7: Schéma d'ancrage 90°.....	20

CHAPITRE III

Figures III.1 : schéma de l'ensemble des moules.....	38
Figures III.2 : l'ensemble des moules	38
Figures III.3 : Schéma des barres d'aciers.....	39
Figures III.4 : les barres d'acier.....	39
Figures III.5 : Schéma des éprouvettes	40
Figure III.6 : Eprouvettes cubique (20x10x10) cm.....	40
Figures III.7 : les éprouvettes après 24H	41
Figures III.8 : La machine de traction.....	42
Figures III.9 : exemples des résultats de la logicielle.....	42
Figures III.10 : schéma du dispositif	43
Figures III.11 : le cube d'acier contenant l'échantillon dans la machine.....	44
Figures III.12 : exemple d'une éprouvette à l'âge de 7 jours Apres l'essai d'arrachement.....	45
Figures III.13 : exemple d'une éprouvette à l'âge de 14 jours Apres l'essai d'arrachement.....	45
Figures III.14 : exemple d'une éprouvette à l'âge de 28 jours Apres l'essai d'arrachement.....	46
Figures III.15 : σ en fonction de θ pour les âges (7 ;14 ;28 jours).....	47
Figures III.16 : σ en fonction de θ pour les diamètres ($\emptyset 8$; $\emptyset 12$; $\emptyset 14$).....	48
Figures III.17 : σ en fonction de diamètre \emptyset pour les formes de scellement (45° ; 90° ; 180°).....	49
Figures III.18 : σ en fonction de diamètre \emptyset pour les âges (7 ; 14 ; 28 jours).....	50
Figures III.19 : σ en fonction des âges (jours) pour la forme de scellement (45° ; 90° ; 180°).....	51
Figures III.20 : σ en fonction de l'âge (jours) pour le diamètre ($\emptyset 8$; $\emptyset 12$; $\emptyset 14$).....	52
Figures III.21 : σ en fonction de l'âge (jours) pour la forme de scellement (45° ; 90° ; 180°)	53
Figures III.22 : σ en fonction de Dosage pour l'âge (7) jours.....	54
Figures III.23 : σ en fonction de Dosage pour l'âge (14) jours	55
Figures III.24 : σ en fonction de Dosage pour l'âge (28) jours.....	56
Figures III.25 : σ en fonction de Dosage pour diamètre ($\emptyset 8$)	57
Figures III.26 : σ en fonction de Dosage pour diamètre ($\emptyset 12$).....	58
Figures III.27 : σ en fonction de Dosage pour diamètre ($\emptyset 14$).....	59

CHAPITRE IV

Figures IV.1: σ en fonction des âges	63
Figures IV.2 : σ en fonction des âges	64

Liste des tableaux

CHAPITRE I

Tableau I.1 : les valeurs de μ pour quelques valeurs de f_{c28}	7
Tableau I.2 : les valeurs de L_s / \emptyset pour quelques valeurs de f_{c28}	8

CHAPITRE II

Tableau II.1 : tableau auxiliaire	19
---	----

CHAPITRE III

Tableau III.1: Tableau des paramètres	39
Tableau III.2) Tableau des résultats des 7 jours pour les dosages (250 ; 350) kg/m^3	44
Tableau III.3) Tableau des résultats des 14 jours pour les dosages (250 ; 350) kg/m^3	45
Tableau III.4) Tableau des résultats des 28 jours pour les dosages (250 ; 350) kg/m^3	46

CHAPITRE IV

Tableau IV.1 : Tableau comparatif (expérimental / analytique).....	61
Tableau IV.2 : Tableau comparatif (expérimental / analytique).....	62

Notations

θ : Angle d'ancrage

\emptyset : Diamètres des barres

σ : Contrainte d'adhérence

l_b : Longueurs relatives d'ancrage

f_{c28} : La classe de résistance à la compression des bétons à 28 jours

f_{cj} : La classe de résistance à la compression des bétons à un certain jour

τ_{su} : La valeur limite ultime réglementaire de la contrainte d'adhérence

Ψ_s : coefficient de scellement relatif à l'acier

F_{max} : effort de traction dans la barre en traction simple

R : Rayon de courbure à l'axe de la barre

A_s : Section de la partie ancrée des barres

f_e : Résistance à la traction d'acier

EX : Résultats **EX**périmentaux

AN : Résultats **AN**alytiques

ملخص

يهدف هذا العمل إلى دراسة سلوك الالتصاق (الخرسانة – التسليح) وهو عامل جازم. دراسة عوامل للحساب التحليلي وكذلك التحليل التجريبي لعدد من القرائن التي تؤدي إلى استنتاجات موضوعية. العوامل : قطر القضبان ، نوع التثبيت ، مقدار الاسمنت في الخرسانة وكذلك عمرها هو موضوع عمل مقارنة دقيق وهام. **الكلمات المفتاحية:** الالتصاق (الخرسانة – التسليح) ، قطر القضبان ، نوع التثبيت ، مقدار الاسمنت في الخرسانة

Résumé

Ce travail vise à étudier le comportement de l'adhérence acier-béton qui est un paramètre décisif.

Une étude paramétrique pour le calcul analytique ainsi que l'analyse expérimentale a donné plusieurs indices qui ont abouti à des conclusions objectives.

Les paramètres : diamètre des barres, type de scellement, dosage du béton ainsi que son âge, ont fait l'objet d'un travail de comparaison précis et significatif.

Mots clés : l'adhérence acier-béton , diamètre de barres, type de scellement, dosage du béton

Abstract

This work aims to study the behaviour of the steel-concrete adhesion which is a decisive parameter.

A parametric study for the analytical calculation as well as the experimental analysis several clues that lead to objective conclusions.

Parameters: diameter of bars, type of sealing, dosage of concrete as well as its age is the subject of a precise and significant work of comparison.

Key words: steel-concrete bond, bar diameter, type of seal, concrete dosage

Introduction Générale

Introduction Générale

Le béton armé est un matériau destiné pour la construction des structures de Génie Civil, lors de l'étude du béton armé, la liaison acier-béton est un élément « clé » dans le comportement de ce matériau car celle-ci permet le transfert des efforts entre les armatures et le béton.

L'adhérence est liée à plusieurs paramètres entre autres : le dosage, le scellement, le diamètre des aciers. la recherche dans ce domaine a toujours présenté un intérêt et une préoccupation et est souvent motivée par l'importance de la liaison entre l'acier et le béton concernant la sécurité des constructions de génie civil.

L'objectif du programme expérimental développé dans ce travail est d'étudier les paramètres influents sur l'adhérence acier-béton (le dosage, le scellement, le diamètre des aciers, Ces essais ont été complétés par des observations post-rupture de l'interface acier-béton qui ont permis de préciser le comportement à l'arrachement de ces paramètres.

L'étude de l'interface liant ces deux matériaux a toujours fait l'objet de plusieurs réflexions et travaux de recherche.

Dans notre étude et en se basant sur plusieurs résultats déjà obtenus on a essayé de contribuer dans ce contexte.

Chapitre I
Recherche bibliographique

I.1) Introduction

I.1.1) Définition

Le béton armé est le fruit de l'association de deux matériaux : le béton et l'acier. Ces matériaux possèdent des propriétés complémentaires (l'un résiste à la traction tandis que l'autre résiste à la compression), ce qui rend ce type de béton très résistant. Cette propriété notamment explique son succès dans le domaine de la construction. Mais l'efficacité de cette association ne serait rien sans un phénomène particulier de l'adhésion.

L'adhérence correspond au phénomène de frottements existant entre le béton et les armatures. Elle permet, entre autres, aux armatures de ne pas glisser dans le béton [1].

Les règles à respecté sont relatives à l'Etat Limite Ultime.

Supposons une barre scellée dans un massif en béton. Si on exerce un effort d'arrachement suivant l'axe de la barre, on peut avoir trois modes de rupture :

- Glissement relatif de l'acier par rapport au béton (extraction de la barre dans une gaine de béton)
- Rupture par traction de l'acier (scellement parfait).
- Destruction du béton par arrachement d'un cône de béton.

Dans le premier cas l'action du béton sur l'acier peut se décomposer en :

- Un effort perpendiculaire à la barre.
- Une composante tangentielle : la contrainte d'adhérence notée τ_s .
- Dans le premier cas, si l'on suppose une répartition uniforme des contraintes tangente τ_s le long de la barre, l'équation d'équilibre s'écrit : $F = \tau_{su} \cdot \pi \cdot \Phi \cdot L$
- La valeur limite ultime réglementaire de la contrainte d'adhérence est notée τ_{su} et vaut d'après le BAEL 91 A 6.1,21

La force est évidemment directement fonction de la longueur d'ancrage [2].

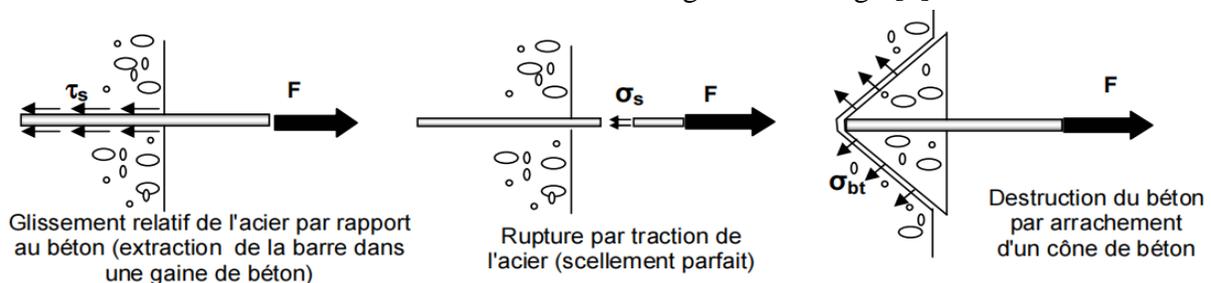


Figure I.1 : Arrachement d'une barre scellée dans un massif en béton.

Les conditions de résistance d'un élément en béton armé supposent que les armatures ne glissent pas à l'intérieur du béton. C'est le phénomène d'adhérence qui empêche ou limite ces glissements. Cette propriété physique permet la transmission des efforts et un fonctionnement rationnel : le béton suit alors les armatures dans leurs déformations. Les justifications que nous effectuerons en ELU (A6 du BAEL) porteront sur :

- la limitation de l'entraînement des armatures de façon à ne pas endommager le béton les entourant,
- les ancrages des extrémités de barres,
- les jonctions,
- les recouvrements,
- les coutures des barres.

La transmission des efforts du béton aux armatures s'effectue par le phénomène d'adhérence mais aussi par la courbure que l'on pourra donner aux barres [3].

I.1.2) Le Rôle De L'adhérence

–L'adhérence est l'action des forces qui s'opposent au glissement des armatures dans le béton. L'adhérence est un phénomène de frottement entre l'acier et le béton dont le coefficient vaut 0,4, ce qui correspond à un angle de frottement de $\pi/8$. L'adhérence permet aux armatures de transmettre les efforts au béton par contact entre les deux matériaux.

L'adhérence permet aux armatures de transmettre les efforts au béton par contact entre les deux matériaux. L'adhérence assure trois rôles :

- elle assure le scellement (ou l'ancrage) des barres [4].

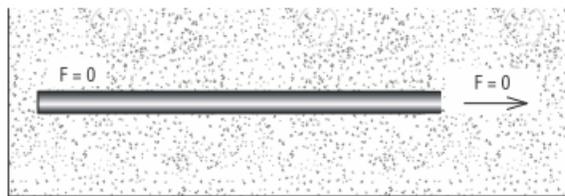


Figure I.2 : Scellement de la barre dans le béton.

- elle s'oppose au glissement des barres tendues ;
- elle distribue la fissuration.

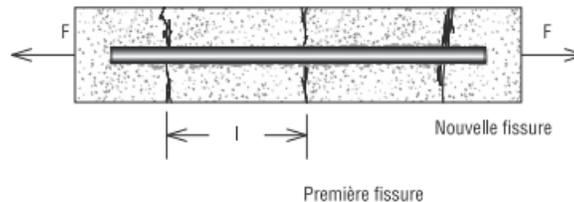


Figure I.3 : Distribution de la fissuration.

I.1.3) Nature de l'adhérence

On désigne sous le nom **d'adhérence** les forces de liaison qui s'opposent au glissement des armatures par rapport au béton qui les enrobe.

Cette adhérence est principalement due:

- à des forces d'origine chimique correspondant à un "collage". Ces forces sont de valeur médiocre et peu fiables.
- à des forces de frottement dues aux irrégularités de surface naturelles de la barre. Ces forces, plus importantes, sont encore assez limitées. C'est le principal mode d'adhésion des barres lisses.
- à des forces d'engrènement mécanique dues aux saillies et aux aspérités des barres dites à haute adhérence HA (voir ci-contre). Ces forces mettent en jeu la résistance du béton en compression et au cisaillement à proximité de la barre [5].

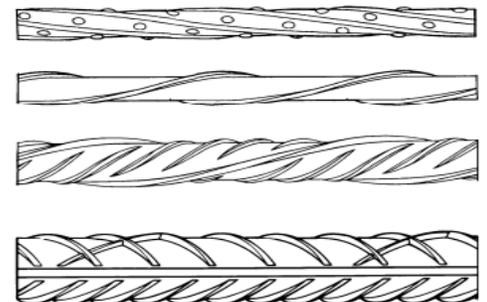


Figure I.4 : Barres à haute adhérence (HA).

I.1.4) La force d'adhérence

La force d'adhérence est directement proportionnelle à la surface extérieure des barres. Dès lors à égalité de section droite, le périmètre d'une barre de diamètre D vaut: $p = \pi.D$ [6].

Pour une même section droite

$$A = \frac{\pi.D^2}{4} \text{ on a: } D = \sqrt{\frac{4.A}{\pi}}$$

donc $p = 2\sqrt{A.\pi}$

I.1.5) Facteurs influant sur l'adhérence

L'adhérence est favorisée par :

- l'état de surface des aciers : l'adhérence est améliorée lorsque la barre possède des nervures (HA) en saillies ou lorsque sa surface est rugueuse (RL),
- la qualité du béton d'enrobage : en particulier le dosage et les conditions de vibration qui influent sur la compacité,
- les soins apportés à la mise en œuvre : il faut éviter par exemple que les gros granulats empêchent, par une création de voûte, la pâte de béton d'enrober les armatures. Il faut donc veiller à obtenir une bonne plasticité et une bonne vibration [7].

I.1.6) Comportement du béton et de l'acier

Du point de vue mécanique, le béton est caractérisé par sa faible capacité d'allongement et sa faible résistance en traction. L'acier est donc utilisé dans les zones tendues. Son allongement sous l'effet des tractions entraîne donc la fissuration du béton tendu. Nous pouvons décomposer le comportement du béton armé en zone tendue en 4 phases:

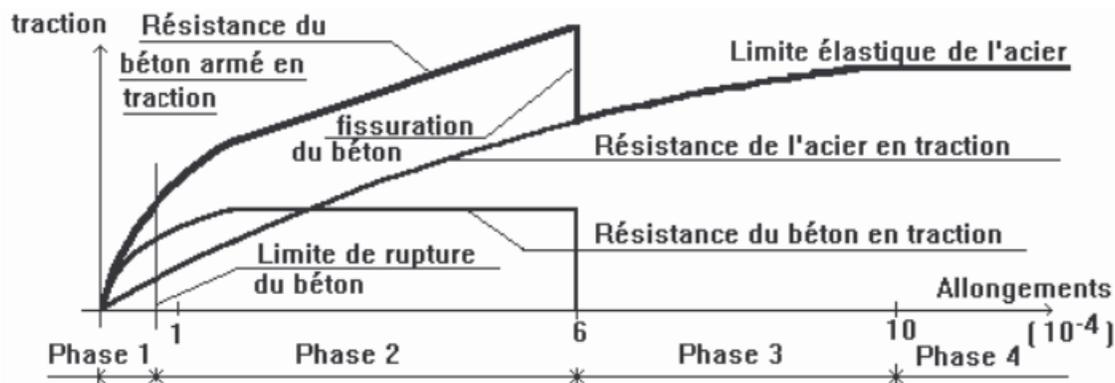


Figure I.5 : les 4 phases de comportement du béton armé en zone tendue

- En phase 1, le béton et l'acier travaillent ensemble puisque la résistance d'aucun des deux matériaux n'est épuisée.
- En phase 2, la résistance du béton est dépassée mais ce dernier peut suivre l'acier de façon plastique.
- En phase 3, le béton est au delà de sa rupture et est donc fissuré. Il ne peut donc plus suivre l'acier qui travaille seul.

- En phase 4, la limite élastique de l'acier est dépassée (10.10 -4). Nous ne pouvons pas faire travailler le matériau béton armé dans ce domaine.

Lorsque nous sommes en phase 3, soit en phase courante et si nous avons utilisé des aciers ronds lisses, nous remarquerons que les fissures sont larges car elles prennent en compte l'allongement de l'acier glissant dans le béton.

Par contre, dans le cas d'armatures à haute adhérence, les fissures seront fines et étroitement espacées. Cela résulte des multiples points d'ancrages constitués par les crénelures qui égalisent la distribution des contraintes. Nous nous attacherons à limiter la fissuration pour des raisons :

- d'étanchéité et d'imperméabilité,
- d'aspect des ouvrages,
- de durabilité à cause du risque de corrosion des armatures.

Il faudra donc limiter la contrainte admissible en traction des aciers, disposer judicieusement les armatures en utilisant autant que possible des barres de petit diamètre et en les enrobant de façon optimale dans le béton.

Le règlement précise que les dispositions a) et b) sont nettement plus défavorables que les dispositions c) et d) qui assurent une meilleure répartition des fissures (article A.4.5,323 du BAEL) [8].

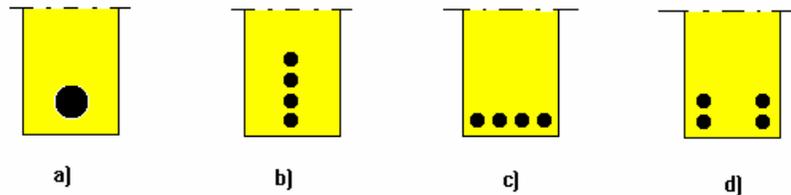


Figure I.6 : Les différentes dispositions.

I.1.7.) Adhérence dans le BAEL 91 [9].

A.6) adhérence

Le présent chapitre concerne les liaisons entre le béton et les armatures ; dans le cas des barres, ces liaisons sont mesurées par la contrainte d'adhérence s (A.6.1,1).

Les règles à respecter, toutes relatives à l'état limite ultime, visent :

- les extrémités des barres qui doivent être ancrées avec une sécurité suffisante (A.6.1,2 pour les barres, A.6.2,1 et A.6.2,2 pour les treillis soudés) ; différentes
- les armatures en partie courante soumises à des contraintes, dites d'entraînement, qui doivent être limitées pour ne pas endommager le béton entourant les armatures.

L'attention est attirée, en outre, sur le fait que la qualité de la liaison acier-béton est liée à la stricte observation des dispositions constructives de l'article A.7.2 .

A.6.1) Adhérence des aciers en barres

A.6.1,1) Contrainte d'adhérence

La liaison entre une armature et le béton est mesurée par la contrainte d'adhérence τ_s définie par la formule :

$$\tau_s = \frac{1}{u} \frac{dF}{dx}$$

où dF/dx est la variation par unité de longueur de l'effort axial exercé sur l'armature et u le périmètre utile de l'armature, confondu avec le périmètre nominal lorsqu'il s'agit d'une barre isolée.

Cette formule générale s'applique :

- d'une part, aux extrémités des armatures, c'est-à-dire aux ancrages destinés à transmettre au béton la totalité de l'effort axial exercé sur l'armature ;
- d'autre part, aux zones courantes des armatures soumises à des efforts d'entraînement dus à la variation de l'effort axial appliqué.

Les valeurs à prendre pour les paquets sont précisées en A.6. 1,221 pour les ancrages et en A.6. 1,3 pour les armatures soumises à des efforts d'entraînement.

L'efficacité d'une barre du point de vue de l'adhérence est caractérisée par son coefficient de scellement s qui est pris égal à l'unité pour les ronds lisses bruts de laminage et à la valeur fixée par la fiche d'identification pour les autres types d'armatures.

Pour les armatures à haute adhérence, la valeur du coefficient s est généralement égale à 1,5.

A.6.1 adhérence des aciers en barres

A.6.1,25 ancrage par courbure de barres tendues

A.6. 1,252 La condition de non-écrasement du béton devient :

$$\frac{r}{\varnothing} \geq 0,032 \left(1 + \frac{\varnothing}{e_r} \right) \nu \frac{\sigma_s}{f_{cj}^{1/2}}$$

A.6.1,2) Ancrage des aciers en barres

A.6.1,2,1) conditions d'équilibre

L'ancrage de l'ensemble d'un paquet de barres n'est pas admis. Une barre est toujours ancrée individuellement ; les paquets de plus de trois barres ne comportent aucun ancrage de barre individuelle sur toute leur longueur.

Il en résulte que dans un paquet de trois barres au plus, les longueurs d'ancrage de chacune des barres ne doivent pas se chevaucher ; les paquets de plus de trois barres ne doivent être composés que d'éléments d'une seule longueur ancrés par épanouissement à leurs extrémités.

Sur la longueur d'un ancrage, la contrainte d'adhérence est supposée constante et égale à sa valeur limite ultime :

$$\tau_{su} = 0,6 \psi_s^2 f_{ij}$$

Le tableau ci-dessous donne les valeurs de τ_{su} pour quelques valeurs de f_{c28} appartenant au domaine couvert par le présent règlement ; on a considéré le cas des ronds lisses ($s = 1$) et celui des barres à haute adhérence les plus courantes pour lesquelles ($s = 1,5$).

Tableau I.1 : les valeurs de τ_{su} pour quelques valeurs de f_{c28} .

f_{cj} (MPa)	f_{tj} (MPa)	τ_{su} (MPa)	
		$\psi_s = 1$	$\psi_s = 1.5$
20	1,8	1,1	2,4
25	2,1	1,3	2,8
30	2,4	1,4	3,2
35	2,7	1,6	3,6
40	3	1,8	4,0
45	3,3	2,0	4,5
50	3,6	2,2	4,9
55	3,9	2,3	5,3
60	4,2	2,5	5,7

En outre, dans les parties courbes, en l'absence de contact avec une autre barre, il est admis de tenir compte d'un effort axial de frottement égal à la réaction de courbure de la barre multipliée par le coefficient de frottement de l'acier sur le béton, pris égal à 0,4.

La réaction de courbure par unité de longueur est égale au quotient de l'effort axial de la barre par le rayon de courbure au point considéré.

La zone d'ancrage d'une barre ou d'un groupe de barres doit être armée transversalement par des aciers de couture tracés et dimensionnés pour équilibrer les efforts tendant à faire éclater le béton par mise en jeu de l'adhérence. Les articles A.6.1,23 et

A.6.1,254 donnent les règles à appliquer. Les armatures qui auraient été prévues à d'autres fins peuvent jouer ce rôle d'armatures de couture vis-à-vis des efforts d'adhérence, dans la mesure où leur tracé est correct à cet égard (*). Il y a lieu aussi de tenir compte de l'existence (éventuelle) d'un effort de direction perpendiculaire à l'axe de l'armature ancrée (**).

* La zone d'ancrage est le volume de béton qui entoure la partie de barre ancrée et qui peut être mécaniquement affecté par la mise en jeu de l'ancrage. Lorsque la zone d'ancrage se situe au voisinage des parois, les armatures de couture peuvent être bouclées au contact des armatures ancrées.

** Un effort perpendiculaire à l'armature ancrée augmente l'adhérence s'il s'agit d'une compression, mais la diminue s'il s'agit d'une traction. Dans ce dernier cas, les ancrages courbes sont recommandés.

A.6.1,2,2) Ancrages rectilignes (A.6.1,2,2,1)

Les barres rectilignes de diamètre et de limite d'élasticité f_e sont ancrées sur une longueur s dite longueur de scellement droit ».

A défaut de calcul précis, on adopte les valeurs forfaitaires suivantes pour le rapport s / \varnothing :

- 40 pour les aciers à haute adhérence Fe E 400 de s au moins égal à 1,5 ;
- 50 pour les aciers à haute adhérence Fe E 500 de s au moins égal à 1,5 et pour les aciers lisses Fe E 215 et Fe E 235. Ces valeurs forfaitaires s'appliquent en fait à des bétons de faible résistance. Le tableau ci-dessous donne les valeurs de L_s / \varnothing pour quelques valeurs de f_{c28} appartenant au domaine couvert par le présent règlement.

Tableau I.2 : les valeurs de l_s / \emptyset pour quelques valeurs de f_{c28}

f_{cj} (MPa)	l_s / \emptyset pour $\psi_s = 1,5$	
	F _e E 400	F _e E 500
20	41	51
25	35	44
30	31	39
35	27	34
40	25	31
45	22	28
50	21	26
55	19	24
60	18	22

Une valeur plus précise est donnée par l'expression :

$$l_s = \frac{\emptyset f_e}{4\tau_{su}}$$

La formule donnée est issue de l'égalité :

$$A_s f_e = u l_s \tau_{su}$$

avec :

$$A_s = \frac{\pi \emptyset^2}{4} \quad \text{et} \quad u = \pi \emptyset.$$

Dans le cas d'une barre faisant partie d'un paquet de trois on adopte :

$$u = \frac{2\pi \emptyset}{3}$$

Les valeurs indiquées ci-dessus pour s sont valables à la fois pour les barres tendues et pour les barres comprimées. Elles doivent être multipliées par 1,5 dans le cas d'une barre faisant partie d'un paquet de trois.

A.6.1,222

Lorsque l'aire réelle A de la section droite d'une barre est plus grande que la section A_{cal} strictement nécessaire par le calcul, la longueur d'ancrage peut être réduite dans le rapport A_{cal} / A sans pouvoir être inférieure à 10 fois le diamètre de la barre.

A.6.1,223

La jonction de deux barres parallèles identiques est assurée par recouvrement si leurs extrémités se chevauchent sur une longueur au moins égale à leur longueur d'ancrage augmentée de la distance entre axes de ces barres, lorsque cette distance est supérieure à cinq fois leur diamètre.

En cas d'utilisation de paquets de barres, il faut également tenir compte des articles A.6. 1,21 et A.6.1,221 .

La jonction mécanique de deux barres peut être réalisée par d'autres procédés, notamment par des manchons ou par soudure (bout à bout ou par recouvrement), dans la mesure où des essais probants ont permis de vérifier la résistance du système utilisé.

A.6.1,23 Couture des ancrages rectilignes

Dans le cas d'une jonction par recouvrement de deux barres parallèles, la résistance de l'ensemble des armatures de couture est au moins égale à la résistance de chacune des barres à ancrer. Le diamètre des armatures de couture doit être choisi suffisamment petit pour assurer une bonne répartition de ces armatures tout au long de la jonction.

Il en résulte que, pour coudre l'ancrage d'une armature de section A_s et de limite d'élasticité $f_{e,s}$, il faut une section totale d'armatures de couture A_t (de limite d'élasticité $f_{e,t}$) telle que :

$$A_t \geq A_s \frac{f_{e,s}}{f_{e,t}}$$

Dans le cas le plus général où on peut trouver, dans une même zone de jonctions par recouvrement, des barres arrêtées et des barres continues, il convient d'adapter la règle de l'alinéa précédent compte tenu des positions respectives des armatures et de la proportion de barres ancrées.

Dans le cas du recouvrement de deux barres, il s'agit de transmettre l'effort total d'une barre dans une seule direction. Dans d'autres cas où le même effort se transmet dans plusieurs directions, la couture nécessaire dans une direction donnée est égale à une fraction de l'effort total, comprise entre le quart et l'unité, suivant le cas particulier à considérer. Il convient de choisir cette fraction d'autant plus forte que la proportion de barres ancrées est plus élevée.

Pour les poutres, on peut se dispenser de la vérification des armatures de couture, à condition que la longueur d'ancrage des barres arrêtées soit égale à leur longueur de scellement droit et que la proportion de barres ancrées ne dépasse pas 25 % sur l'étendue d'une longueur d'ancrage.

Pour les poutres les plus usuelles, les armatures d'âme ou de talon sont généralement suffisantes pour assurer le rôle de couture vis-à-vis des efforts développés aux ancrages.

Pour les dalles et voiles courbes, il n'y a généralement pas lieu de fournir des justifications relatives aux armatures de couture, à condition d'appliquer la disposition suivante :

la proportion de barres intéressées par un recouvrement rectiligne dans une nappe donnée ne doit pas dépasser le tiers si cette nappe est la plus proche d'une paroi et la moitié si ladite nappe est séparée de la paroi par une nappe de direction différente. Cette disposition n'est cependant pas applicable aux treillis soudés pour lesquels on se réfère à l'article **A.6.2**.

Cette règle a pour but d'éviter le feuilletage des dalles, c'est-à-dire la fissuration continue dans le plan d'une nappe d'armatures.

Les risques de feuilletage augmentent avec la proportion de barres scellées et le rapport de leur diamètre à l'épaisseur de la dalle.

Il est possible de s'affranchir de cette règle à condition de prévoir des ancrages munis de crochets normaux dont les plans sont perpendiculaires au feuillet moyen de la dalle.

A.6.1,2,4) Jonction de barres comprimées

Les jonctions de barres susceptibles d'être comprimées sont obligatoirement rectilignes (*). La longueur du recouvrement (**) peut être prise égale à $0,6 s$ à condition que la barre soit toujours comprimée, qu'elle ne fasse pas partie d'un paquet de trois et que les entre-axes des barres en jonction soient au plus égaux à cinq fois leur diamètre.

* Il est rappelé que les barres en attente rectilignes ont donné lieu sur les chantiers à des accidents corporels et qu'il convient donc

de prendre des dispositions pour assurer la sécurité du personnel (voir fascicule 65 article 33.23 et DTU 21).

** Les valeurs forfaitaires données en A.6.1,221 deviennent alors :

- 24 pour les aciers à haute adhérence Fe E 400 de s au moins égal à 1,5,
- 30 pour les aciers à haute adhérence Fe E 500 de s au moins égal à 1,5 et pour les ronds lisses Fe E 215 et Fe E 235.

L'attention est d'autre part attirée sur le fait qu'une barre ne peut pas être considérée comme toujours comprimée si la pièce dont elle fait partie est soumise à des chocs importants (pieux battus par exemple).

Les jonctions de barres comprimées, non susceptibles d'être tendues, peuvent se faire par aboutement des barres au contact, sous réserve que la préparation à donner aux faces en contact et le dispositif à employer pour maintenir les barres pendant le bétonnage aient donné lieu à des vérifications expérimentales probantes.

Il s'agit généralement de manchons.

A.6.1,2,5) Ancrage par courbure de barres tendues

A.6.1,251

Outre la condition de non-écrasement du béton formulée ci-après en A.6.1,252 , les ancrages par courbure doivent être réalisés suivant les rayons minimaux qui suivent. Les valeurs données pour les rayons de courbure visent la distance du centre de courbure à l'axe de la barre. On ne doit jamais avoir recours à des courbures d'un rayon inférieur au triple du diamètre de la barre ployée, sauf pour les cadres, étriers et épingles transversaux des poutres et des poteaux. Le rayon de courbure de trois diamètres est admis pour les ronds lisses des nuances Fe E 215 et Fe E 235. Pour ces mêmes ronds et pour le façonnage des cadres, étriers et épingles susvisés, on peut réduire le rayon de courbure à deux diamètres. Les rayons de courbure de deux et trois diamètres correspondent respectivement à des ployures sur des mandrins de trois et de cinq diamètres. La figure ci-contre explicite la terminologie utilisée.

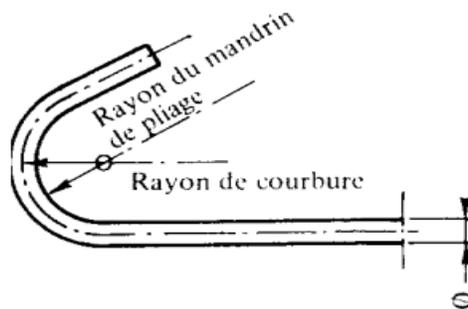


Figure I.7 : schéma d'ancrage par courbure

Pour les barres à haute adhérence les rayons de courbure sont au moins égaux aux valeurs fixées par les textes réglementaires en vigueur.

A.6.1,252

Dans toute partie courbe de barre de diamètre ϕ , le rayon de courbure r satisfait à l'inégalité suivante, dite condition de non-écrasement du béton :

$$\frac{r}{\varnothing} \geq 0.2 \left(1 + \frac{\varnothing}{e_r} \right) \nu \frac{\sigma_s}{f_{cj}}$$

- où e_r désigne la distance du centre de courbure de la barre à la paroi dont la proximité augmente le danger d'écrasement du béton (*) ;
 - s la contrainte de calcul évaluée à l'origine de la courbure, sous sollicitation ultime ;
 - un coefficient numérique égal à l'unité lorsque la barre est isolée ou fait partie d'un ensemble de barres courbées disposées en un seul lit (**) ; sa valeur est portée à 5/3, 7/3 ou 3 respectivement lorsque la barre courbée fait partie d'un ensemble disposé en deux, trois ou quatre lits, sous réserve que les distances libres entre lits successifs soient au moins égales au diamètre des plus grosses barres.
- * La situation la plus dangereuse est celle d'une barre dont le tracé est parallèle à une paroi. On augmente donc la sécurité en inclinant la zone courbe vers la masse de béton (quand cela est possible, circonstance qui se présente fréquemment aux ancrages). Cependant, en raison des conditions d'exécution (imprécisions du chantier), il est recommandé de conduire les justifications comme si le tracé de la barre était parallèle à la paroi.

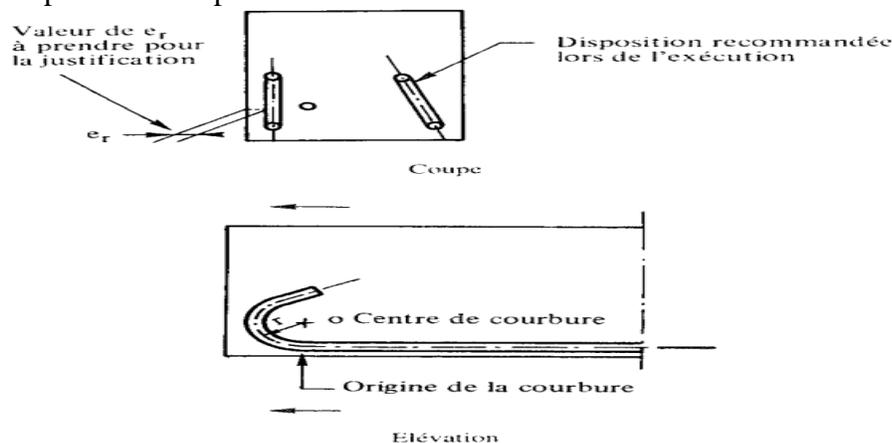


Figure I.8 : schéma du rayon de courbure.

** Il est indiqué que, dans le cas de barres disposées en un seul lit, la condition de non-écrasement du béton est généralement satisfaite avec des rayons de courbure de 3 pour les ronds lisses en acier Fe E 215 ou Fe E 235 et de 5,5 pour les barres à haute adhérence en acier Fe E 400 ou Fe E 500. En outre, dans les parties où l'armature de traction tout entière d'une poutre est courbe, ou dans les boucles de jonction des barres tendues d'une poutre ou d'un tirant, le rayon de courbure r de chaque barre satisfait à l'inégalité :

$$\frac{r}{\varnothing} \geq 0.35 \left(1 + \frac{2n\varnothing}{b} \right) \nu \frac{f_e}{f_{cj}}$$

- où f_e désigne la limite d'élasticité garantie des barres ;
- n le nombre de barres d'un même lit ;
- b la largeur de l'élément en cause, les autres symboles gardant

Cette deuxième condition de non-écrasement du béton, plus sévère que la première, s'applique d'une part lorsque toutes les armatures de traction sont en courbe (origine d'une console par exemple), d'autre part aux recouvrements effectués suivant des tracés en forme d'épingles à cheveux.

Il est indiqué que, dans le cas de barres disposées en un seul lit, cette condition est généralement satisfaite avec des rayons de courbure de 7 pour les ronds lisses en acier Fe E 215 ou Fe E 235 et de 11 pour les barres à haute adhérence en acier Fe E 400 ou Fe E 500.

Enfin, il est loisible d'introduire dans la formule la contrainte de calcul s lorsque celle-ci est nettement inférieure à f_e .

A.6.1,253

Par définition, le crochet normal » comporte une partie en demi-cercle suivie d'un retour rectiligne d'une longueur égale à deux fois le diamètre de la barre. Le rayon de la partie courbe est égal à trois diamètres pour les barres lisses de classe Fe E 215 ou Fe E 235 ; pour les barres à haute adhérence de classe Fe E 400 ou Fe E 500, il doit être au moins égal à 5,5 diamètres sauf prescription contraire des fiches d'identification.

Il résulte de cette définition que les longueurs ancrées mesurées hors crochet visées plus bas ne peuvent être prises inférieures à 5,5 pour les barres lisses et 8 pour les barres à haute adhérence.

A défaut de calcul plus précis, on peut admettre que l'ancrage d'une barre rectiligne terminée par un crochet normal est assuré lorsque la longueur de la partie ancrée mesurée hors-crochet est au moins égale à :

- 0,6 s s'il s'agit d'une barre lisse de classe Fe E 215 ou Fe E 235 ;
- 0,4 s s'il s'agit d'une barre à haute adhérence de classe Fe E 400 ou Fe E 500.

La jonction de deux barres de même diamètre, parallèles et munies de crochets normaux, est assurée lorsqu'elles se chevauchent sur une longueur au moins égale aux valeurs ci-dessus, augmentée de l'écartement transversal des centres de courbure de leurs crochets, si celui-ci est supérieur à cinq fois le diamètre des barres.

Les figures ci-après illustrent les dispositions à prendre en cas de recouvrements de barres terminées par des crochets normaux.

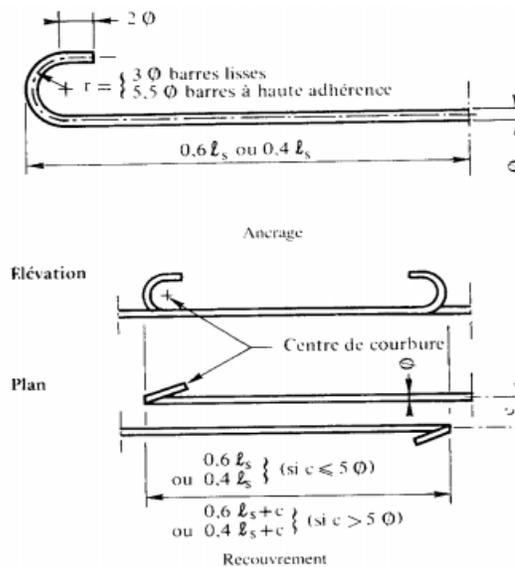


Figure I.9 : schéma du rayon de courbure.

Le respect des prescriptions concernant le crochet normal dispense de vérifier la condition de non-écrasement du béton.

A.6.1,254

Les plans comportant des ancrages par courbure doivent être cousus pour parer aux risques de fissuration du béton suivant ces plans. Il est cependant possible de se dispenser de prévoir des

armatures de couture pour les dalles et voiles courbes, si les ancrages par courbure sont noyés dans la masse du béton.

Dans le cas de recouvrements munis de crochets normaux, les coutures présentent une section au moins égale à la moitié de celle qui serait nécessaire pour un scellement droit.

Dans le cas d'ancrages par courbure concentrés dans une même zone et pouvant comporter plusieurs lits d'armatures, il est recommandé que la résistance de calcul de l'ensemble des armatures de couture ne soit pas inférieure au quart de celle des barres courbes d'une même file.

A.6.1,255

On admet que les ancrages des extrémités des barres façonnées en cadres, étriers et épingles sont assurés par courbure suivant

le rayon minimal, si les parties courbes sont prolongées par des parties rectilignes de longueur au moins égale à :

- cinq diamètres à la suite d'un arc de cercle de 180° ;
- dix diamètres à la suite d'un arc de cercle de 135° ;
- quinze diamètres à la suite d'un arc de cercle de 90° ,

à condition que les plans de ces ancrages ne fassent pas un angle supérieur à /8 avec les sections droites où sont disposés les aciers en cause. Des dispositions différentes doivent être justifiées.

Les conditions de non-écrasement du béton données en A.6.1,252 ne sont pas applicables aux courbures de cadres, étriers ou épingles.

A.6.1,3) entraînement des barres isolées ou en paquet

Dans une poutre fléchie de section constante, la contrainte d'adhérence d'entraînement se sur un paquet de barres de section A_{si} et de périmètre u_i est égale à l'expression :

$$\tau_{se} = \frac{V_u}{0,9d u_i} \frac{A_{si}}{A_s}$$

où A_s désigne la section totale des armatures tendues.

Il est rappelé que V_u désigne la valeur de calcul de l'effort tranchant vis-à-vis de l'état limite ultime : le bras de levier est pris forfaitairement égal à la hauteur utile d multipliée par 0,9.

Quand toutes les barres sont de même diamètre et, soit isolées, soit groupées en paquets égaux, la formule devient :

$$\tau_{se} = \frac{V_u}{0,9d \Sigma u}$$

u désignant la somme des périmètres utiles des barres ou des paquets.

Le périmètre utile u_i est pris égal au périmètre minimal circonscrit à la section droite du paquet. Pour un diamètre de barre , on obtient ainsi :

- pour une barre isolée ;
- (+ 2) pour un paquet de deux barres ;
- (+ 3) pour un paquet de trois barres accolées deux à deux.

Il est rappelé que les paquets de plus de trois barres ne peuvent être utilisés que s'ils ne sont soumis à aucune sollicitation d'entraînement.

La contrainte d'adhérence se doit être inférieure à la valeur limite ultime :

$$\tau_{se.u} = \psi_s f_{tj}$$

Cette justification ne s'impose en général que pour les barres en chapeaux » disposées au-dessus des appuis des poutres hyperstatiques, lorsque celles-ci sont soumises à des efforts très concentrés. Elle s'impose aussi en cas d'utilisation de paquets de plus de deux barres.

sauf pour les armatures de dalles séparées de la paroi la plus proche par une nappe d'armatures orthogonales, pour lesquelles on adopte :

$$\tau_{se.u} = 2\psi_s f_{tj}$$

A défaut de calculs plus précis, il est loisible d'adopter comme valeur de $s f_{tj}$:

- 2 MPa (ou N/mm) pour les ronds lisses,
- 3 MPa (ou N/mm) pour les barres à haute adhérence telles que s 1.5.

1.1.8) Adhérence dans EUROCODE 2 [10].

1.1.8.1) Longueur d'ancrage conventionnelle de référence

$$l_{b,rqd} = \frac{\phi \sigma_{sd}}{4 f_{bd}}$$

σ_{sd} : contrainte de calcul de la barre dans la section à partir de laquelle on mesure l'ancrage (=435 MPa pour des aciers de 500 MPa et dans les conditions maximales, sinon on peut calculer la valeur exacte en fonction du chargement).

f_{bd} : valeur de calcul de la contrainte ultime d'adhérence

$$f_{bd} = 2,25\eta_1\eta_2 f_{ctd}$$

$\eta_1 = 1$ si les conditions d'adhérence sont bonnes, 0,7 sinon

$\eta_2 = 1$ si $\phi \leq 32$ mm ou $(132 - \phi)/100$ sinon (ϕ : diamètre de la barre)

$f_{ctd} = f_{ctk,0.05} / \gamma_c$

$f_{ctk,0.05}$: résistance caractéristique à la traction avec un fractile de 5%

$$f_{ctk,0.05} = 0,7 f_{ctm}$$

1.1.8.2) Longueur d'ancrage de calcul

$$L_{bd} = \alpha_1\alpha_2\alpha_3\alpha_4\alpha_5 L_{b,rqd}$$

- les coefficients $\alpha_i \leq 1$, sont définis dans le Tableau 8.2 de l'EC2 (pour prendre en compte la forme des barres, l'enrobage et le confinement des aciers) Longueur d'ancrage de calcul (8.4.4) : - EC2, 8.4.4(2), par simplification, on peut considérer : $b \leq b_{rqd} \Rightarrow \alpha_1 = 1$, $b > b_{rqd} \Rightarrow \alpha_1 = 0,7$ si $cd > 3\phi$; 1 sinon

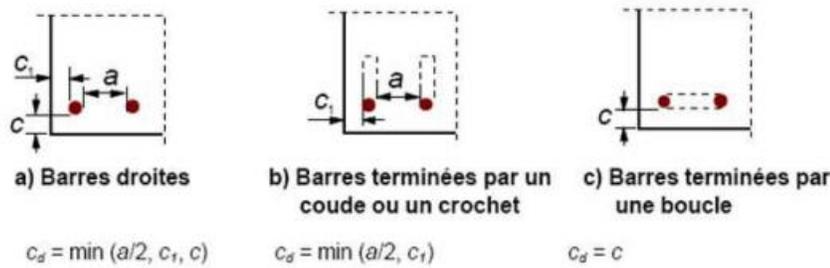


Figure I.10 : schéma du Longueur d'ancrage.

I.1.8.3) Longueur d'ancrage minimale

$$l_{b,min} \geq \max(0,3l_{b,rqd}; 10\phi; 100mm)$$

I.1.8.4) Ancrages courbes

à partir de la longueur développée

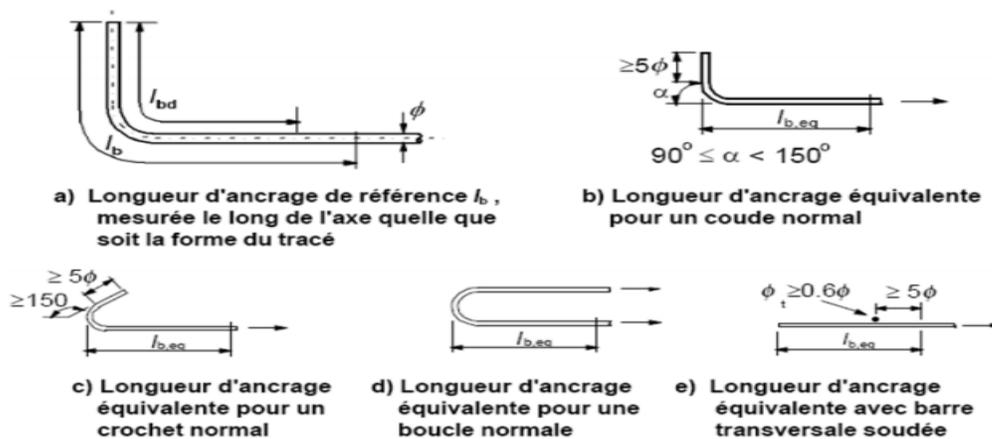
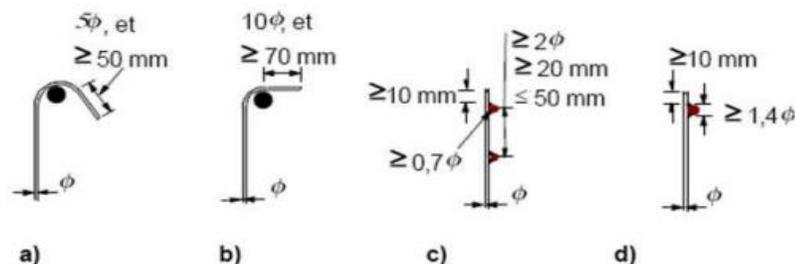


Figure I.11 : méthode d'ancrages autres que le scellement droit

I.1.8.5) Ancrages des armatures d'effort tranchant



Note : Pour c) et d), il convient que l'enrobage ne soit ni inférieur à 3ϕ , ni à $50mm$ si cette valeur est plus faible.

Figure I.12 : ancrage des armatures transversales.

Chapitre II
Calcul Analytique

II) Calcul Analytique

L'adhérence est un phénomène de liaison tangentielle à l'interface acier béton due au frottement et à l'arc-boutement des bielles de béton. Les règles à respecter sont relatives à l'Etat Limite Ultime. Supposons une barre scellée dans un massif en béton.

Si on exerce un effort d'arrachement suivant l'axe de la barre, on peut avoir trois modes de rupture :

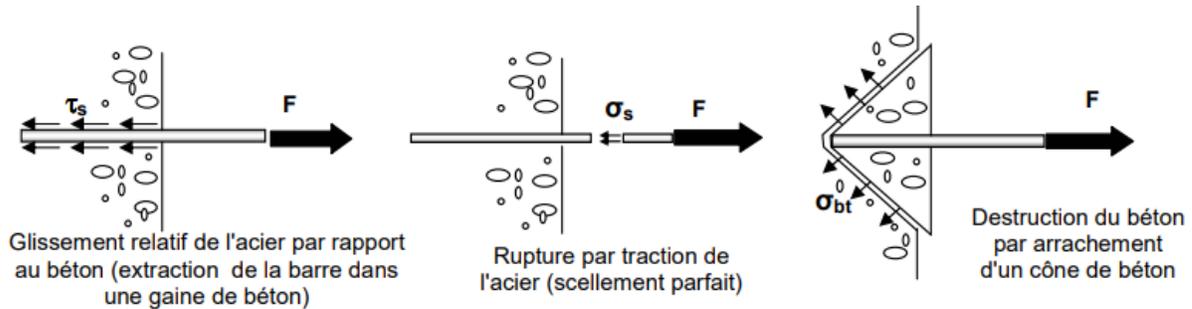


Figure II.1: Arrachement d'une barre scellée dans un massif en béton.

La liaison entre le béton et les armatures est caractérisée par la contrainte d'adhérence τ_s .

Dans le premier cas, si l'on suppose une répartition uniforme des contraintes tangente τ_s le long de la barre, l'équation d'équilibre s'écrit : $F = \tau_s \cdot \pi \cdot \Phi \cdot L$. La valeur limite ultime réglementaire de la contrainte d'adhérence est notée τ_{su} et vaut d'après le BAEL 91 A 6.1,21

$$\tau_{su} = 0,6 \cdot \Psi_s^2 \cdot f_{ij} \text{ avec}$$

$$f_{ij} = 0,6 + 0,06 \cdot f_{cj} \text{ et } f_{ij} \text{ et } f_{cj} \text{ exprimés en MPa}$$

Ψ_s est le coefficient de scellement relatif à l'acier, selon sa nature lisse ou HA

$$\Psi_s = 1 \text{ pour les aciers lisse}$$

$$\Psi_s = 1,5 \text{ pour les aciers HA}$$

La longueur de scellement droit, notée L_s , est la longueur sur laquelle il faut associer l'acier et le béton pour qu'à la sortie de l'ancrage, l'acier puisse travailler en traction à sa limite élastique f_e . L'effort de traction dans la barre en traction simple est : $F = \text{section} \times \text{contrainte} = [\pi \cdot \Phi^2 / 4] \cdot f_e$

Les contraintes d'adhérence supposées maximum et constantes le long de la barre ont pour résultante : $F = \pi \cdot \Phi \cdot L_s \cdot \tau_{su}$ [11].

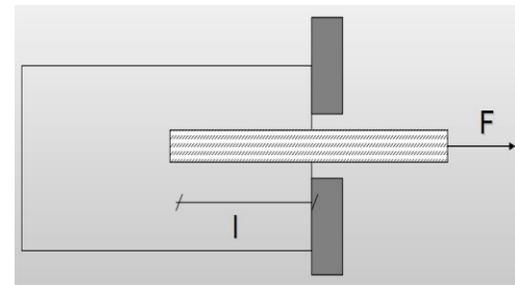


Figure II.2: schéma d'ancrage

II.1) Calcul des efforts de traction (dosage 250 kg/m3)

II.1.1) Age 1 : 7 jours

II.1.1.1) Calcul de la contrainte d'adhérence τ_s

$$f_{cj} = \frac{j}{4.76 + 0.83 \cdot j} f_{c28}$$

$$f_{cj} = \frac{7}{4.76 + 0.83 \cdot 7} 20 = 13,25$$

$$f_{ij} = 0,6 + 0,06 \cdot 13,25 = 1,39 \text{ MPa}$$

$$\tau_{su} = 0,6.1,5^2 \cdot 1,39 = 1,88 \text{ MPa} = 0,188 \text{ kn/cm}^2$$

II.1.1.2) calcul de L'effort de traction

1) ancrages rectilignes (BAEL 91 ver 99)

calcul de L'effort de traction dans la barre en traction simple

La contrainte maximale de l'adhérence acier-béton τ_{max} est calculée en considérant une contrainte de cisaillement homogène sur la longueur d'ancrage avec: $\tau_{max} = F_{max} / \Pi.d.l$
 Où F_{max} est la force maximale, d le diamètre de la barre et L la longueur d'ancrage.

Soit $F_{max} = \tau_{su} \cdot \Pi.d.l$

Donc

On a

Φ8	→ L= 17,5cm	→ $F_{max} = 0,188 \cdot 3,14 \cdot 0,8 \cdot 17,5 = 8,26 \text{ kn}$
Φ12	→ L= 17,5cm	→ $F_{max} = 0,188 \cdot 3,14 \cdot 1,2 \cdot 17,5 = 12,40 \text{ kn}$
Φ14	→ L= 17,5cm	→ $F_{max} = 0,188 \cdot 3,14 \cdot 1,4 \cdot 17,5 = 14,63 \text{ kn}$

2) Ancrage par courbure des barres tendues [12]

Un ancrage courbe est composé de deux parties droites AB et CD de longueurs l_1 et l_2 respectivement, et d'une partie courbe BC de rayon de courbure R et d'angle θ



Figure II.3: Définition d'un ancrage courbe

Dimensions des barres façonnées (fig II.4).

- Rayon de courbure à l'axe de la barre : $R=5,5.\Phi$
- Longueur développée de l'ancrage (θ en rad) : $Ld = L1 + R.\theta + L2$
- Longueur d'appui : $D2 = L2 + R + \Phi/2$
- Longueur de la partie ancrée : $La = 0,4.Ls$

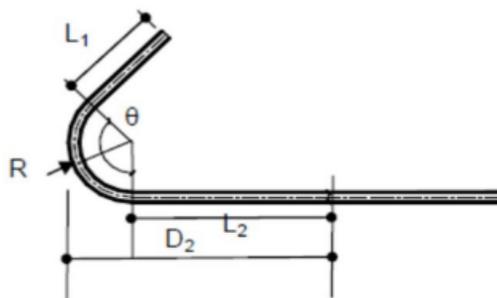


Figure II.4: Dimensions des barres façonnées

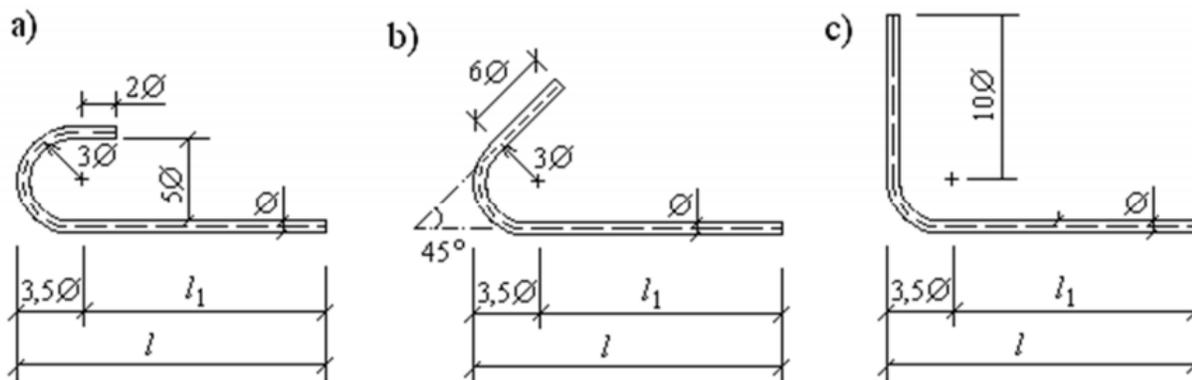


Figure II.5: Types des ancrages courbe

a) Ancrage par courbure des barres (Φ8/45°)

Tableau II.1 : tableau auxiliaire.

Θ	90°	120°	135°	180°
	π/2	2π/3	3 π/4	π
$e^{-0,4\theta}$	0,53	0,43	0,39	0,28
$(1 - e^{-0,4\theta})/0,4$	1,17	1,42	1,53	1,79

L'effort à reprendre sera donc de

$$F_A = [\pi \cdot \Phi^2 / 4] \cdot f_e = 3,14 \cdot 0,8^2 \cdot 50 / 4 = 25,12 \text{ kn}$$

L'effort en B sera plus faible du fait de l'adhérence le long de AB

$$F_{AB} = \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su}$$

$$F_B = F_A - \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su} = 25,12 - 3,14 \cdot 0,8 \cdot 14,5 \cdot 0,188 = 18,27 \text{ kn}$$

L'effort en C est déterminé par l'équation de l'ancrage courbe

$$F_C = F_B \cdot e^{-0,4\theta} - \pi \cdot \Phi \cdot r \cdot \tau_{su} [(1 - e^{-0,4\theta}) / 0,4] = 18,27 \cdot 0,39 - 3,14 \cdot 0,8 \cdot 5,5 \cdot 0,8 \cdot 0,188 \cdot 1,53 = 3,48 \text{ kn}$$

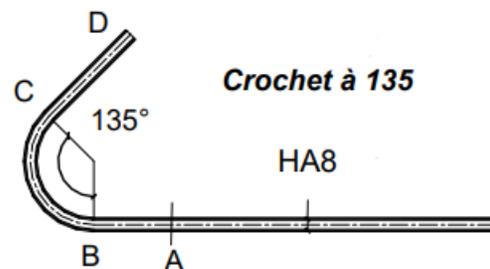


Figure II.6: Schéma d'ancrage 45°

$$F_C = F_{CD}$$

$$F_T = F_{AB} + F_{CD} = 6,85 + 3,48 = 10,33 \text{ kn}$$

$$\sigma = F_T/A_S = 10,33/(3,14 \cdot 0,8 \cdot 17,5) = 0,23 \text{ kn/cm}^2$$

b) Ancrage par courbure des barres ($\Phi 8/90^\circ$)

L'effort à reprendre sera donc de

$$F_A = [\pi \cdot \Phi^2 / 4] \cdot f_c = 3,14 \cdot 0,8^2 \cdot 50 / 4 = 25,12 \text{ kn}$$

L'effort en B sera plus faible du fait de l'adhérence le long de AB

$$F_{AB} = \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su}$$

$$F_B = F_A - \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su} = 25,12 - 3,14 \cdot 0,8 \cdot 14,5 \cdot 0,188 = 18,27 \text{ kn}$$

L'effort en C est déterminé par l'équation de l'ancrage courbe

$$F_C = F_B \cdot e^{-0,4\theta} - \pi \cdot \Phi \cdot r \cdot \tau_{su} [1 - e^{-0,4\theta}] / 0,4 = 18,27 \cdot 0,53 - 3,14 \cdot 0,8 \cdot 5,5 \cdot 0,188 \cdot 1,17 = 7,25 \text{ kn}$$

$$F_C = F_{CD}$$

$$F_T = F_{AB} + F_{CD} = 6,85 + 7,25 = 14,10 \text{ kn}$$

$$\sigma = F_T/A_S = 14,10 / (3,14 \cdot 0,8 \cdot 17,5) = 0,32 \text{ kn/cm}^2$$

c) Ancrage par courbure des barres ($\Phi 12/45^\circ$)

L'effort à reprendre sera donc de

$$F_A = [\pi \cdot \Phi^2 / 4] \cdot f_c = 3,14 \cdot 1,2^2 \cdot 50 / 4 = 56,52 \text{ kn}$$

L'effort en B sera plus faible du fait de l'adhérence le long de AB

$$F_{AB} = \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su}$$

$$F_B = F_A - \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su} = 56,52 - 3,14 \cdot 1,2 \cdot 14,5 \cdot 0,188 = 46,24 \text{ kn}$$

L'effort en C est déterminé par l'équation de l'ancrage courbe

$$F_C = F_B \cdot e^{-0,4\theta} - \pi \cdot \Phi \cdot r \cdot \tau_{su} [1 - e^{-0,4\theta}] / 0,4 = 46,24 \cdot 0,39 - 3,14 \cdot 1,2 \cdot 5,5 \cdot 1,2 \cdot 0,188 \cdot 1,53 = 10,88 \text{ kn}$$

$$F_C = F_{CD}$$

$$F_T = F_{AB} + F_{CD} = 10,27 + 10,88 = 21,15 \text{ kn}$$

$$\sigma = F_T/A_S = 21,15 / (3,14 \cdot 1,2 \cdot 17,5) = 0,32 \text{ kn/cm}^2$$

d) Ancrage par courbure des barres ($\Phi 12/90^\circ$)

L'effort à reprendre sera donc de

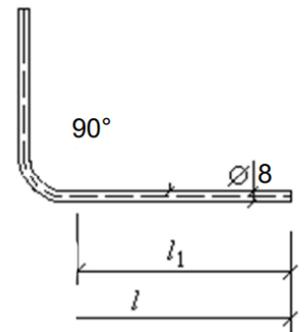


Figure II.7: Schéma d'ancrage 90°

$$F_A = [\pi \cdot \Phi^2 / 4] \cdot f_c = 3,14 \cdot 1,2^2 \cdot 50 / 4 = 56,52 \text{ kn}$$

L'effort en B sera plus faible du fait de l'adhérence le long de AB

$$F_{AB} = \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su}$$

$$F_B = F_A - \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su} = 56,52 - 3,14 \cdot 1,2 \cdot 14,5 \cdot 0,188 = 46,24 \text{ kn}$$

L'effort en C est déterminé par l'équation de l'ancrage courbe

$$F_C = F_B \cdot e^{-0,4\theta} - \pi \cdot \Phi \cdot r \cdot \tau_{su} [1 - e^{-0,4\theta}] / 0,4 = 46,24 \cdot 0,53 - 3,14 \cdot 1,2 \cdot 5,5 \cdot 1,2 \cdot 0,188 \cdot 1,17 = 19,04 \text{ kn}$$

$$F_C = F_{CD}$$

$$F_T = F_{AB} + F_{CD} = 10,27 + 19,04 = 29,31 \text{ kn}$$

$$\sigma = F_T / A_S = 29,31 / (3,14 \cdot 1,2 \cdot 17,5) = 0,44 \text{ kn/cm}^2$$

e) Ancrage par courbure des barres ($\Phi 14/45^\circ$)

L'effort à reprendre sera donc de

$$F_A = [\pi \cdot \Phi^2 / 4] \cdot f_c = 3,14 \cdot 1,4^2 \cdot 50 / 4 = 76,93 \text{ kn}$$

L'effort en B sera plus faible du fait de l'adhérence le long de AB

$$F_{AB} = \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su}$$

$$F_B = F_A - \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su} = 76,93 - 3,14 \cdot 1,4 \cdot 14,5 \cdot 0,188 = 64,94 \text{ kn}$$

L'effort en C est déterminé par l'équation de l'ancrage courbe

$$F_C = F_B \cdot e^{-0,4\theta} - \pi \cdot \Phi \cdot r \cdot \tau_{su} [1 - e^{-0,4\theta}] / 0,4 = 64,94 \cdot 0,39 - 3,14 \cdot 1,4 \cdot 5,5 \cdot 1,4 \cdot 0,188 \cdot 1,53 = 15,59 \text{ kn}$$

$$F_C = F_{CD}$$

$$F_T = F_{AB} + F_{CD} = 11,98 + 15,59 = 27,57 \text{ kn}$$

$$\sigma = F_T / A_S = 27,57 / (3,14 \cdot 1,4 \cdot 17,5) = 0,36 \text{ kn/cm}^2$$

f) Ancrage par courbure des barres ($\Phi 14/90^\circ$)

L'effort à reprendre sera donc de

$$F_A = [\pi \cdot \Phi^2 / 4] \cdot f_c = 3,14 \cdot 1,4^2 \cdot 50 / 4 = 76,93 \text{ kn}$$

L'effort en B sera plus faible du fait de l'adhérence le long de AB

$$F_{AB} = \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su}$$

$$F_B = F_A - \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su} = 76,93 - 3,14 \cdot 1,4 \cdot 14,5 \cdot 0,188 = 64,94 \text{ kn}$$

L'effort en C est déterminé par l'équation de l'ancrage courbe

$$F_C = F_B \cdot e^{-0,4\theta} - \pi \cdot \Phi \cdot r \cdot \tau_{su} [1 - e^{-0,4\theta}] / 0,4 = 64,94 \cdot 0,53 - 3,14 \cdot 1,4 \cdot 5,5 \cdot 1,2 \cdot 0,188 \cdot 1,17 = 26,97 \text{ kn}$$

$$F_C = F_{CD}$$

$$F_T = F_{AB} + F_{CD} = 11,98 + 26,97 = 38,95 \text{ kn}$$

$$\sigma = F_T/A_S = 38,95 / (3,14 \cdot 1,4 \cdot 17,5) = 0.50 \text{ kn/cm}^2$$

II.1.2) Age 2 : 14 jours

II.1.2.1) Calcul de la contrainte d'adhérence τ_s

$$f_{cj} = \frac{j}{4.76+0.83 j} f_{c28}$$

$$f_{cj} = \frac{14}{4.76+0.83 \times 14} 20 = 17,09$$

$$f_{tj} = 0,6+0,06 \times 21,37 = 1,63 \text{ MPa}$$

$$\tau_{su} = 0,6 \cdot 1,5^2 \cdot 1,63 = 2,20 \text{ MPa} = 0,220 \text{ kn/cm}^2$$

II.1.2.2) calcul de L'effort de traction

1) Ancrages rectilignes

calcul de L'effort de traction dans la barre en traction simple

On		$\Phi 8 \longrightarrow$	$L = 17,5 \text{ cm} \longrightarrow$	$F_{\max} = 0,22 \cdot 3,14 \cdot 0,8 \cdot 17,5 = 9,67 \text{ kn}$
		$\Phi 12 \longrightarrow$	$L = 17,5 \text{ cm} \longrightarrow$	$F_{\max} = 0,22 \cdot 3,14 \cdot 1,2 \cdot 17,5 = 14,50 \text{ kn}$
		$\Phi 14 \longrightarrow$	$L = 17,5 \text{ cm} \longrightarrow$	$F_{\max} = 0,22 \cdot 3,14 \cdot 1,4 \cdot 17,5 = 16,92 \text{ kn}$

2) Ancrage par courbure des barres tendues

a) Ancrage par courbure des barres ($\Phi 8/45^\circ$)

L'effort à reprendre sera donc de

$$F_A = [\pi \cdot \Phi^2 / 4] \cdot f_e = 3,14 \cdot 0,8^2 \cdot 50 / 4 = 25,12 \text{ kn}$$

L'effort en B sera plus faible du fait de l'adhérence le long de AB

$$F_{AB} = \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su}$$

$$F_B = F_A - \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su} = 25,12 - 3,14 \cdot 0,8 \cdot 14,5 \cdot 0,22 = 17,10 \text{ kn}$$

L'effort en C est déterminé par l'équation de l'ancrage courbe

$$F_C = F_B \cdot e^{-0,4\theta} - \pi \cdot \Phi \cdot r \cdot \tau_{su} [1 - e^{-0,4\theta}] / 0,4 = 17,10 \cdot 0,39 - 3,14 \cdot 0,8 \cdot 5,5 \cdot 0,8 \cdot 0,22 \cdot 1,53 = 2,94 \text{ kn}$$

$$F_C = F_{CD}$$

$$F_T = F_{AB} + F_{CD} = 8,01 + 2,94 = 10,95 \text{ kn}$$

$$\sigma = F_T/A_S = 10,95 / (3,14 \cdot 0,8 \cdot 17,5) = 0.24 \text{ kn/cm}^2$$

b) Ancrage par courbure des barres ($\Phi 8/90^\circ$)

L'effort à reprendre sera donc de

$$F_A = [\pi \cdot \Phi^2 / 4] \cdot f_e = 3,14 \cdot 0,8^2 \cdot 50 / 4 = 25,12 \text{ kn}$$

L'effort en B sera plus faible du fait de l'adhérence le long de AB

$$F_{AB} = \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su}$$

$$F_B = F_A - \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su} = 25,12 - 3,14 \cdot 0,8 \cdot 14,5 \cdot 0,22 = 17,10 \text{ kn}$$

L'effort en C est déterminé par l'équation de l'ancrage courbe

$$F_C = F_B \cdot e^{-0,4\theta} - \pi \cdot \Phi \cdot r \cdot \tau_{su} [1 - e^{-0,4\theta}] / 0,4 = 17,10 \cdot 0,53 - 3,14 \cdot 0,8 \cdot 5,5 \cdot 0,8 \cdot 0,22 \cdot 1,17 = 6,21 \text{ kn}$$

$$F_C = F_{CD}$$

$$F_T = F_{AB} + F_{CD} = 8,01 + 6,21 = 14,22 \text{ kn}$$

$$\sigma = F_T / A_s = 14,22 / (3,14 \cdot 0,8 \cdot 17,5) = 0,32 \text{ kn/cm}^2$$

c) Ancrage par courbure des barres ($\Phi 12/45^\circ$)

L'effort à reprendre sera donc de

$$F_A = [\pi \cdot \Phi^2 / 4] \cdot f_e = 3,14 \cdot 1,2^2 \cdot 50 / 4 = 56,52 \text{ kn}$$

L'effort en B sera plus faible du fait de l'adhérence le long de AB

$$F_{AB} = \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su}$$

$$F_B = F_A - \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su} = 56,52 - 3,14 \cdot 1,2 \cdot 14,5 \cdot 0,22 = 44,50 \text{ kn}$$

L'effort en C est déterminé par l'équation de l'ancrage courbe

$$F_C = F_B \cdot e^{-0,4\theta} - \pi \cdot \Phi \cdot r \cdot \tau_{su} [1 - e^{-0,4\theta}] / 0,4 = 44,50 \cdot 0,39 - 3,14 \cdot 1,2 \cdot 5,5 \cdot 1,2 \cdot 0,22 \cdot 1,53 = 8,98 \text{ kn}$$

$$F_C = F_{CD}$$

$$F_T = F_{AB} + F_{CD} = 12,02 + 8,98 = 21,00 \text{ kn}$$

$$\sigma = F_T / A_s = 21,00 / (3,14 \cdot 1,2 \cdot 17,5) = 0,32 \text{ kn/cm}^2$$

d) Ancrage par courbure des barres ($\Phi 12/90^\circ$)

L'effort à reprendre sera donc de

$$F_A = [\pi \cdot \Phi^2 / 4] \cdot f_e = 3,14 \cdot 1,2^2 \cdot 50 / 4 = 56,52 \text{ kn}$$

L'effort en B sera plus faible du fait de l'adhérence le long de AB

$$F_{AB} = \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su}$$

$$F_B = F_A - \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su} = 56,52 - 3,14 \cdot 1,2 \cdot 14,5 \cdot 0,22 = 44,50 \text{ kn}$$

L'effort en C est déterminé par l'équation de l'ancrage courbe

$$F_C = F_B \cdot e^{-0,4\theta} - \pi \cdot \Phi \cdot r \cdot \tau_{su} [1 - e^{-0,4\theta}] / 0,4 = 44,50 \cdot 0,53 - 3,14 \cdot 1,2 \cdot 5,5 \cdot 1,2 \cdot 0,22 \cdot 0,39 = 17,18 \text{ kn}$$

$$F_C = F_{CD}$$

$$F_T = F_{AB} + F_{CD} = 12,02 + 17,18 = 29,20 \text{ kn}$$

$$\sigma = F_T / A_S = 29,20 / (3,14 \cdot 1,2 \cdot 17,5) = 0,44 \text{ kn/cm}^2$$

e) Ancrage par courbure des barres ($\Phi 14/45^\circ$)

L'effort à reprendre sera donc de

$$F_A = [\pi \cdot \Phi^2 / 4] \cdot f_e = 3,14 \cdot 1,4^2 \cdot 50 / 4 = 76,93 \text{ kn}$$

L'effort en B sera plus faible du fait de l'adhérence le long de AB

$$F_{AB} = \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su}$$

$$F_B = F_A - \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su} = 76,93 - 3,14 \cdot 1,4 \cdot 14,5 \cdot 0,22 = 62,90 \text{ kn}$$

L'effort en C est déterminé par l'équation de l'ancrage courbe

$$F_C = F_B \cdot e^{-0,4\theta} - \pi \cdot \Phi \cdot r \cdot \tau_{su} [1 - e^{-0,4\theta}] / 0,4 = 62,90 \cdot 0,39 - 3,14 \cdot 1,4 \cdot 5,5 \cdot 1,4 \cdot 0,22 \cdot 1,53 = 13,13 \text{ kn}$$

$$F_C = F_{CD}$$

$$F_T = F_{AB} + F_{CD} = 14,02 + 13,13 = 27,15 \text{ kn}$$

$$\sigma = F_T / A_S = 27,15 / (3,14 \cdot 1,4 \cdot 17,5) = 0,35 \text{ kn/cm}^2$$

f) Ancrage par courbure des barres ($\Phi 14/90^\circ$)

L'effort à reprendre sera donc de

$$F_A = [\pi \cdot \Phi^2 / 4] \cdot f_e = 3,14 \cdot 1,4^2 \cdot 50 / 4 = 76,93 \text{ kn}$$

L'effort en B sera plus faible du fait de l'adhérence le long de AB

$$F_{AB} = \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su}$$

$$F_B = F_A - \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su} = 76,93 - 3,14 \cdot 1,4 \cdot 14,5 \cdot 0,22 = 62,90 \text{ kn}$$

L'effort en C est déterminé par l'équation de l'ancrage courbe

$$F_C = F_B \cdot e^{-0,4\theta} - \pi \cdot \Phi \cdot r \cdot \tau_{su} [1 - e^{-0,4\theta}] / 0,4 = 62,90 \cdot 0,53 - 3,14 \cdot 1,4 \cdot 5,5 \cdot 1,4 \cdot 0,22 \cdot 1,17 = 26,93 \text{ kn}$$

$$F_C = F_{CD}$$

$$F_T = F_{AB} + F_{CD} = 14,02 + 26,93 = 40,95 \text{ kn}$$

$$\sigma = F_T / A_S = 40,95 / (3,14 \cdot 1,4 \cdot 17,5) = 0,53 \text{ kn/cm}^2$$

II.1.3) Age 3 : 28 jours

II.1.3.1) Calcul de la contrainte d'adhérence τ

$$f_{c28} = 20 \text{ Mpa}$$

$$f_{ij} = 0,6 + 0,06 \times 25 = 1,8 \text{ MPa}$$

$$\tau_{su} = 0,6 \cdot 1,5^2 \cdot 2,1 = 2,43 \text{ MPa} = 0,243 \text{ kn/cm}^2$$

II.1.3.2) calcul de L'effort de traction**1) Ancrages rectilignes**

calcul de L'effort de traction dans la barre en traction simple

$$\begin{array}{l} \text{On a } \left\{ \begin{array}{l} \Phi 8 \longrightarrow L = 17,5 \text{ cm} \longrightarrow F_{\max} = 0,243 \cdot 3,14 \cdot 0,8 \cdot 17,5 = 10,68 \text{ kn} \\ \Phi 12 \longrightarrow L = 17,5 \text{ cm} \longrightarrow F_{\max} = 0,243 \cdot 3,14 \cdot 1,2 \cdot 17,5 = 16,02 \text{ kn} \\ \Phi 14 \longrightarrow L = 17,5 \text{ cm} \longrightarrow F_{\max} = 0,243 \cdot 3,14 \cdot 1,4 \cdot 17,5 = 18,69 \text{ kn} \end{array} \right. \end{array}$$

2) Ancrage par courbure des barres tendues**a) Ancrage par courbure des barres ($\Phi 8/45^\circ$)**

L'effort à reprendre sera donc de

$$F_A = [\pi \cdot \Phi^2 / 4] \cdot f_c = 3,14 \cdot 0,8^2 \cdot 50 / 4 = 25,12 \text{ kn}$$

L'effort en B sera plus faible du fait de l'adhérence le long de AB

$$F_{AB} = \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su}$$

$$F_B = F_A - \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su} = 25,12 - 3,14 \cdot 0,8 \cdot 14,5 \cdot 0,243 = 16,27 \text{ kn}$$

L'effort en C est déterminé par l'équation de l'ancrage courbe

$$F_C = F_B \cdot e^{-0,4\theta} - \pi \cdot \Phi \cdot r \cdot \tau_{su} [1 - e^{-0,4\theta}] / 0,4 = 16,27 \cdot 0,39 - 3,14 \cdot 0,8 \cdot 5,5 \cdot 0,8 \cdot 0,243 \cdot 1,53 = 2,24 \text{ kn}$$

$$F_C = F_{CD}$$

$$F_T = F_{AB} + F_{CD} = 8,85 + 2,24 = 11,09 \text{ kn}$$

$$\sigma = F_T / A_S = 11,09 / (3,14 \cdot 0,8 \cdot 17,5) = 0,25 \text{ kn/cm}^2$$

b) Ancrage par courbure des barres ($\Phi 8/90^\circ$)

L'effort à reprendre sera donc de

$$F_A = [\pi \cdot \Phi^2 / 4] \cdot f_c = 3,14 \cdot 0,8^2 \cdot 50 / 4 = 25,12 \text{ kn}$$

L'effort en B sera plus faible du fait de l'adhérence le long de AB

$$F_{AB} = \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su}$$

$$F_B = F_A - \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su} = 25,12 - 3,14 \cdot 0,8 \cdot 14,5 \cdot 0,243 = 16,27 \text{ kn}$$

L'effort en C est déterminé par l'équation de l'ancrage courbe

$$F_C = F_B \cdot e^{-0,4\theta} - \pi \cdot \Phi \cdot r \cdot \tau_{su} [1 - e^{-0,4\theta}] / 0,4 = 16,27 \cdot 0,53 - 3,14 \cdot 0,8 \cdot 5,5 \cdot 0,8 \cdot 0,243 \cdot 0,39 = 5,48 \text{ kn}$$

$$F_C = F_{CD}$$

$$F_T = F_{AB} + F_{CD} = 8,85 + 5,48 = 14,33 \text{ kn}$$

$$\sigma = F_T / A_S = 14,33 / (3,14 \cdot 0,8 \cdot 17,5) = 0,32 \text{ kn/cm}^2$$

c) Ancrage par courbure des barres ($\Phi 12/45^\circ$)

L'effort à reprendre sera donc de

$$F_A = [\pi \cdot \Phi^2 / 4] \cdot f_e = 3,14 \cdot 1,2^2 \cdot 50 / 4 = 56,52 \text{ kn}$$

L'effort en B sera plus faible du fait de l'adhérence le long de AB

$$F_{AB} = \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su}$$

$$F_B = F_A - \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su} = 56,52 - 3,14 \cdot 1,2 \cdot 14,5 \cdot 0,243 = 43,24 \text{ kn}$$

L'effort en C est déterminé par l'équation de l'ancrage courbe

$$F_C = F_B \cdot e^{-0,4\theta} - \pi \cdot \Phi \cdot r \cdot \tau_{su} [1 - e^{-0,4\theta}] / 0,4 = 43,24 \cdot 0,39 - 3,14 \cdot 1,2 \cdot 5,5 \cdot 1,2 \cdot 0,243 \cdot 1,53 = 7,62 \text{ kn}$$

$$F_C = F_{CD}$$

$$F_T = F_{AB} + F_{CD} = 13,28 + 7,62 = 20,9 \text{ kn}$$

$$\sigma = F_T / A_S = 20,9 / (3,14 \cdot 1,2 \cdot 17,5) = 0,32 \text{ kn/cm}^2$$

d) Ancrage par courbure des barres ($\Phi 12/90^\circ$)

L'effort à reprendre sera donc de

$$F_A = [\pi \cdot \Phi^2 / 4] \cdot f_e = 3,14 \cdot 1,2^2 \cdot 50 / 4 = 56,52 \text{ kn}$$

L'effort en B sera plus faible du fait de l'adhérence le long de AB

$$F_{AB} = \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su}$$

$$F_B = F_A - \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su} = 56,52 - 3,14 \cdot 1,2 \cdot 14,5 \cdot 0,243 = 43,24 \text{ kn}$$

L'effort en C est déterminé par l'équation de l'ancrage courbe

$$F_C = F_B \cdot e^{-0,4\theta} - \pi \cdot \Phi \cdot r \cdot \tau_{su} [1 - e^{-0,4\theta}] / 0,4 = 43,24 \cdot 0,53 - 3,14 \cdot 1,2 \cdot 5,5 \cdot 1,2 \cdot 0,243 \cdot 1,17 = 15,84 \text{ kn}$$

$$F_C = F_{CD}$$

$$F_T = F_{AB} + F_{CD} = 13,28 + 15,84 = 29,12 \text{ kn}$$

$$\sigma = F_T / A_S = 29,12 / (3,14 \cdot 1,2 \cdot 17,5) = 0,44 \text{ kn/cm}^2$$

e) Ancrage par courbure des barres ($\Phi 14/45^\circ$)

L'effort à reprendre sera donc de

$$F_A = [\pi \cdot \Phi^2 / 4] \cdot f_e = 3,14 \cdot 1,4^2 \cdot 50 / 4 = 76,93 \text{ kn}$$

L'effort en B sera plus faible du fait de l'adhérence le long de AB

$$F_{AB} = \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su}$$

$$F_B = F_A - \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su} = 76,93 - 3,14 \cdot 1,4 \cdot 14,5 \cdot 0,243 = 61,44 \text{ kn}$$

L'effort en C est déterminé par l'équation de l'ancrage courbe

$$F_C = F_B \cdot e^{-0,4\theta} - \pi \cdot \Phi \cdot r \cdot \tau_{su} [1 - e^{-0,4\theta}] / 0,4 = 61,44 \cdot 0,39 - 3,14 \cdot 1,4 \cdot 5,5 \cdot 1,4 \cdot 0,243 \cdot 1,53 = 13,17 \text{ kn}$$

$$F_C = F_{CD}$$

$$F_T = F_{AB} + F_{CD} = 15,50 + 13,17 = 28,67 \text{ kn}$$

$$\sigma = F_T / A_s = 28,67 / (3,14 \cdot 1,4 \cdot 17,5) = 0,37 \text{ kn/cm}^2$$

f) Ancrage par courbure des barres ($\Phi 14/90^\circ$)

L'effort à reprendre sera donc de

$$F_A = [\pi \cdot \Phi^2 / 4] \cdot f_e = 3,14 \cdot 1,4^2 \cdot 50 / 4 = 76,93 \text{ kn}$$

L'effort en B sera plus faible du fait de l'adhérence le long de AB

$$F_{AB} = \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su}$$

$$F_B = F_A - \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su} = 76,93 - 3,14 \cdot 1,4 \cdot 14,5 \cdot 0,267 = 61,44 \text{ kn}$$

L'effort en C est déterminé par l'équation de l'ancrage courbe

$$F_C = F_B \cdot e^{-0,4\theta} - \pi \cdot \Phi \cdot r \cdot \tau_{su} [1 - e^{-0,4\theta}] / 0,4 = 61,44 \cdot 0,53 - 3,14 \cdot 1,4 \cdot 5,5 \cdot 1,4 \cdot 0,243 \cdot 1,17 = 22,94 \text{ kn}$$

$$F_C = F_{CD}$$

$$F_T = F_{AB} + F_{CD} = 15,50 + 22,94 = 38,44 \text{ kn}$$

$$\sigma = F_T / A_s = 38,44 / (3,14 \cdot 1,4 \cdot 17,5) = 0,49 \text{ kn/cm}^2$$

II.2) Calcul des efforts de traction (dosage 350 kg/m³)

II.2.1) Age 1 : 7 jours

II.2.1.1) Calcul de la contrainte d'adhérence τ_s

$$f_{cj} = \frac{j}{4,76 + 0,83 j} f_{c28}$$

$$f_{cj} = \frac{7}{4,76 + 0,83 \cdot 7} 25 = 16,56$$

$$f_{ij} = 0,6 + 0,06 \cdot 16,56 = 1,59 \text{ MPa}$$

$$\tau_{su} = 0,6.1,5^2 . 1,59 = 2,15 \text{ MPa} = 0,215 \text{ kn/cm}^2$$

II.2.1.2) calcul de L'effort de traction

1) ancrages rectilignes

calcul de L'effort de traction dans la barre en traction simple

La contrainte maximale de l'adhérence acier-béton τ_{\max} est calculée en considérant une contrainte de cisaillement homogène sur la longueur d'ancrage avec: $\tau_{\max} = F_{\max} / \Pi d l$

Où F_{\max} est la force maximale, d le diamètre de la barre et L la longueur d'ancrage.

Soit $F_{\max} = \tau_{su} . \Pi . d . l$

Donc

$$\begin{array}{l} \text{On a } \Phi 8 \longrightarrow L = 17,5 \text{ cm} \longrightarrow F_{\max} = 0,215 . 3,14 . 0,8 . 17,5 = 9,482 \text{ kn } \sigma = 0,21 \text{ kn/cm}^2 \\ \Phi 12 \longrightarrow L = 17,5 \text{ cm} \longrightarrow F_{\max} = 0,215 . 3,14 . 1,2 . 17,5 = 14,222 \text{ kn } \sigma = 0,32 \text{ kn/cm}^2 \\ \Phi 14 \longrightarrow L = 17,5 \text{ cm} \longrightarrow F_{\max} = 0,215 . 3,14 . 1,4 . 17,5 = 16,593 \text{ kn } \sigma = 0,37 \text{ kn/cm}^2 \end{array}$$

2) Ancrage par courbure des barres tendues (BAEL/CBA93, A.6.1.25)

a) Ancrage par courbure des barres ($\Phi 8/45^\circ$)

L'effort à reprendre sera donc de

$$F_A = [\pi . \Phi^2 / 4] . f_e = 3,14 . 0,8^2 . 50 / 4 = 25,12 \text{ kn}$$

L'effort en B sera plus faible du fait de l'adhérence le long de AB

$$F_{AB} = \pi . \Phi . L_{AB} . \tau_{su}$$

$$F_B = F_A - \pi . \Phi . L_{AB} . \tau_{su} = 25 - 3,14 . 0,8 . 14,5 . 0,215 = 17,17 \text{ kn}$$

L'effort en C est déterminé par l'équation de l'ancrage courbe

$$F_C = F_B . e^{-0,4\theta} - \pi . \Phi . r . \tau_{su} [1 - e^{-0,4\theta}] / 0,4 = 17,17 . 0,39 - 3,14 . 0,8 . 5,5 . 0,8 . 0,215 . 1,53 = 3,06 \text{ kn}$$

$$F_C = F_{CD}$$

$$F_T = F_{AB} + F_{CD} = 7,83 + 3,06 = 10,89 \text{ kn}$$

$$\sigma = F_T / A_S = 10,89 / (3,14 . 0,8 . 17,5) = 0,24 \text{ kn/cm}^2$$

b) Ancrage par courbure des barres ($\Phi 8/90^\circ$)

L'effort à reprendre sera donc de

$$F_A = [\pi . \Phi^2 / 4] . f_e = 3,14 . 0,8^2 . 50 / 4 = 25,12 \text{ kn}$$

L'effort en B sera plus faible du fait de l'adhérence le long de AB

$$F_{AB} = \pi . \Phi . L_{AB} . \tau_{su}$$

$$F_B = F_A - \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su} = 25 - 3,14 \cdot 0,8 \cdot 14,5 \cdot 0,215 = 17,17 \text{ kn}$$

L'effort en C est déterminé par l'équation de l'ancrage courbe

$$F_C = F_B \cdot e^{-0,4\theta} - \pi \cdot \Phi \cdot r \cdot \tau_{su} [1 - e^{-0,4\theta}] / 0,4 = 17,17 \cdot 0,53 - 3,14 \cdot 0,8 \cdot 5,5 \cdot 0,8 \cdot 0,215 \cdot 1,17 = 6,31 \text{ kn}$$

$$F_C = F_{CD}$$

$$F_T = F_{AB} + F_{CD} = 7,83 + 6,31 = 14,14 \text{ kn}$$

$$\sigma = F_T / A_S = 14,14 / (3,14 \cdot 0,8 \cdot 17,5) = 0,32 \text{ kn/cm}^2$$

c) Ancrage par courbure des barres ($\Phi 12/45^\circ$)

L'effort à reprendre sera donc de

$$F_A = [\pi \cdot \Phi^2 / 4] \cdot f_c = 3,14 \cdot 1,2^2 \cdot 50 / 4 = 56,52 \text{ kn}$$

L'effort en B sera plus faible du fait de l'adhérence le long de AB

$$F_{AB} = \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su}$$

$$F_B = F_A - \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su} = 56,52 - 3,14 \cdot 1,2 \cdot 14,5 \cdot 0,215 = 44,77 \text{ kn}$$

L'effort en C est déterminé par l'équation de l'ancrage courbe

$$F_C = F_B \cdot e^{-0,4\theta} - \pi \cdot \Phi \cdot r \cdot \tau_{su} [1 - e^{-0,4\theta}] / 0,4 = 44,77 \cdot 0,39 - 3,14 \cdot 1,2 \cdot 5,5 \cdot 1,2 \cdot 0,215 \cdot 1,53 = 10,80 \text{ kn}$$

$$F_C = F_{CD}$$

$$F_T = F_{AB} + F_{CD} = 11,74 + 10,80 = 22,54 \text{ kn}$$

$$\sigma = F_T / A_S = 22,54 / (3,14 \cdot 1,2 \cdot 17,5) = 0,34 \text{ kn/cm}^2$$

d) Ancrage par courbure des barres ($\Phi 12/90^\circ$)

L'effort à reprendre sera donc de

$$F_A = [\pi \cdot \Phi^2 / 4] \cdot f_c = 3,14 \cdot 1,2^2 \cdot 50 / 4 = 56,52 \text{ kn}$$

L'effort en B sera plus faible du fait de l'adhérence le long de AB

$$F_{AB} = \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su}$$

$$F_B = F_A - \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su} = 56,52 - 3,14 \cdot 1,2 \cdot 14,5 \cdot 0,215 = 44,77 \text{ kn}$$

L'effort en C est déterminé par l'équation de l'ancrage courbe

$$F_C = F_B \cdot e^{-0,4\theta} - \pi \cdot \Phi \cdot r \cdot \tau_{su} [1 - e^{-0,4\theta}] / 0,4 = 44,77 \cdot 0,53 - 3,14 \cdot 1,2 \cdot 5,5 \cdot 1,2 \cdot 0,215 \cdot 0,39 = 17,47 \text{ kn}$$

$$F_C = F_{CD}$$

$$F_T = F_{AB} + F_{CD} = 11,74 + 17,47 = 29,21 \text{ kn}$$

$$\sigma = F_T / A_S = 29,21 / (3,14 \cdot 1,2 \cdot 17,5) = 0,44 \text{ kn/cm}^2$$

e) Ancrage par courbure des barres ($\Phi 14/45^\circ$)

L'effort à reprendre sera donc de

$$F_A = [\pi \cdot \Phi^2 / 4] \cdot f_c = 3,14 \cdot 1,4^2 \cdot 50 / 4 = 76,93 \text{ kn}$$

L'effort en B sera plus faible du fait de l'adhérence le long de AB

$$F_{AB} = \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su}$$

$$F_B = F_A - \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su} = 76,93 - 3,14 \cdot 1,4 \cdot 14,5 \cdot 0,215 = 63,22 \text{ kn}$$

L'effort en C est déterminé par l'équation de l'ancrage courbe

$$F_C = F_B \cdot e^{-0,4\theta} - \pi \cdot \Phi \cdot r \cdot \tau_{su} [1 - e^{-0,4\theta}] / 0,4 = 63,22 \cdot 0,39 - 3,14 \cdot 1,4 \cdot 5,5 \cdot 1,4 \cdot 0,215 \cdot 1,53 = 13,52 \text{ kn}$$

$$F_C = F_{CD}$$

$$F_T = F_{AB} + F_{CD} = 13,70 + 13,52 = 27,22 \text{ kn}$$

$$\sigma = F_T / A_s = 27,22 / (3,14 \cdot 1,4 \cdot 17,5) = 0,35 \text{ kn/cm}^2$$

f) Ancrage par courbure des barres ($\Phi 14/90^\circ$)

L'effort à reprendre sera donc de

$$F_A = [\pi \cdot \Phi^2 / 4] \cdot f_c = 3,14 \cdot 1,4^2 \cdot 50 / 4 = 76,93 \text{ kn}$$

L'effort en B sera plus faible du fait de l'adhérence le long de AB

$$F_{AB} = \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su}$$

$$F_B = F_A - \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su} = 76,93 - 3,14 \cdot 1,4 \cdot 14,5 \cdot 0,215 = 63,22 \text{ kn}$$

L'effort en C est déterminé par l'équation de l'ancrage courbe

$$F_C = F_B \cdot e^{-0,4\theta} - \pi \cdot \Phi \cdot r \cdot \tau_{su} [1 - e^{-0,4\theta}] / 0,4 = 63,22 \cdot 0,53 - 3,14 \cdot 1,4 \cdot 5,5 \cdot 1,4 \cdot 0,215 \cdot 1,17 = 24,99 \text{ kn}$$

$$F_C = F_{CD}$$

$$F_T = F_{AB} + F_{CD} = 13,70 + 24,99 = 38,69 \text{ kn}$$

$$\sigma = F_T / A_s = 38,69 / (3,14 \cdot 1,4 \cdot 17,5) = 0,50 \text{ kn/cm}^2$$

II.2.2) Age 2 : 14 jours**II.2.2.1) Calcul de la contrainte d'adhérence τ_s**

$$f_{cj} = \frac{j}{4,76 + 0,83 j} f_{c28}$$

$$f_{cj} = \frac{14}{4,76 + 0,83 \times 14} 25 = 21,37$$

$$f_{tj} = 0,6 + 0,06 \times 21,37 = 1,88 \text{ MPa}$$

$$\tau_{su} = 0,6 \cdot 1,5^2 \cdot 1,88 = 2,54 \text{ MPa} = 0,254 \text{ kn/cm}^2$$

II.2.2.2) calcul de L'effort de traction

1) Ancrages rectilignes

calcul de L'effort de traction dans la barre en traction simple

$$\begin{array}{l} \text{On a } \left\{ \begin{array}{l} \Phi 8 \longrightarrow L = 17,5 \text{ cm} \longrightarrow F_{\max} = 0,254 \cdot 3,14 \cdot 0,8 \cdot 17,5 = 11,165 \\ \Phi 12 \longrightarrow L = 17,5 \text{ cm} \longrightarrow F_{\max} = 0,254 \cdot 3,14 \cdot 1,2 \cdot 17,5 = 16,749 \\ \Phi 14 \longrightarrow L = 17,5 \text{ cm} \longrightarrow F_{\max} = 0,254 \cdot 3,14 \cdot 1,4 \cdot 17,5 = 19,540 \end{array} \right. \end{array}$$

2) Ancrage par courbure des barres tendues

a) Ancrage par courbure des barres ($\Phi 8/45^\circ$)

L'effort à reprendre sera donc de

$$F_A = [\pi \cdot \Phi^2 / 4] \cdot f_e = 3,14 \cdot 0,8^2 \cdot 50 / 4 = 25,12 \text{ kn}$$

L'effort en B sera plus faible du fait de l'adhérence le long de AB

$$F_{AB} = \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su}$$

$$F_B = F_A - \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su} = 25 - 3,14 \cdot 0,8 \cdot 14,5 \cdot 0,254 = 15,74 \text{ kn}$$

L'effort en C est déterminé par l'équation de l'ancrage courbe

$$F_C = F_B \cdot e^{-0,4\theta} - \pi \cdot \Phi \cdot r \cdot \tau_{su} [1 - e^{-0,4\theta}] / 0,4 = 15,74 \cdot 0,39 - 3,14 \cdot 0,8 \cdot 5,5 \cdot 0,8 \cdot 0,254 \cdot 1,53 = 1,84 \text{ kn}$$

$$F_C = F_{CD}$$

$$F_T = F_{AB} + F_{CD} = 9,25 + 1,84 = 11,09 \text{ kn}$$

$$\sigma = F_T / A_s = 11,09 / (3,14 \cdot 0,8 \cdot 17,5) = 0,25 \text{ kn/cm}^2$$

b) Ancrage par courbure des barres ($\Phi 8/90^\circ$)

L'effort à reprendre sera donc de

$$F_A = [\pi \cdot \Phi^2 / 4] \cdot f_e = 3,14 \cdot 0,8^2 \cdot 50 / 4 = 25,12 \text{ kn}$$

L'effort en B sera plus faible du fait de l'adhérence le long de AB

$$F_{AB} = \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su}$$

$$F_B = F_A - \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su} = 25 - 3,14 \cdot 0,8 \cdot 14,5 \cdot 0,254 = 15,74 \text{ kn}$$

L'effort en C est déterminé par l'équation de l'ancrage courbe

$$F_C = F_B \cdot e^{-0,4\theta} - \pi \cdot \Phi \cdot r \cdot \tau_{su} [1 - e^{-0,4\theta}] / 0,4 = 15,74 \cdot 0,53 - 3,14 \cdot 0,8 \cdot 5,5 \cdot 0,8 \cdot 0,254 \cdot 1,17 = 5,05 \text{ kn}$$

$$F_C = F_{CD}$$

$$F_T = F_{AB} + F_{CD} = 9,25 + 5,05 = 14,60 \text{ kn}$$

$$\sigma = F_T/A_S = 14,60 / (3,14 \cdot 0,8 \cdot 17,5) = 0,33 \text{ kn/cm}^2$$

c) Ancrage par courbure des barres ($\Phi 12/45^\circ$)

L'effort à reprendre sera donc de

$$F_A = [\pi \cdot \Phi^2 / 4] \cdot f_c = 3,14 \cdot 1,2^2 \cdot 50 / 4 = 56,52 \text{ kn}$$

L'effort en B sera plus faible du fait de l'adhérence le long de AB

$$F_{AB} = \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su}$$

$$F_B = F_A - \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su} = 56,52 - 3,14 \cdot 1,2 \cdot 14,5 \cdot 0,254 = 42,64 \text{ kn}$$

L'effort en C est déterminé par l'équation de l'ancrage courbe

$$F_C = F_B \cdot e^{-0,4\theta} - \pi \cdot \Phi \cdot r \cdot \tau_{su} [1 - e^{-0,4\theta}] / 0,4 = 42,64 \cdot 0,39 - 3,14 \cdot 1,2 \cdot 5,5 \cdot 1,2 \cdot 0,254 \cdot 1,53 = 8,45 \text{ kn}$$

$$F_C = F_{CD}$$

$$F_T = F_{AB} + F_{CD} = 13,88 + 8,45 = 22,33 \text{ kn}$$

$$\sigma = F_T/A_S = 22,33 / (3,14 \cdot 1,2 \cdot 17,5) = 0,33 \text{ kn/cm}^2$$

d) Ancrage par courbure des barres ($\Phi 12/90^\circ$)

L'effort à reprendre sera donc de

$$F_A = [\pi \cdot \Phi^2 / 4] \cdot f_c = 3,14 \cdot 1,2^2 \cdot 50 / 4 = 56,52 \text{ kn}$$

L'effort en B sera plus faible du fait de l'adhérence le long de AB

$$F_{AB} = \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su}$$

$$F_B = F_A - \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su} = 56,52 - 3,14 \cdot 1,2 \cdot 14,5 \cdot 0,254 = 42,64 \text{ kn}$$

L'effort en C est déterminé par l'équation de l'ancrage courbe

$$F_C = F_B \cdot e^{-0,4\theta} - \pi \cdot \Phi \cdot r \cdot \tau_{su} [1 - e^{-0,4\theta}] / 0,4 = 42,64 \cdot 0,53 - 3,14 \cdot 1,2 \cdot 5,5 \cdot 1,2 \cdot 0,254 \cdot 1,17 = 15,20 \text{ kn}$$

$$F_C = F_{CD}$$

$$F_T = F_{AB} + F_{CD} = 13,88 + 15,20 = 29,08 \text{ kn}$$

$$\sigma = F_T/A_S = 29,08 / (3,14 \cdot 1,2 \cdot 17,5) = 0,44 \text{ kn/cm}^2$$

e) Ancrage par courbure des barres ($\Phi 14/45^\circ$)

L'effort à reprendre sera donc de

$$F_A = [\pi \cdot \Phi^2 / 4] \cdot f_c = 3,14 \cdot 1,4^2 \cdot 50 / 4 = 76,93 \text{ kn}$$

L'effort en B sera plus faible du fait de l'adhérence le long de AB

$$F_{AB} = \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su}$$

$$F_B = F_A - \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su} = 76,93 - 3,14 \cdot 1,4 \cdot 14,5 \cdot 0,254 = 60,74 \text{ kn}$$

L'effort en C est déterminé par l'équation de l'ancrage courbe

$$F_C = F_B \cdot e^{-0,4\theta} - \pi \cdot \Phi \cdot r \cdot \tau_{su} [1 - e^{-0,4\theta}] / 0,4 = 60,74 \cdot 0,39 - 3,14 \cdot 1,4 \cdot 5,5 \cdot 1,4 \cdot 0,254 \cdot 1,53 = 10,53 \text{ kn}$$

$$F_C = F_{CD}$$

$$F_T = F_{AB} + F_{CD} = 16,19 + 10,53 = 26,72 \text{ kn}$$

$$\sigma = F_T / A_S = 26,72 / (3,14 \cdot 1,4 \cdot 17,5) = 0,34 \text{ kn/cm}^2$$

f) Ancrage par courbure des barres ($\Phi 14/90^\circ$)

L'effort à reprendre sera donc de

$$F_A = [\pi \cdot \Phi^2 / 4] \cdot f_c = 3,14 \cdot 1,4^2 \cdot 50 / 4 = 76,93 \text{ kn}$$

L'effort en B sera plus faible du fait de l'adhérence le long de AB

$$F_{AB} = \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su}$$

$$F_B = F_A - \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su} = 76,93 - 3,14 \cdot 1,4 \cdot 14,5 \cdot 0,254 = 60,74 \text{ kn}$$

L'effort en C est déterminé par l'équation de l'ancrage courbe

$$F_C = F_B \cdot e^{-0,4\theta} - \pi \cdot \Phi \cdot r \cdot \tau_{su} [1 - e^{-0,4\theta}] / 0,4 = 60,74 \cdot 0,53 - 3,14 \cdot 1,4 \cdot 5,5 \cdot 1,4 \cdot 0,254 \cdot 1,17 = 23,67 \text{ kn}$$

$$F_C = F_{CD}$$

$$F_T = F_{AB} + F_{CD} = 16,19 + 23,67 = 39,86 \text{ kn}$$

$$\sigma = F_T / A_S = 39,86 / (3,14 \cdot 1,4 \cdot 17,5) = 0,51 \text{ kn/cm}^2$$

II.2.3) Age 3 : 28 jours

II.2.3.1) Calcul de la contrainte d'adhérence τ_s

$$f_{c28} = 25 \text{ Mpa}$$

$$f_{ij} = 0,6 + 0,06 \times 25 = 2,1 \text{ MPa}$$

$$\tau_{su} = 0,6 \cdot 1,5^2 \cdot 2,1 = 2,84 \text{ MPa} = 0,284 \text{ kn/cm}^2$$

II.2.3.2) calcul de L'effort de traction

1) Ancrages rectilignes

Calcul de L'effort de traction dans la barre en traction simple

On a	$\Phi 8 \longrightarrow L = 17,5 \text{ cm} \longrightarrow F_{\max} = 0,284 \cdot 3,14 \cdot 0,8 \cdot 17,5 = 12,485 \text{ kn}$
	$\Phi 12 \longrightarrow L = 17,5 \text{ cm} \longrightarrow F_{\max} = 0,284 \cdot 3,14 \cdot 1,2 \cdot 17,5 = 18,727 \text{ kn}$

$$\Phi 14 \longrightarrow L = 17,5 \text{ cm} \longrightarrow F_{\max} = 0,284 \cdot 3,14 \cdot 1,4 \cdot 17,5 = 21,848 \text{ kn}$$

2) Ancrage par courbure des barres tendues

a) Ancrage par courbure des barres ($\Phi 8/45^\circ$)

L'effort à reprendre sera donc de

$$F_A = [\pi \cdot \Phi^2 / 4] \cdot f_c = 3,14 \cdot 0,8^2 \cdot 50 / 4 = 25,12 \text{ kn}$$

L'effort en B sera plus faible du fait de l'adhérence le long de AB

$$F_{AB} = \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su}$$

$$F_B = F_A - \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su} = 25 - 3,14 \cdot 0,8 \cdot 14,5 \cdot 0,284 = 14,66 \text{ kn}$$

L'effort en C est déterminé par l'équation de l'ancrage courbe

$$F_C = F_B \cdot e^{-0,4\theta} - \pi \cdot \Phi \cdot r \cdot \tau_{su} [1 - e^{-0,4\theta}] / 0,4 = 15,27 \cdot 0,39 - 3,14 \cdot 0,8 \cdot 5,5 \cdot 0,8 \cdot 0,284 \cdot 1,53 = 0,92 \text{ kn}$$

$$F_C = F_{CD}$$

$$F_T = F_{AB} + F_{CD} = 10,34 + 0,92 = 11,26 \text{ kn}$$

$$\sigma = F_T / A_S = 11,26 / (3,14 \cdot 0,8 \cdot 17,5) = 0,26 \text{ kn/cm}^2$$

b) Ancrage par courbure des barres ($\Phi 8/90^\circ$)

L'effort à reprendre sera donc de

$$F_A = [\pi \cdot \Phi^2 / 4] \cdot f_c = 3,14 \cdot 0,8^2 \cdot 50 / 4 = 25,12 \text{ kn}$$

L'effort en B sera plus faible du fait de l'adhérence le long de AB

$$F_{AB} = \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su}$$

$$F_B = F_A - \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su} = 25 - 3,14 \cdot 0,8 \cdot 14,5 \cdot 0,284 = 14,66 \text{ kn}$$

L'effort en C est déterminé par l'équation de l'ancrage courbe

$$F_C = F_B \cdot e^{-0,4\theta} - \pi \cdot \Phi \cdot r \cdot \tau_{su} [1 - e^{-0,4\theta}] / 0,4 = 15,27 \cdot 0,53 - 3,14 \cdot 0,8 \cdot 5,5 \cdot 0,8 \cdot 0,284 \cdot 1,17 = 4,42 \text{ kn}$$

$$F_C = F_{CD}$$

$$F_T = F_{AB} + F_{CD} = 10,34 + 4,42 = 14,76 \text{ kn}$$

$$\sigma = F_T / A_S = 14,76 / (3,14 \cdot 0,8 \cdot 17,5) = 0,33 \text{ kn/cm}^2$$

c) Ancrage par courbure des barres ($\Phi 12/45^\circ$)

L'effort à reprendre sera donc de

$$F_A = [\pi \cdot \Phi^2 / 4] \cdot f_c = 3,14 \cdot 1,2^2 \cdot 50 / 4 = 56,52 \text{ kn}$$

L'effort en B sera plus faible du fait de l'adhérence le long de AB

$$F_{AB} = \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su}$$

$$F_B = F_A - \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su} = 56,52 - 3,14 \cdot 1,2 \cdot 14,5 \cdot 0,284 = 41,00 \text{ kn}$$

L'effort en C est déterminé par l'équation de l'ancrage courbe

$$F_C = F_B \cdot e^{-0,4\theta} - \pi \cdot \Phi \cdot r \cdot \tau_{su} [1 - e^{-0,4\theta}] / 0,4 = 41,00 \cdot 0,39 - 3,14 \cdot 1,2 \cdot 5,5 \cdot 1,2 \cdot 0,284 \cdot 1,53 = 5,18 \text{ kn}$$

$$F_C = F_{CD}$$

$$F_T = F_{AB} + F_{CD} = 15,52 + 5,18 = 20,8 \text{ kn}$$

$$\sigma = F_T / A_s = 20,8 / (3,14 \cdot 1,2 \cdot 17,5) = 0,31 \text{ kn/cm}^2$$

d) Ancrage par courbure des barres ($\Phi 12/90^\circ$)

L'effort à reprendre sera donc de

$$F_A = [\pi \cdot \Phi \cdot 2 / 4] \cdot f_e = 3,14 \cdot 1,2^2 \cdot 50 / 4 = 56,52 \text{ kn}$$

L'effort en B sera plus faible du fait de l'adhérence le long de AB

$$F_{AB} = \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su}$$

$$F_B = F_A - \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su} = 56,52 - 3,14 \cdot 1,2 \cdot 14,5 \cdot 0,284 = 41,00 \text{ kn}$$

L'effort en C est déterminé par l'équation de l'ancrage courbe

$$F_C = F_B \cdot e^{-0,4\theta} - \pi \cdot \Phi \cdot r \cdot \tau_{su} [1 - e^{-0,4\theta}] / 0,4 = 41,00 \cdot 0,53 - 3,14 \cdot 1,2 \cdot 5,5 \cdot 1,2 \cdot 0,284 \cdot 1,17 = 13,46 \text{ kn}$$

$$F_C = F_{CD}$$

$$F_T = F_{AB} + F_{CD} = 15,52 + 13,46 = 28,98 \text{ kn}$$

$$\sigma = F_T / A_s = 28,98 / (3,14 \cdot 1,2 \cdot 17,5) = 0,43 \text{ kn/cm}^2$$

e) Ancrage par courbure des barres ($\Phi 14/45^\circ$)

L'effort à reprendre sera donc de

$$F_A = [\pi \cdot \Phi \cdot 2 / 4] \cdot f_e = 3,14 \cdot 1,4^2 \cdot 50 / 4 = 76,93 \text{ kn}$$

L'effort en B sera plus faible du fait de l'adhérence le long de AB

$$F_{AB} = \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su}$$

$$F_B = F_A - \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su} = 76,93 - 3,14 \cdot 1,4 \cdot 14,5 \cdot 0,284 = 58,83 \text{ kn}$$

L'effort en C est déterminé par l'équation de l'ancrage courbe

$$F_C = F_B \cdot e^{-0,4\theta} - \pi \cdot \Phi \cdot r \cdot \tau_{su} [1 - e^{-0,4\theta}] / 0,4 = 59,91 \cdot 0,39 - 3,14 \cdot 1,4 \cdot 5,5 \cdot 1,4 \cdot 0,284 \cdot 1,53 = 8,24 \text{ kn}$$

$$F_C = F_{CD}$$

$$F_T = F_{AB} + F_{CD} = 18,10 + 8,24 = 26,34 \text{ kn}$$

$$\sigma = F_T/A_S = 26,34 / (3,14 \cdot 1,4 \cdot 17,5) = 0,34 \text{ kn/cm}^2$$

f) Ancrage par courbure des barres ($\Phi 14/90^\circ$)

L'effort à reprendre sera donc de

$$F_A = [\pi \cdot \Phi^2 / 4] \cdot f_c = 3,14 \cdot 1,4^2 \cdot 50 / 4 = 76,93 \text{ kn}$$

L'effort en B sera plus faible du fait de l'adhérence le long de AB

$$F_{AB} = \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su}$$

$$F_B = F_A - \pi \cdot \Phi \cdot L_{AB} \cdot \tau_{su} = 76,93 - 3,14 \cdot 1,4 \cdot 14,5 \cdot 0,284 = 58,83 \text{ kn}$$

L'effort en C est déterminé par l'équation de l'ancrage courbe

$$F_C = F_B \cdot e^{-0,4\theta} - \pi \cdot \Phi \cdot r \cdot \tau_{su} [1 - e^{-0,4\theta}] / 0,4 = 59,91 \cdot 0,53 - 3,14 \cdot 1,4 \cdot 5,5 \cdot 1,4 \cdot 0,284 \cdot 1,17 = 20,50 \text{ kn}$$

$$F_C = F_{CD}$$

$$F_T = F_{AB} + F_{CD} = 18,10 + 20,50 = 38,60 \text{ kn}$$

$$\sigma = F_T/A_S = 38,60 / (3,14 \cdot 1,4 \cdot 17,5) = 0,50 \text{ kn/cm}^2$$

Chapitre III
Etude expérimentale

III.1) Objectif de l'essai

Nous savons que le béton armé est un matériau considéré homogène, ce qui signifie que le béton et l'acier fonctionnent ensemble comme un seul matériau. Pour étudier ce phénomène il existe de nombreuses méthodes et tests, pour cette étude nous avons choisi le test d'arrachement.

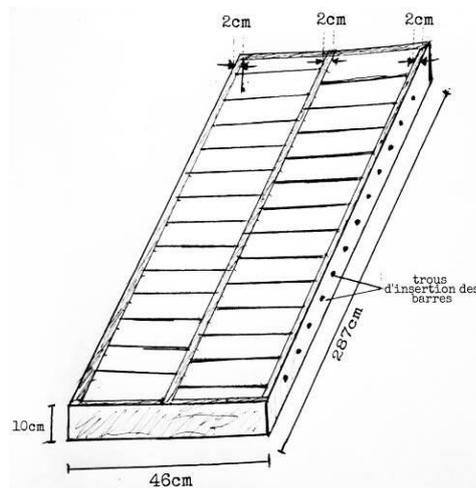
Le but de ce test consiste à caractériser le comportement de l'interface acier-béton avec la détermination des paramètres influents.

III.2) Protocole de l'essai

III.2.1) Préparation des moules

Préparation des échantillons de béton a été réalisée au niveau du laboratoire de génie civil de l'Université Larbi Tebessi de Tébessa, pour la détermination de la résistance à la traction.

L'ensemble des moules utilisés sont sous forme d'une boîte en bois de dimensions (287x46x10) cm divisée en 54 cubes de dimensions (20x10x10) cm (figures1), Les cubes seront utilisés pour l'essai d'arrachement.



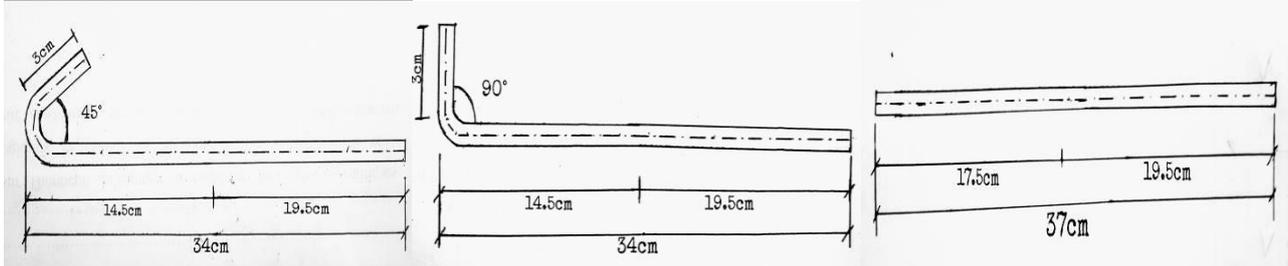
Figures III.1 : schéma de l'ensemble des moules



Figures III.2 : l'ensemble des moules

III.2.3) Préparation des barres d'acier

Dans cet essai nous utilisons uniquement les barres nervurées de différentes formes d'ancrages (45°, 90° et 180°) avec de différents diamètres ($\Phi = 8 \text{ mm}$; $\Phi = 12 \text{ mm}$; $\Phi = 14 \text{ mm}$) de longueur 37 cm (figures 3).



Figures III.3 : Schéma des barres d'acier



Figures III.4 : les barres d'acier

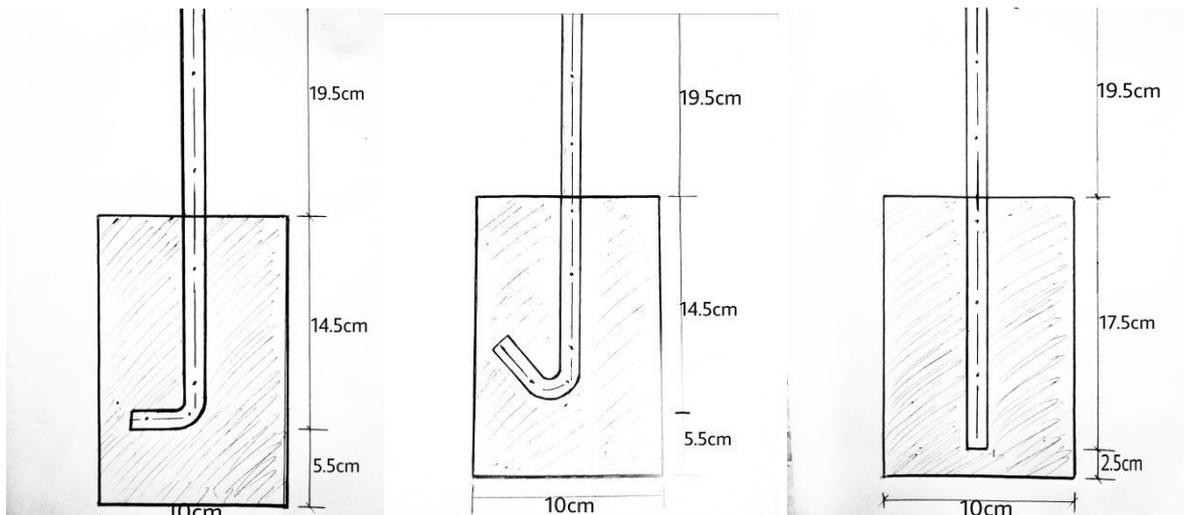
III.2.4) Échantillonnage

Le présent essai s'intéresse au comportement acier-béton dans les structures soumises à la traction monotone correspondant à deux classes de résistance : [250 kg/m³ et 350 kg/m³], pour différentes durées de vie [7js ; 14js ; 28js] et différents types des ancrages (45, 90 et 180 degré) et diamètres des barres ($\Phi = 8 \text{ mm}$; $\Phi = 12 \text{ mm}$; $\Phi = 14 \text{ mm}$) et fixer les longueurs relatives d'ancrage ($l_b=17.5\text{cm}$).

Les essais d'arrachement ont été réalisés sur des éprouvettes cubique (20x10x10) cm (figures 5).

Tableau III.1: Tableau des paramètres

Age (jours)	7;14;28								
Dosage (kg/m ³)	250;350								
Diamètre (mm)	8			12			14		
Forme d'ancrage (°)	45	90	180	45	90	180	45	90	180



Figures III.5 : Schéma des éprouvettes



Figure III.6 : Eprouvettes cubique (20x10x10) cm

III.2.5) Béton

III.2.5.1) Formulation du béton [Hmidane H 2022]

Pour notre essai on a adopté une formulation simple et maniable celle de *Dreux-Gorisse*.

Dreux-Gorisse propose une méthode simplifiée et pratique, mais que se fixe à l'avance les dosages en ciment et en eau en fonction de l'ouvrabilité (affaissement, consistance) et de la résistance visée, puis on trace une courbe granulométrique théorique de référence du mélange granulats seul (sables et gravier), le dosage en ciment étant déjà fixé ; en disposant les courbes granulométriques des sables et graviers à utilisés sur le même graphique que la courbe de référence, il faut directement les proportions de chaque granulat, d'où l'intérêt de la méthode (voir ANNEX page 67)

III.2.5.2) Coulage de béton

Le mélange a été fabriqué dans un malaxeur au laboratoire de génie civil de l'Université Larbi Tébessa de Tébessa; La durée effective totale du malaxage est d'environ 15 minutes, après l'obtention d'une bonne fluidité du béton réalisé. Il faut obtenir un affaissement entre (50 et 90) mm pour valider cet essai. Après la réalisation des essais d'ouvrabilité, les bétons ont été remalaxés pendant 01 minute puis mise en place dans les moules. Les moules remplis avec vibration, puis les éprouvettes ont été démoulées 24H après le coulage et stockées par immersion dans un bassin d'eau.



Figures III.7 : les éprouvettes après 24H

III.3) Essai expérimental

III.3.1) La machine de l'essai

III.3.1.1) Caractéristique de la machine de traction

Une machine de traction classique est équipée d'un capteur de force interchangeable, fixé sur la traverse mobile ou sur la traverse basse, d'un capteur de déplacement, de deux attaches (mors) mobiles idéalement auto-serrantes pour réaliser un essai de traction et d'un enregistreur graphique. Dans le cas d'un bâti bicolonne, la traverse mobile est entraînée par deux vis latérales, actionnées par un motoréducteur à courant continu.

La liaison entre les vis et le réducteur s'effectue en général par poulies et courroie crantée. La vitesse du mors mobile, en général constante, peut être réglée de 1 $\mu\text{m}/\text{min}$ à 3000 mm/min (valeur typique : 10 mm/min).

Le type de sollicitation, tel la traction uniaxiale, la traction-cisaillement, la compression ou la flexion trois points ou quatre points, dépend du porte-échantillon choisi et des dimensions de l'échantillon.

L'échelle de charges du capteur de force peut être de quelques millinewtons à plusieurs centaines de kilonewtons selon le type de produit examiné et le type de sollicitation. Une contrainte (ex. : de rupture en traction-cisaillement) ou une force d'emboîtement peuvent être mesurées.



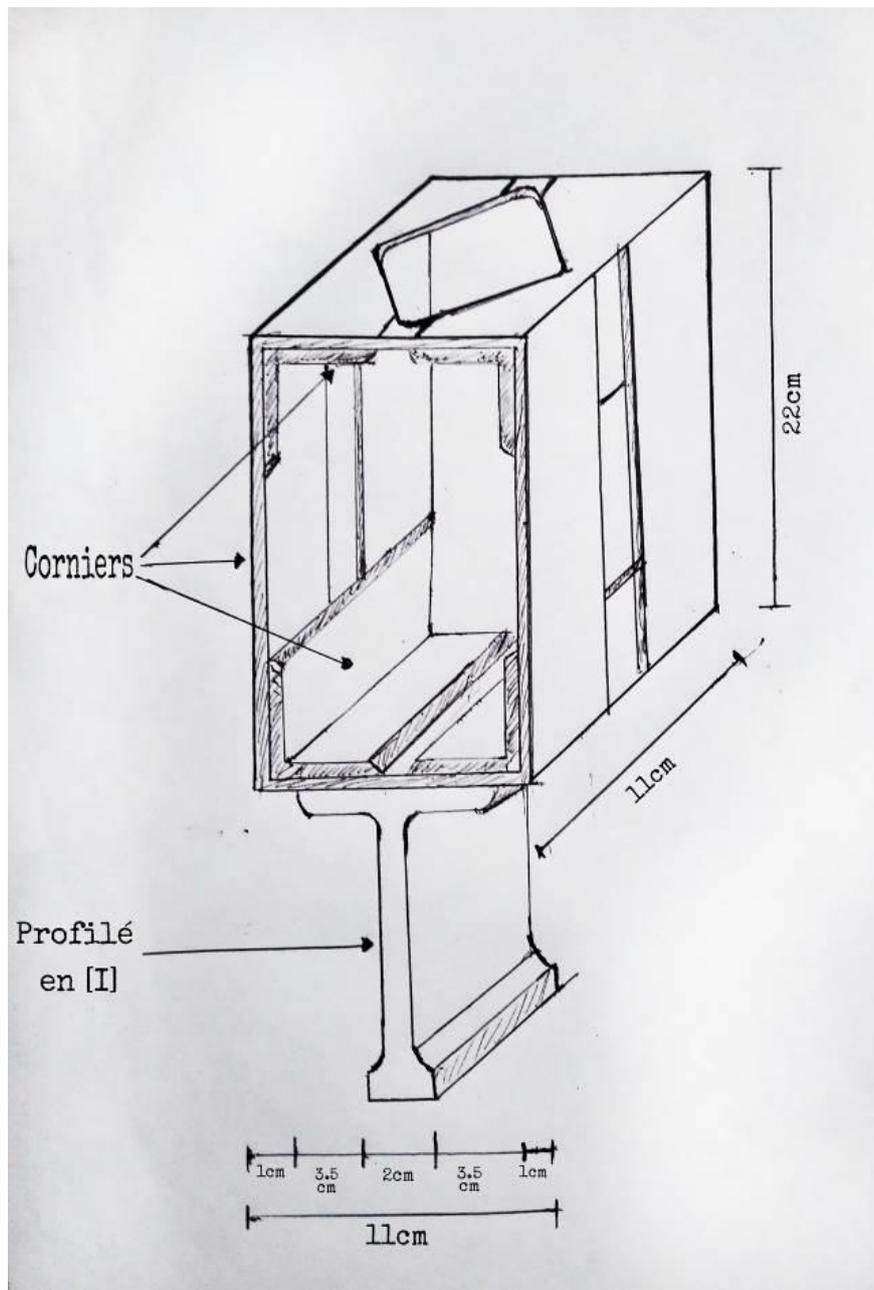
Figures III.8 : La machine de traction



Figures III.9 : exemples des résultats de la logicielle

III.3.1.2) Dispositif d'adaptation

En raison de l'indisponibilité de la machine d'arrachement au laboratoire de génie civile nous avons dû utiliser la même machine destinée pour réaliser des essais de traction sur des barres et des plaques et puisque nos échantillons son fabriqué en volume de béton renforcée par une barre d'acier ce que présente des difficulté lors de mise en service de la machine car elle n'est pas destinée la convertir en machine d'arrachement, en fabriquant un cube d'acier contenant l'échantillon aux dimensions 22 cm de longueur et 11 cm de largeur et 11 cm de profondeur , l'échantillon est placé à l'intérieur de la dispositif, partie de la dispositif est placé dans la partie supérieure de la machine et le barre d'acier à l'extérieur de l'échantillon est placé dans la partie inférieure de la machine.



Figures III.10 : schéma du dispositif



Figures III.11 : le cube d'acier contenant l'échantillon dans la machine

III.4) Résultats

III.4.1) Sous forme de tableaux

Tableau III.2) Tableau des résultats des 7 jours pour les dosages (250 ; 350) kg/m³

Age 7 jours									
Dosage (kg/m ³)	Diamètre (mm)	Type d' ancrage(°)	Force (kn)	Contrainte σ (kn/cm ²)	Dosage (kg/m ³)	Diamètre (mm)	Type d' ancrage(°)	Force (kn)	Contrainte σ (kn/cm ²)
250	8	45°	14.00	0.32	350	8	45°	32.41	0.74
	8	90°	12.63	0.29		8	90°	34.31	0.78
	8	180°	10.82	0.25		8	180°	25.28	0.58
	12	45°	35.45	0.54		12	45°	30.31	0.50
	12	90°	25.94	0.39		12	90°	39.81	0.60
	12	180°	13.24	0.20		12	180°	26.66	0.56
	14	45°	28.19	0.36		14	45°	39.10	0.51
	14	90°	32.99	0.43		14	90°	38.27	0.50
	14	180°	32.67	0.42	14	180°	45.51	0.60	



Figures III.12 : exemple d'une éprouvette à l'âge de 7 jours Après l'essai d'arrachement

Tableau III.3) Tableau des résultats des 14 jours pour les dosages (250 ; 350) kg/m³

Age 14 jours									
Dosage (kg/m ³)	Diamètre (mm)	Type d' ancrage (°)	Force (kn)	Contrainte σ (kn/cm ²)	Dosage (kg/m ³)	Diamètre (mm)	Type d' ancrage (°)	Force (kn)	Contrainte σ (kn/cm ²)
250kg/ m ³	8	45	14.77	0.34	350kg/ m ³	8	45	32.36	0.74
		90	16.14	0.37			90	33.98	0.77
		180	12.62	0.29			180	37.46	0.85
	12	45	38.43	0.58		12	45	55.53	0.84
		90	42.62	0.65			90	43.48	0.66
		180	31.17	0.47			180	50.33	0.76
	14	45	38.92	0.51		14	45	65.46	0.85
		90	34.24	0.45			90	50.92	0.66
		180	37.45	0.49			180	42.22	0.55



Figures III.13 : exemple d'une éprouvette à l'âge de 14 jours Après l'essai d'arrachement

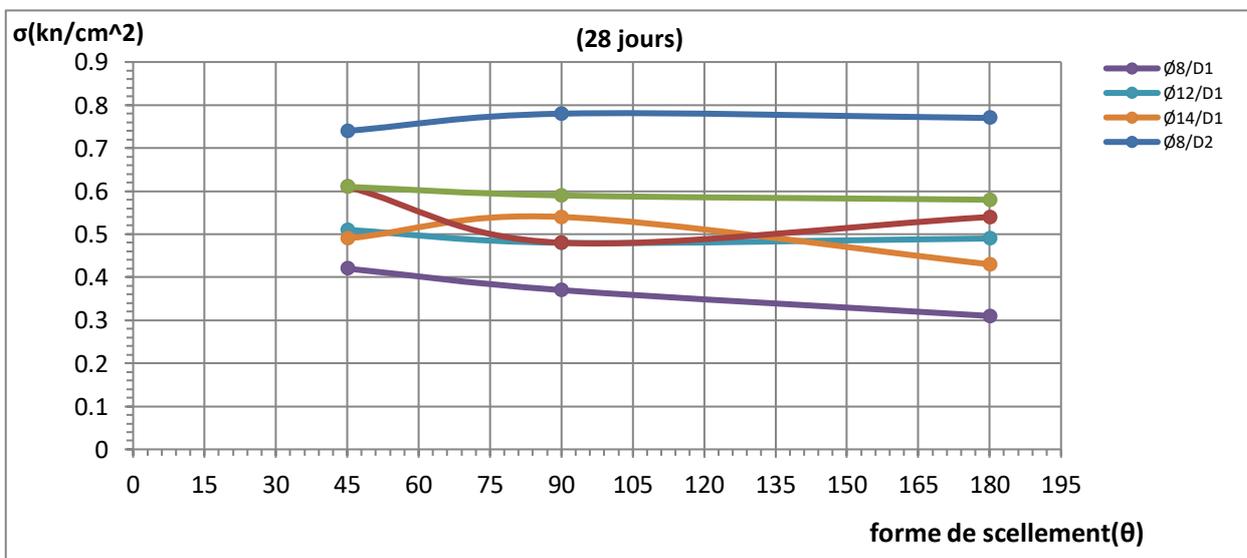
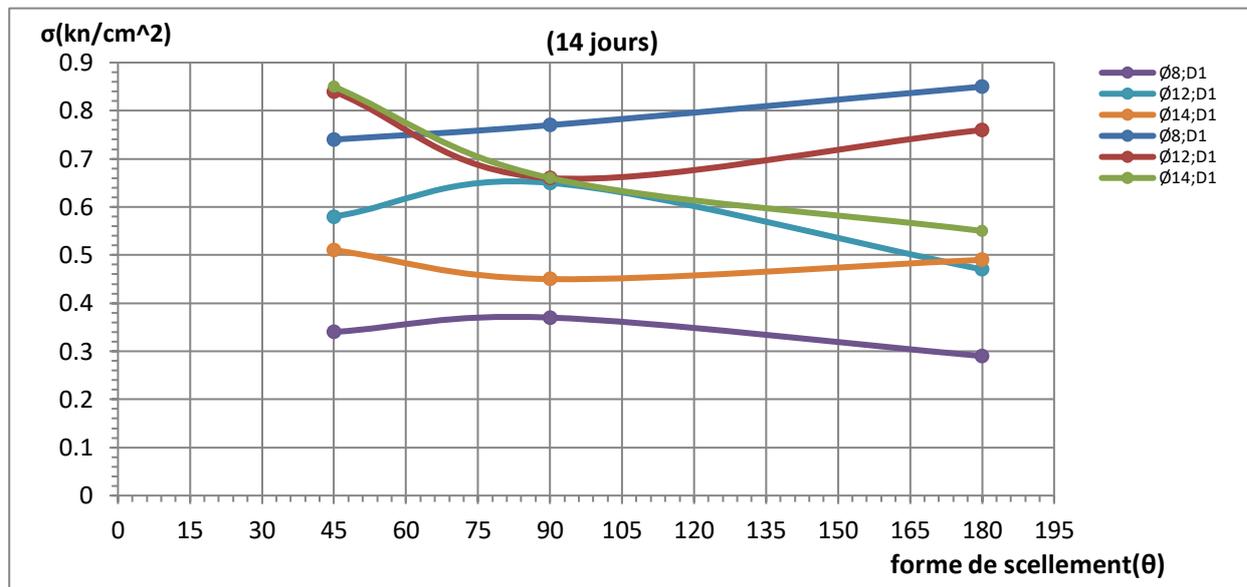
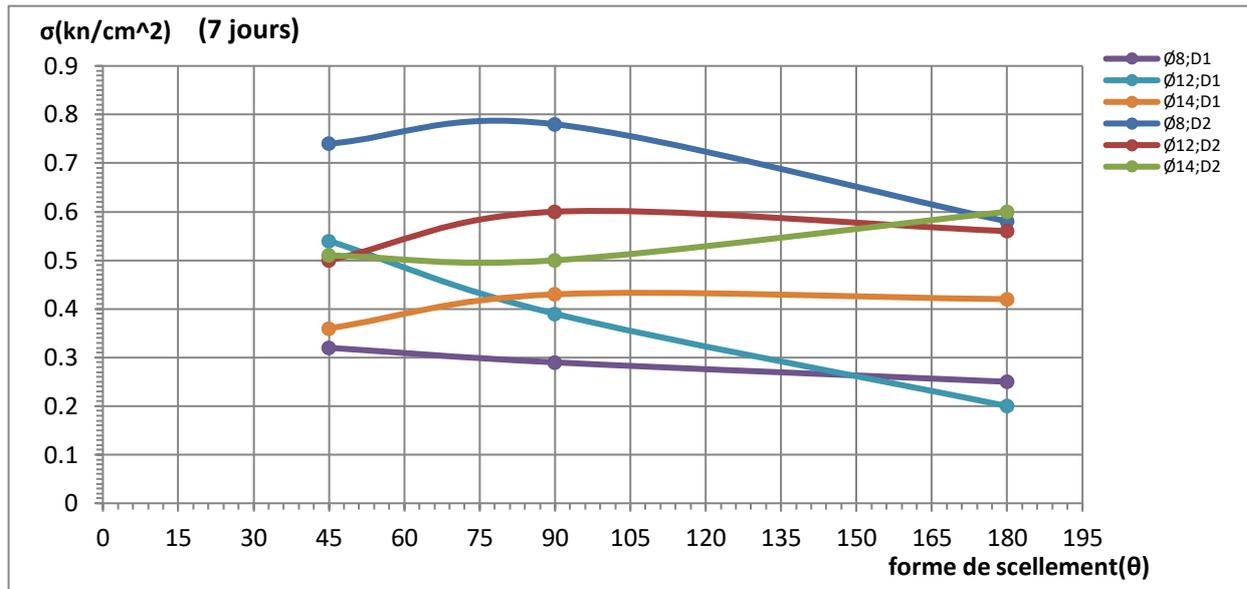
Tableau III.4) Tableau des résultats des 28 jours pour les dosages (250 ; 350) kg/m³

Age 28 jours									
Dosage (kg/m ³)	diamètre	Type d'ancrage	Force (kn)	Contrainte σ (kn/cm ²)	Dosage (kg/m ³)	diamètre	Type d'ancrage	Force (kn)	Contrainte σ (kn/cm ²)
250	8	45	18.65	0.42	350	8	45	32.43	0.74
		90	16.23	0.37			90	34.38	0.78
		180	13.81	0.31			180	33.77	0.77
	12	45	33.98	0.51		12	45	39.88	0.61
		90	31.84	0.48			90	31.39	0.48
		180	32.01	0.49			180	35.89	0.54
	14	45	37.57	0.49		14	45	46.61	0.61
		90	41.28	0.54			90	45.38	0.59
		180	33.04	0.43			180	44.24	0.58

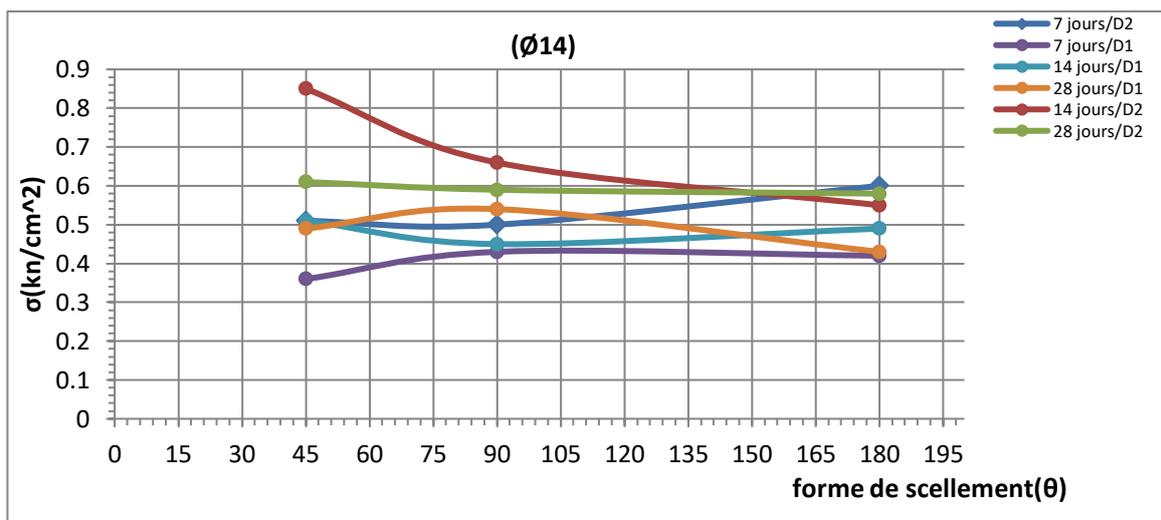
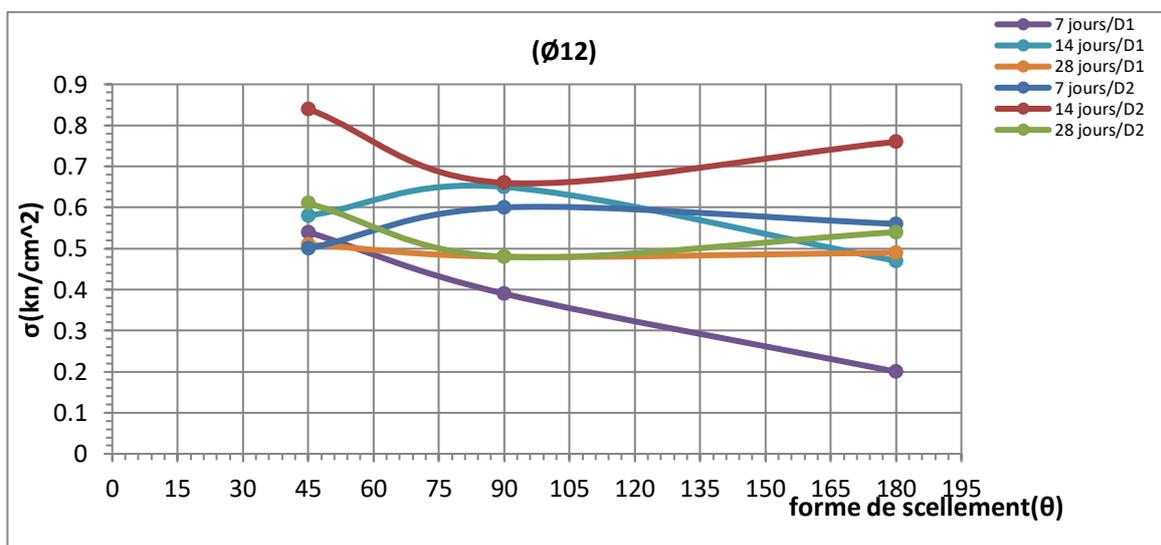
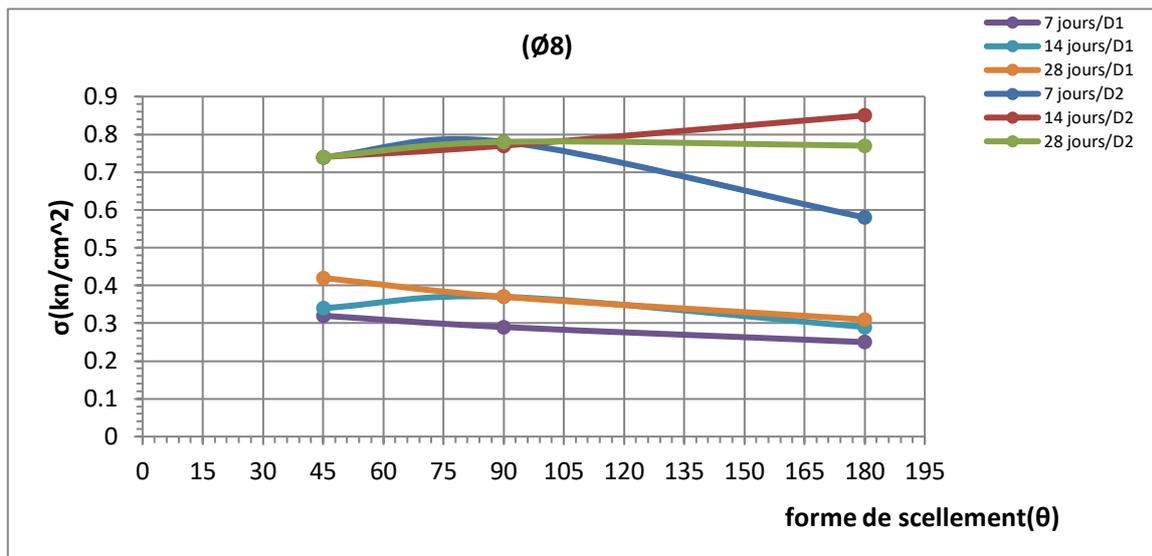


Figures III.14 : exemple d'une éprouvette à l'âge de 28 jours Après l'essai d'arrachement

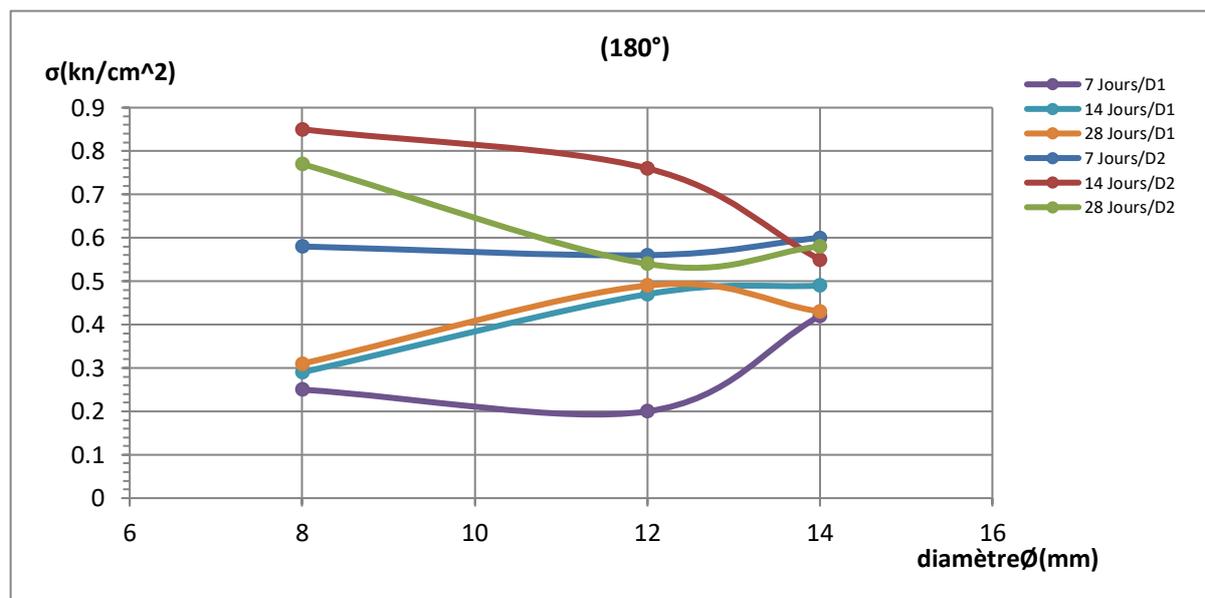
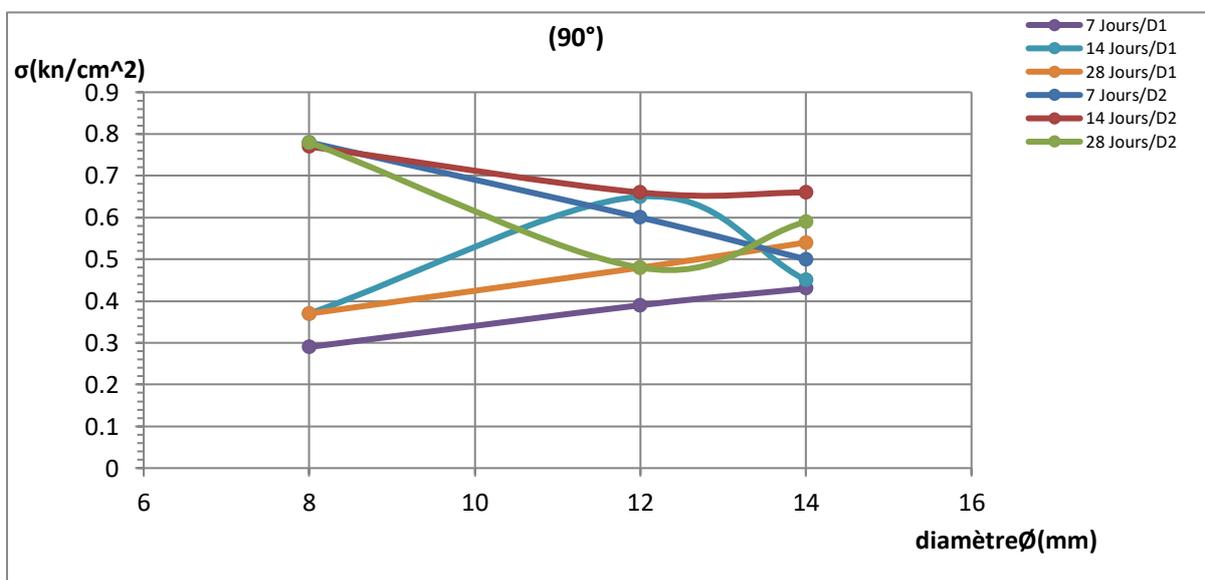
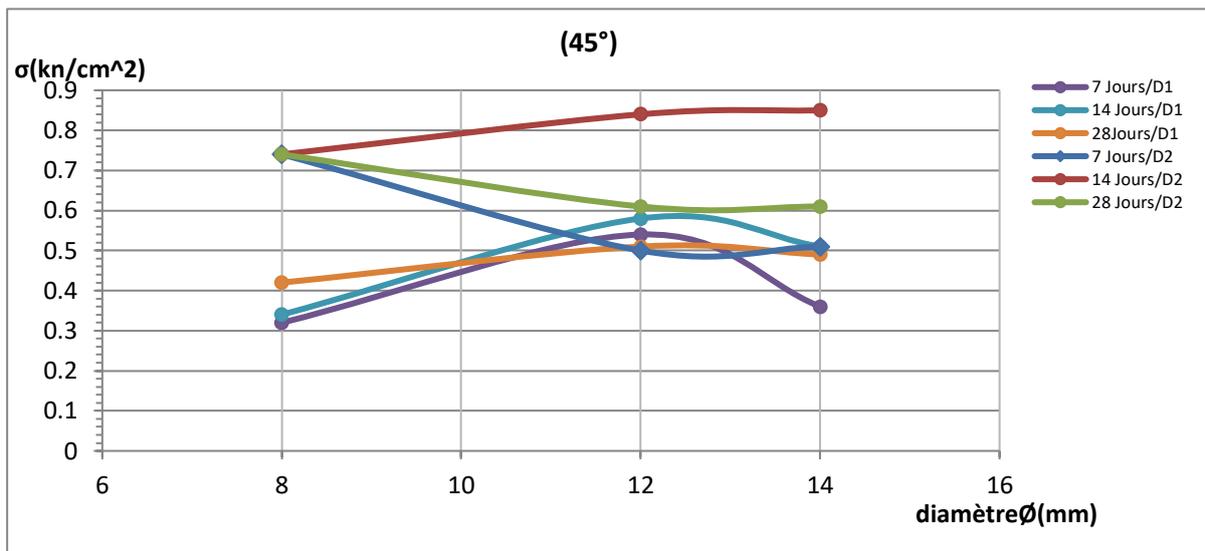
III.4.2) Sous forme de Courbes



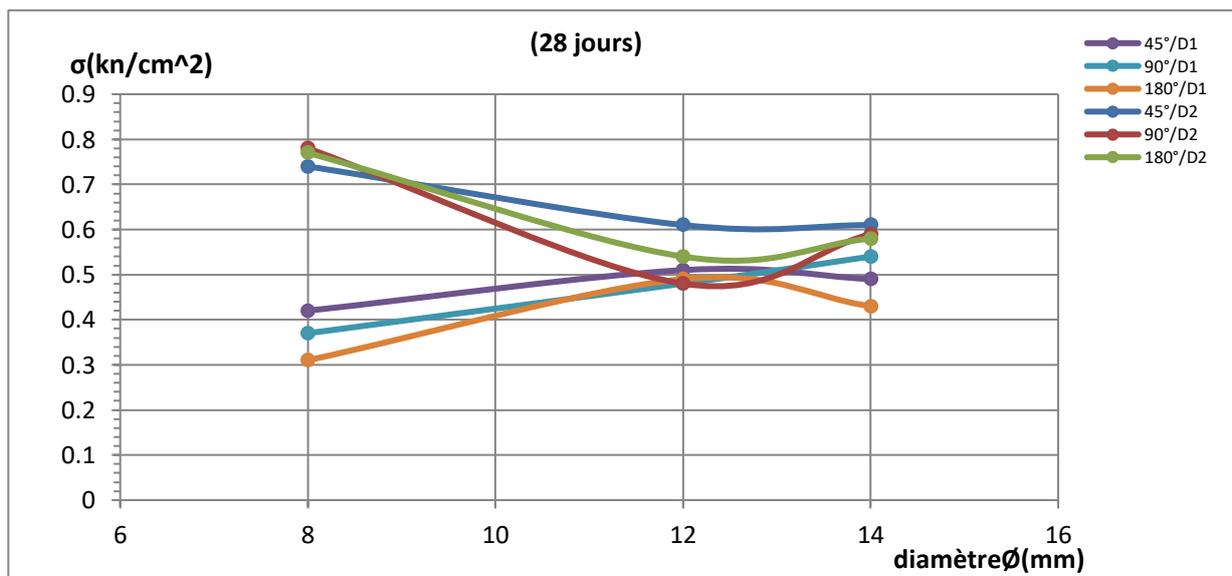
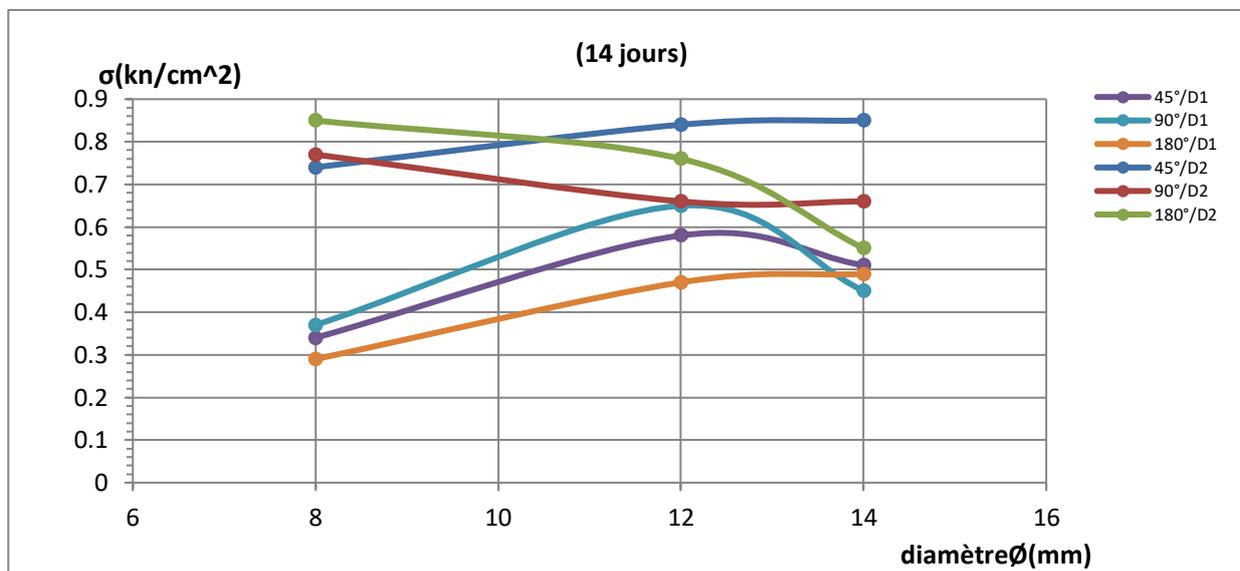
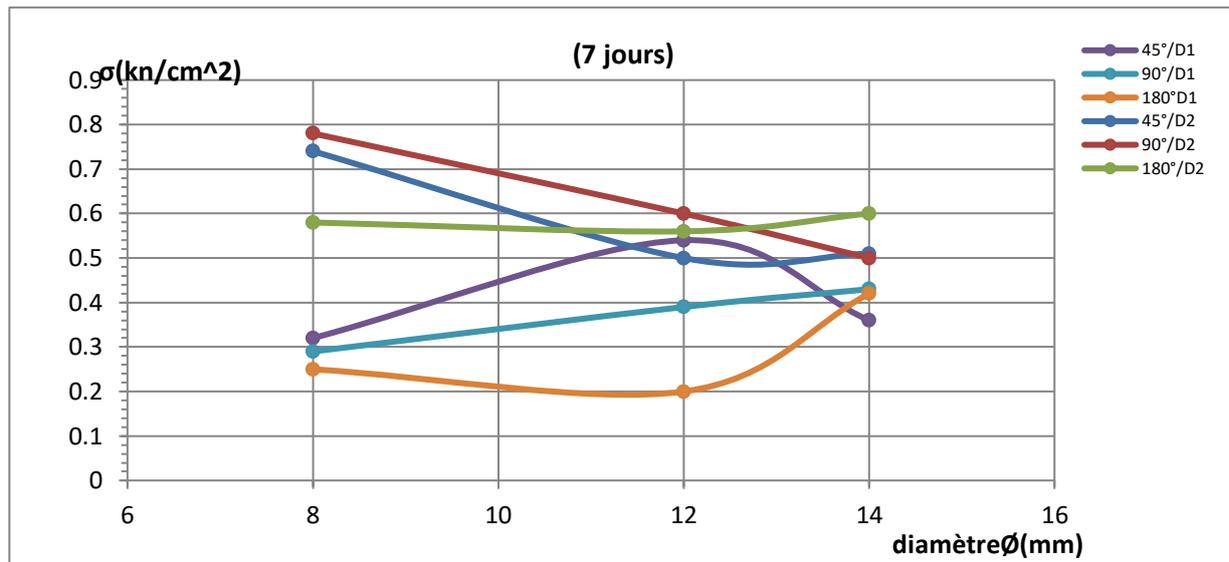
Figures III.15 : σ en fonction de θ pour les âges (7 ;14 ;28 jours).



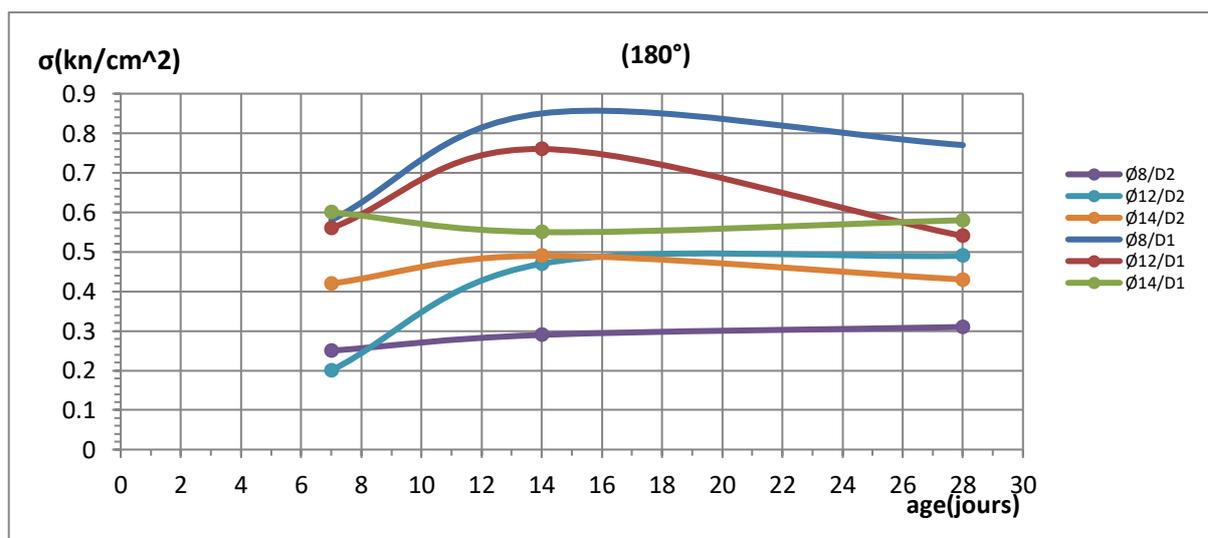
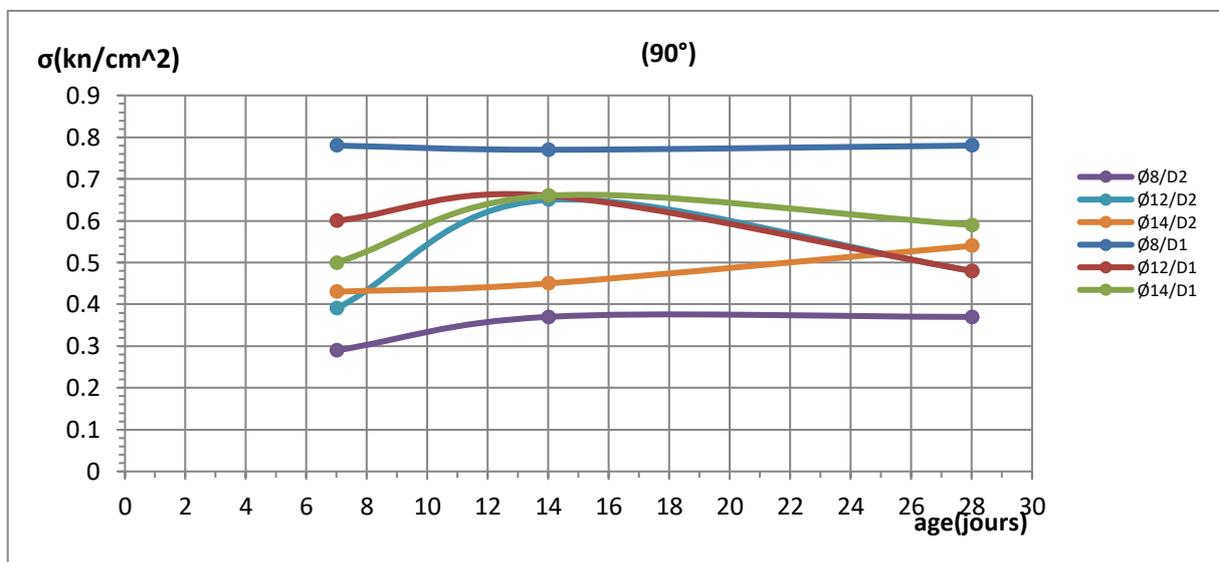
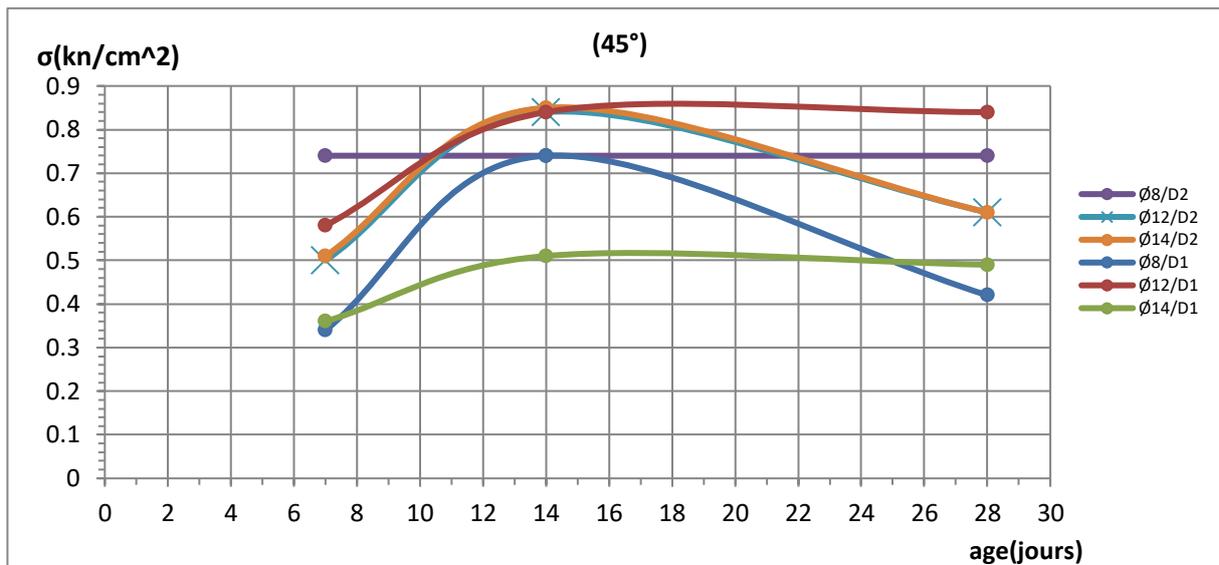
Figures III.16 : σ en fonction de θ pour les diamètres (Ø8 ; Ø12 ; Ø14)



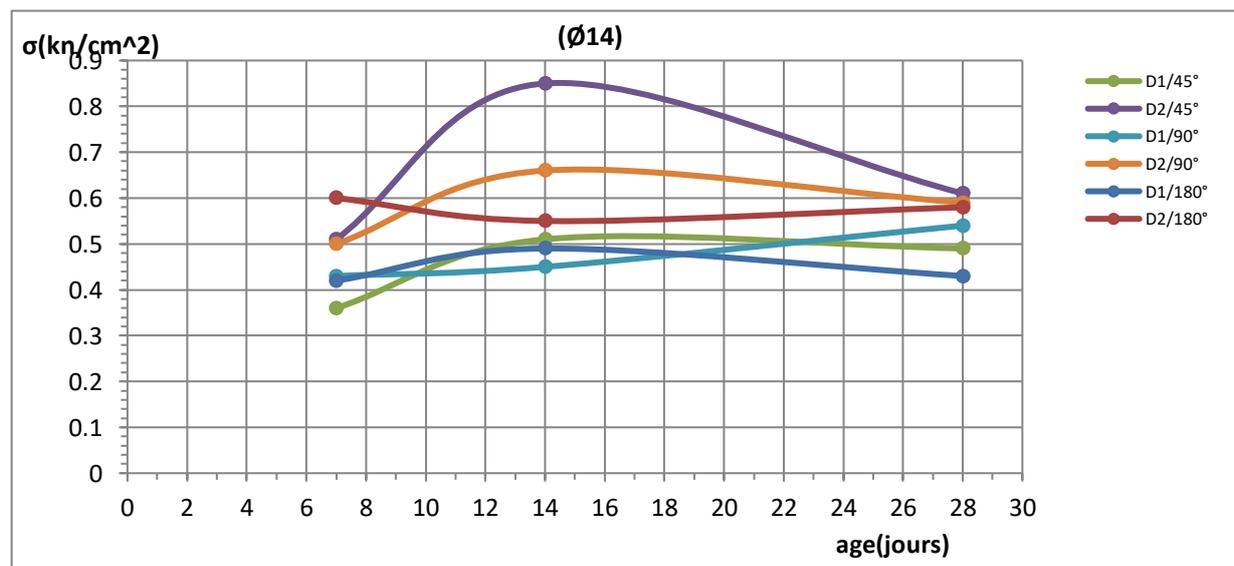
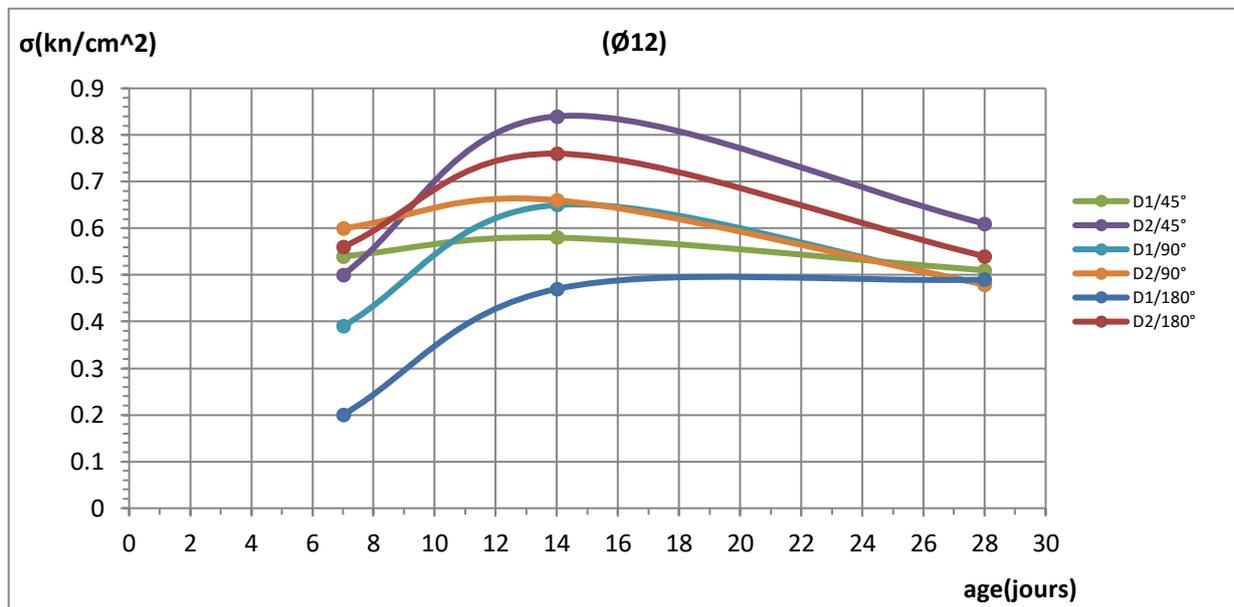
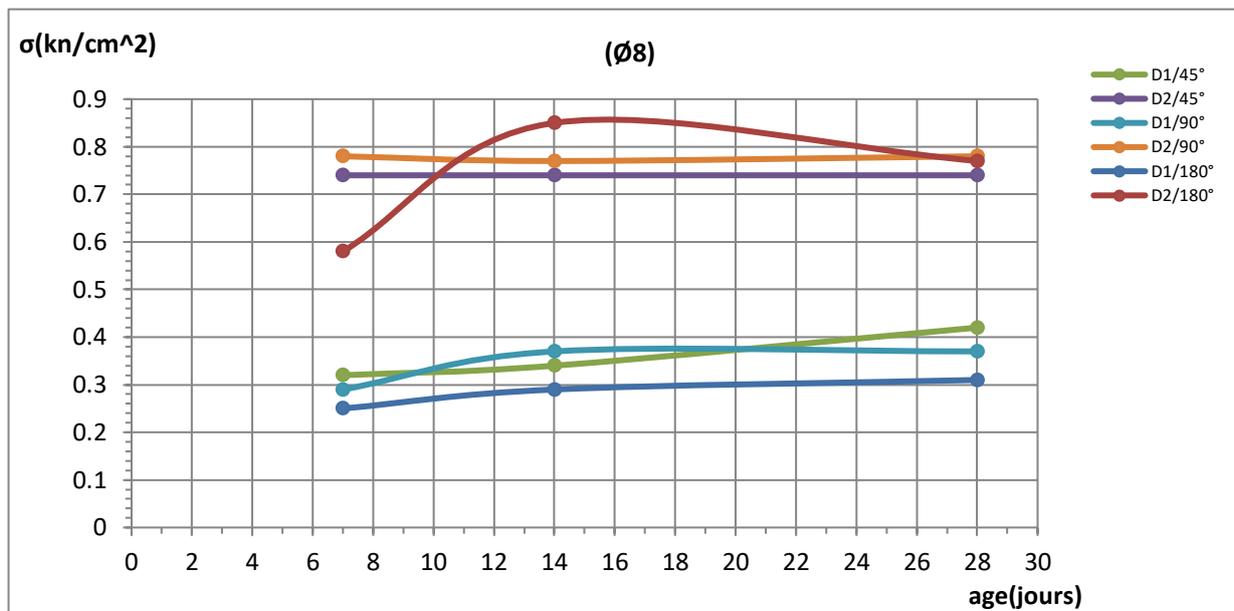
Figures III.17 : σ en fonction de diamètre Ø pour les formes de scellement (45° ; 90° ; 180°)



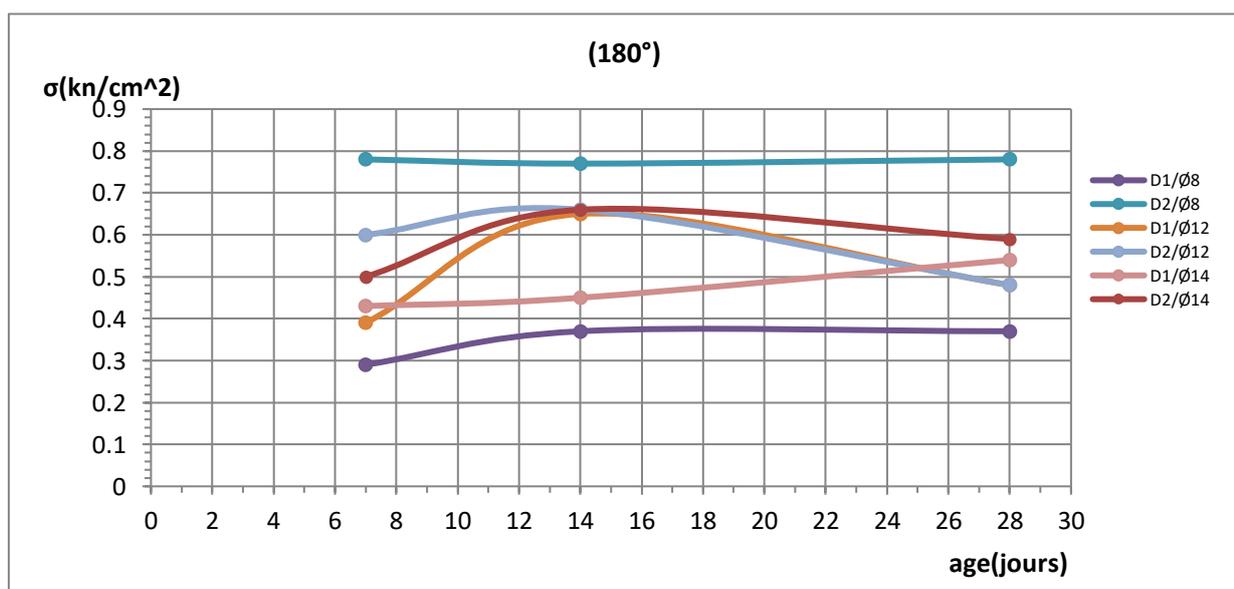
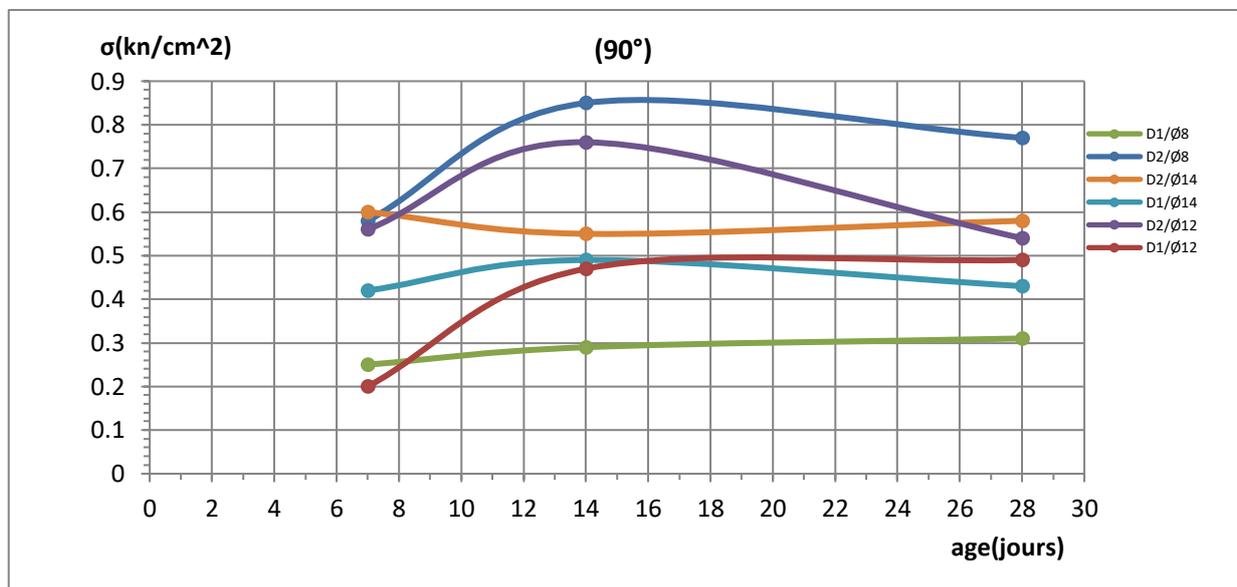
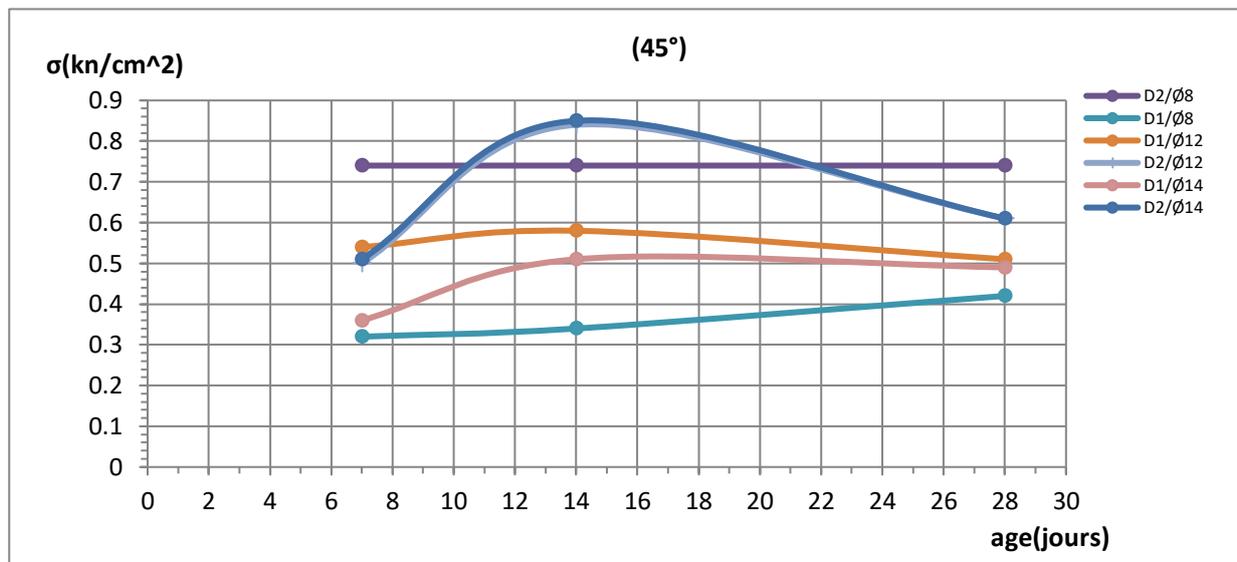
Figures III.18 : σ en fonction de diamètre ϕ pour les âges (7 ; 14 ; 28 jours)



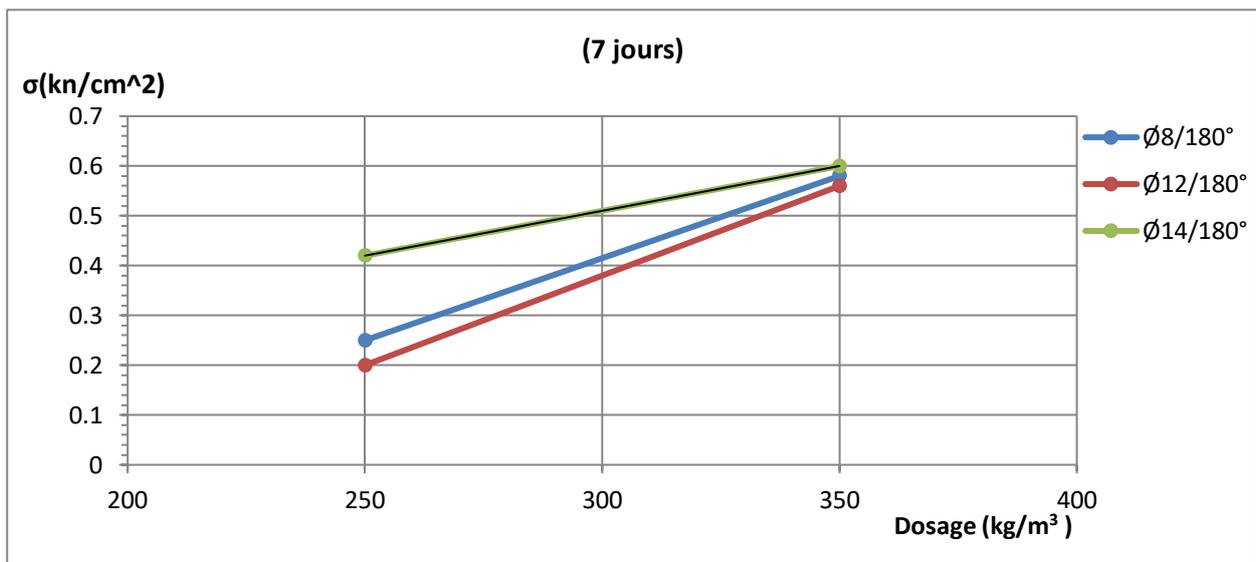
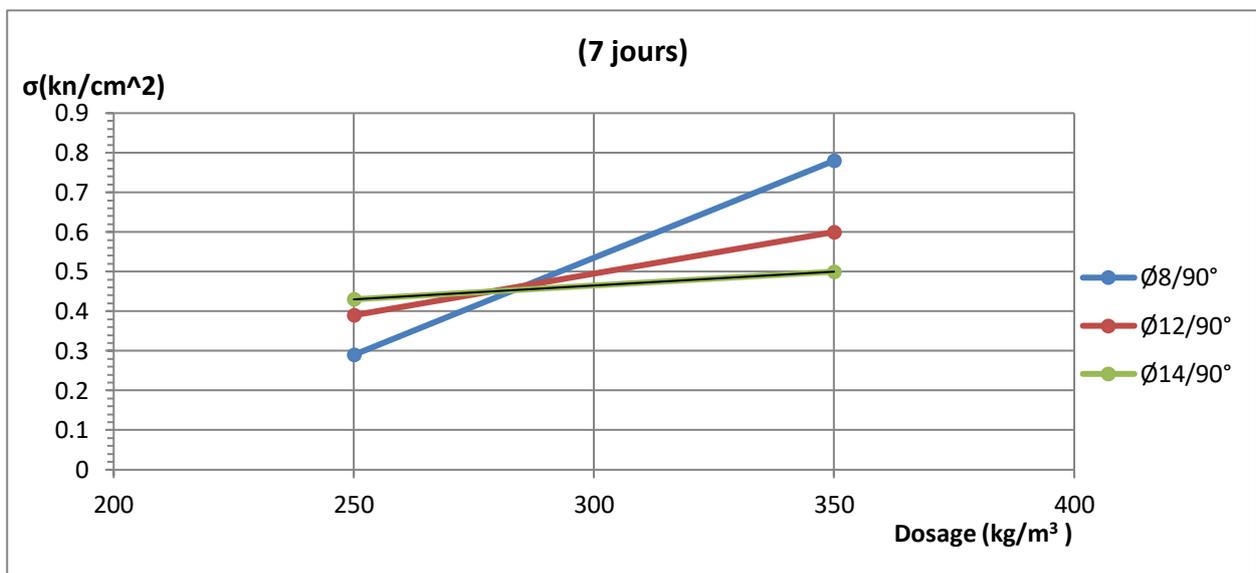
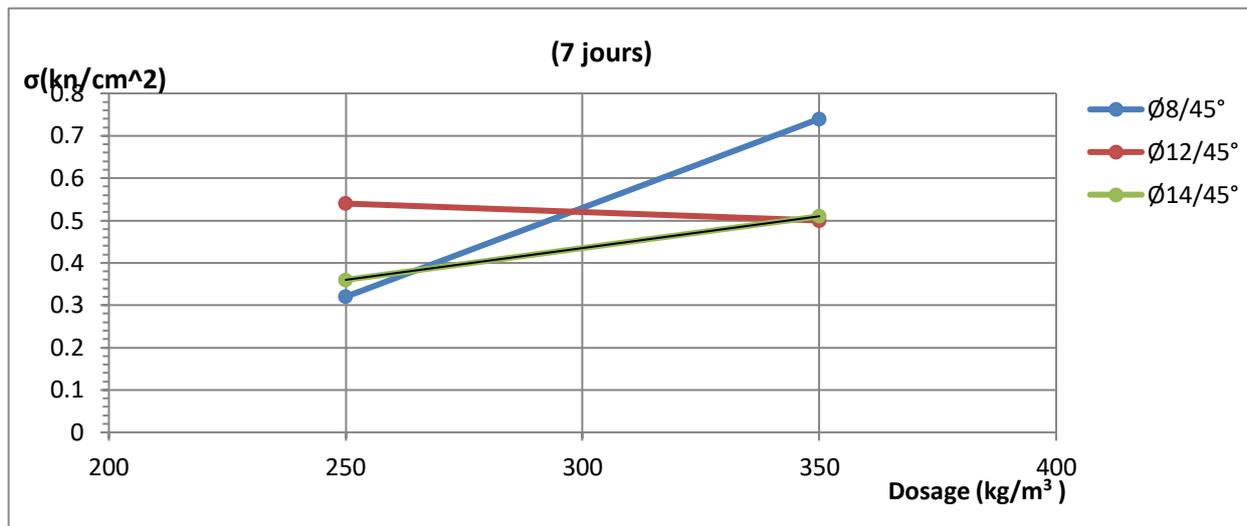
Figures III.19 : σ en fonction des âges (jours) pour la forme de scellement (45° ; 90° ;180°)



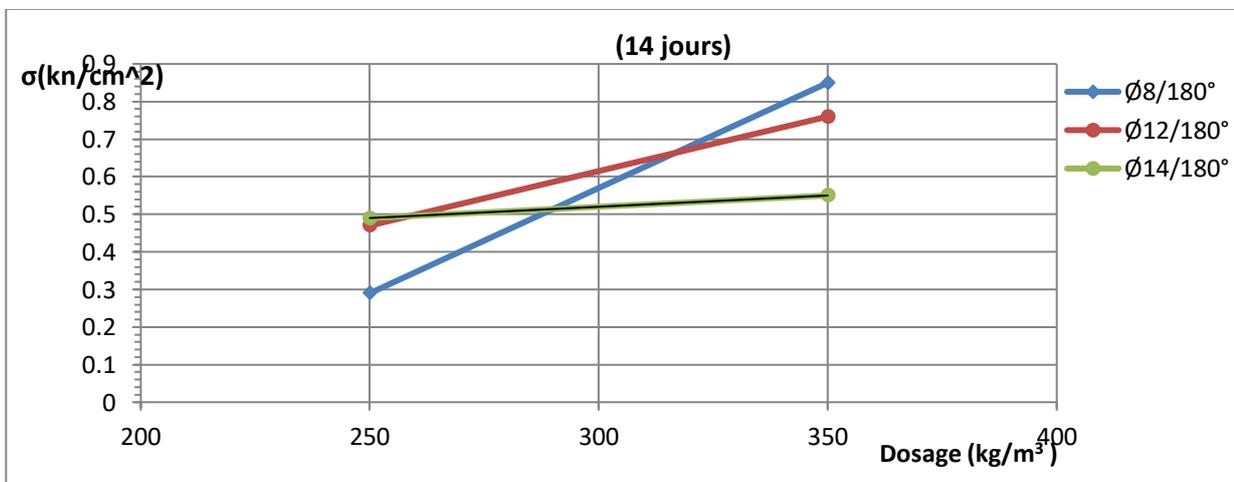
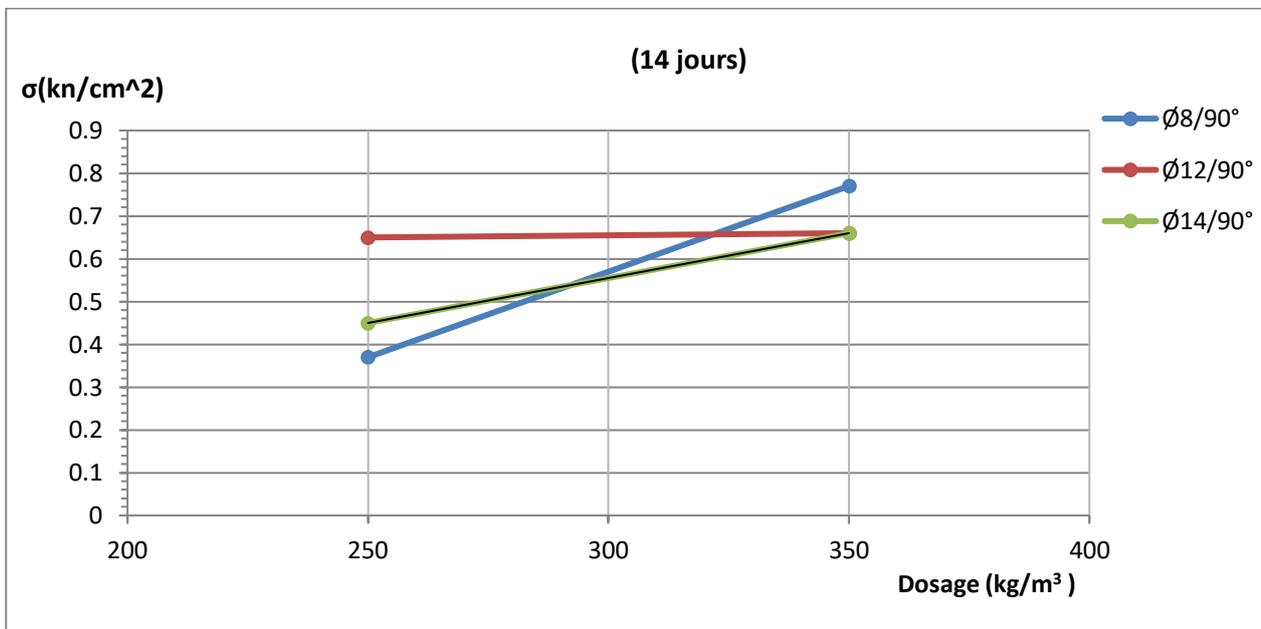
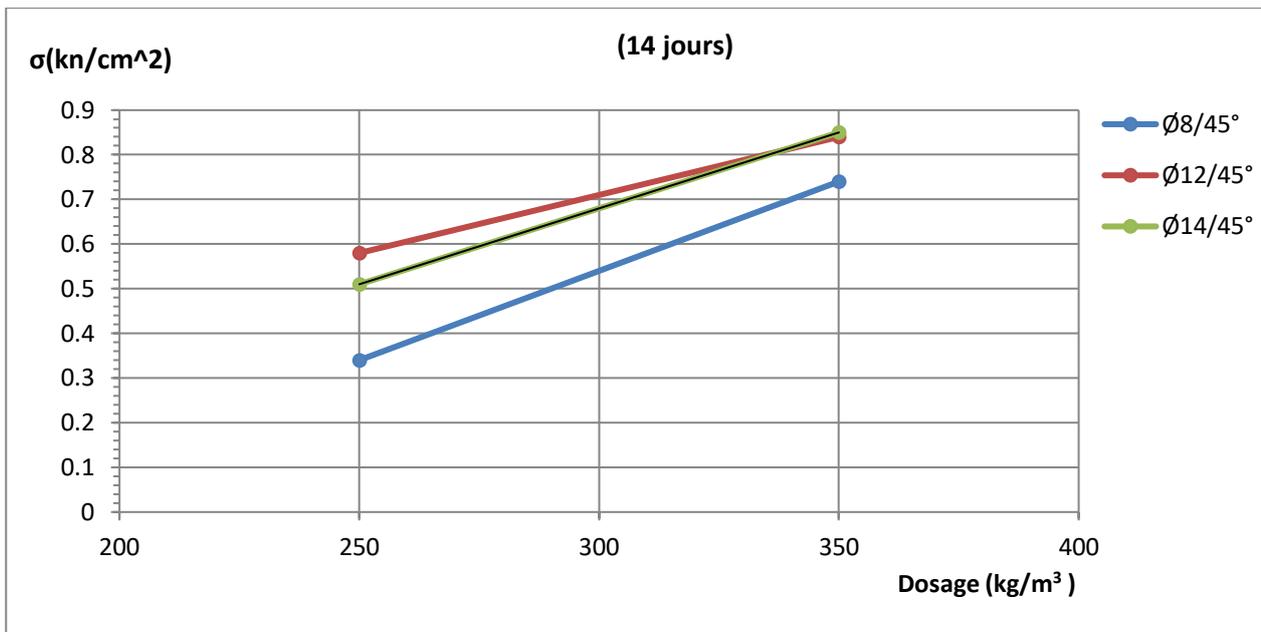
Figures III.20 : σ en fonction de l'âge (jours) pour le diamètre (Ø8 ; Ø12 ; Ø14)



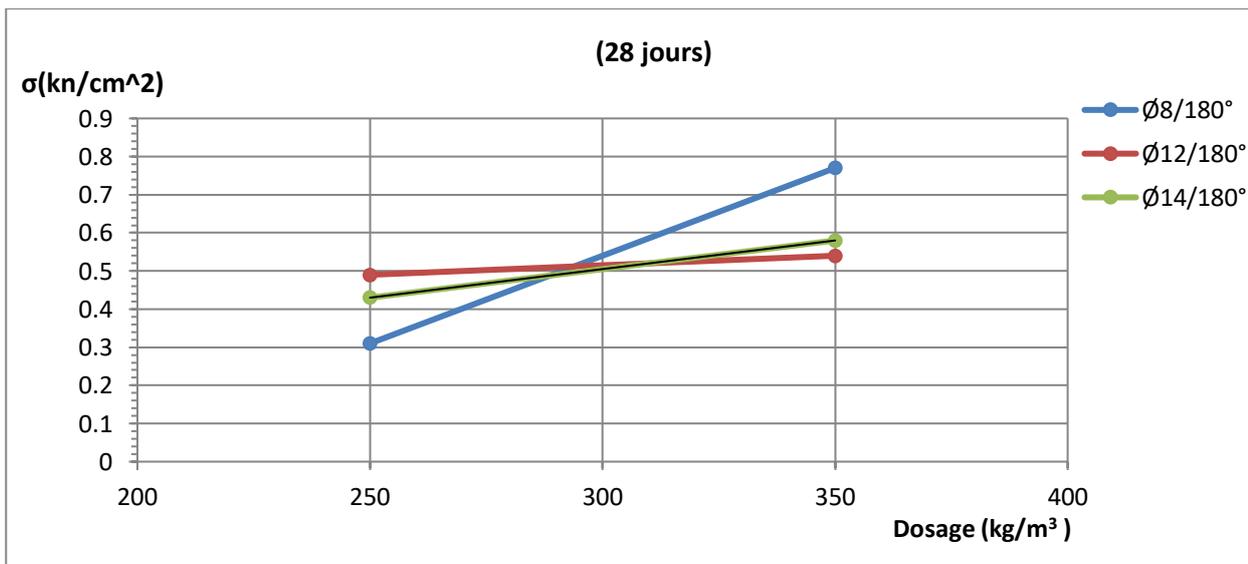
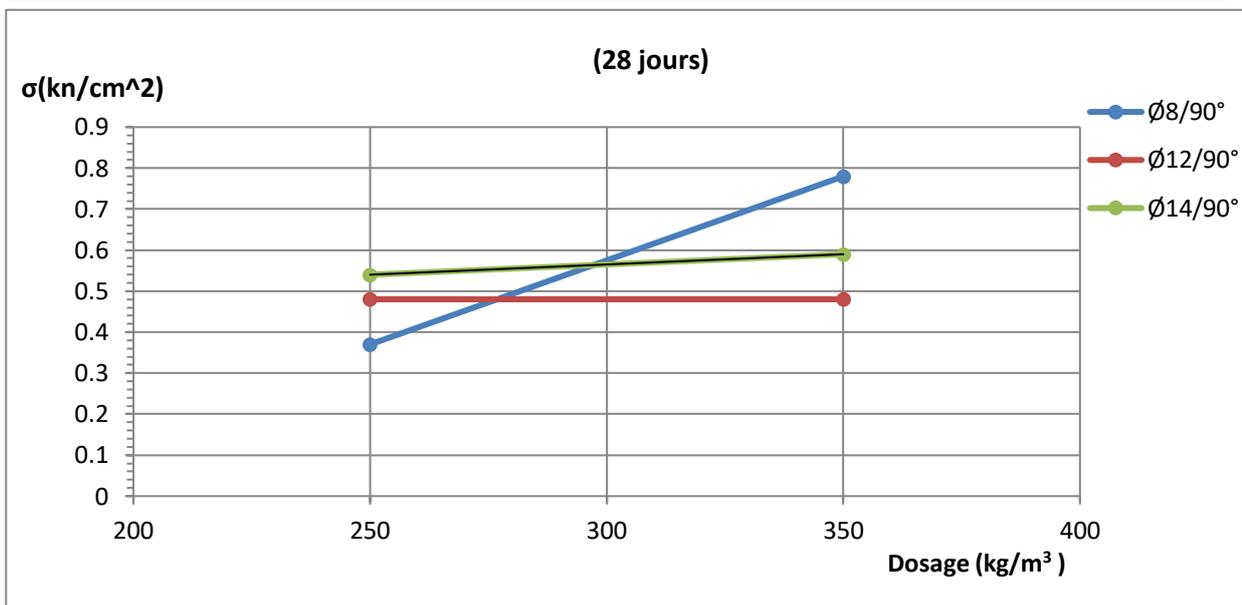
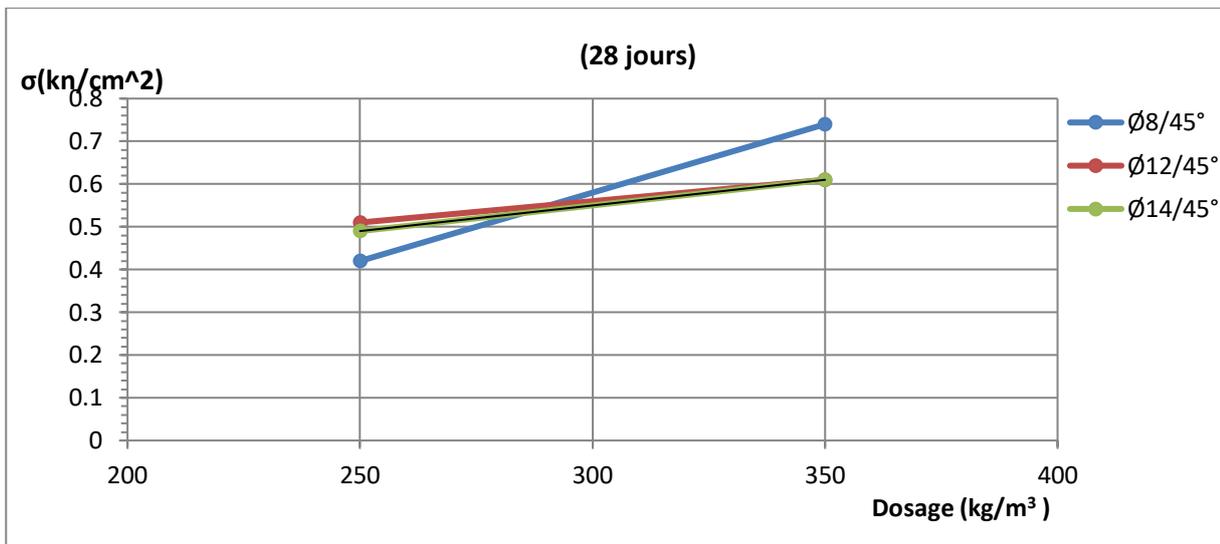
Figures III.21 : σ en fonction de l'âge (jours) pour la forme de scellement (45° ;90° ;180°)



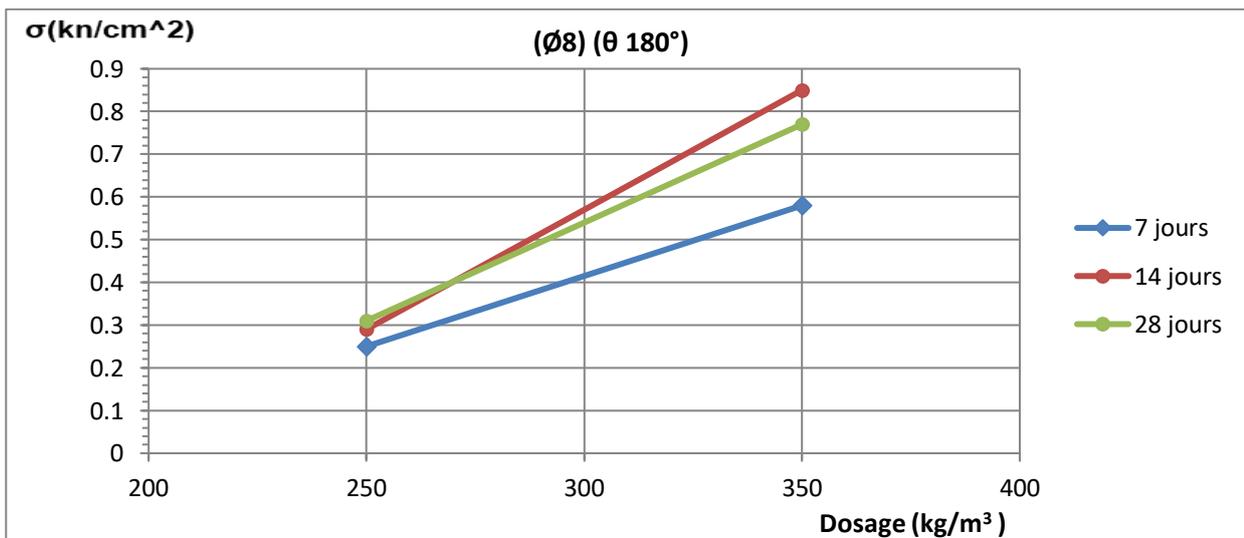
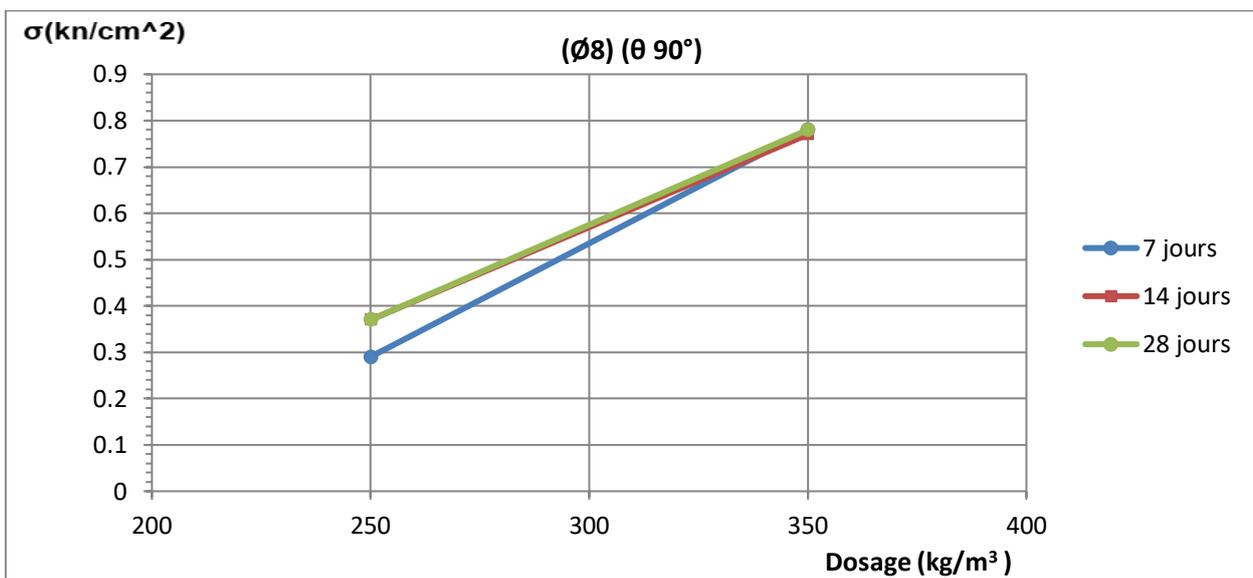
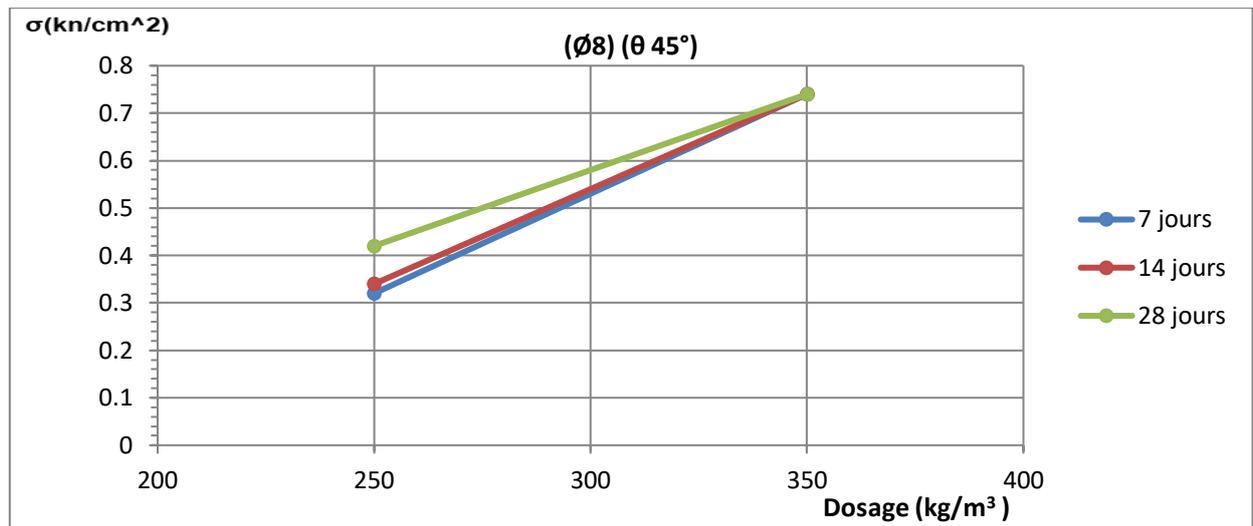
Figures III.22 : σ en fonction de Dosage pour l'âge (7) jours



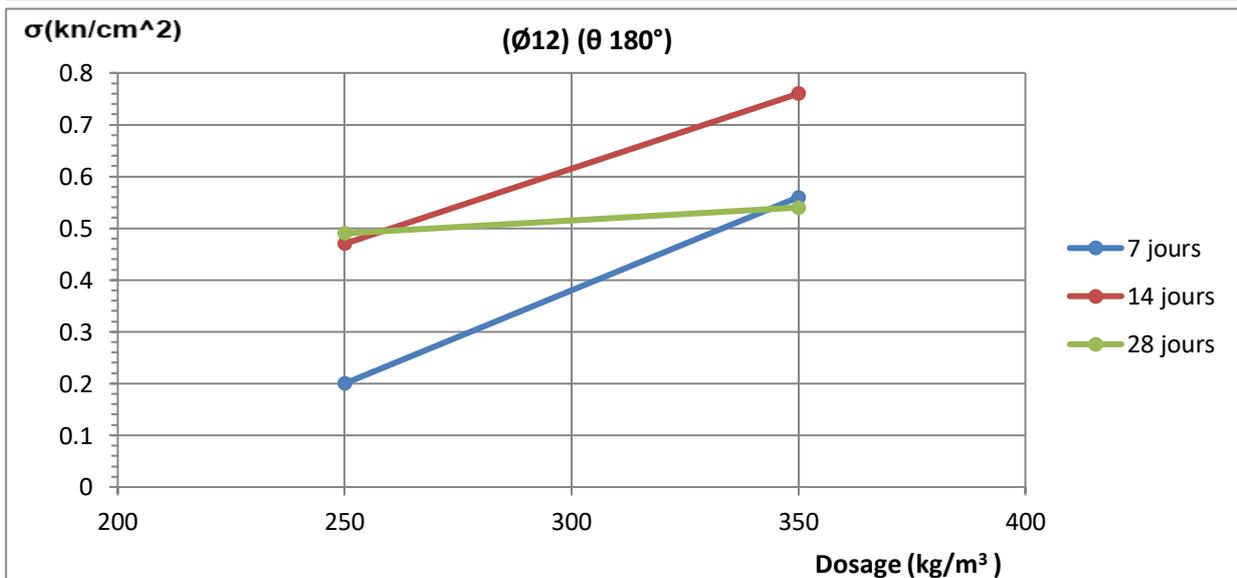
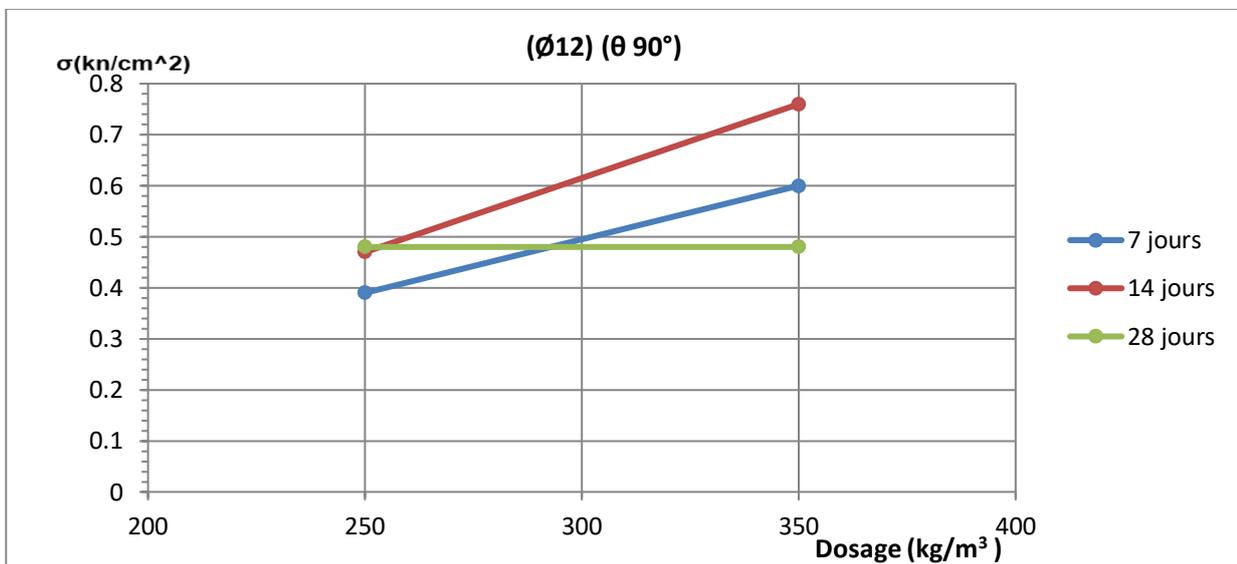
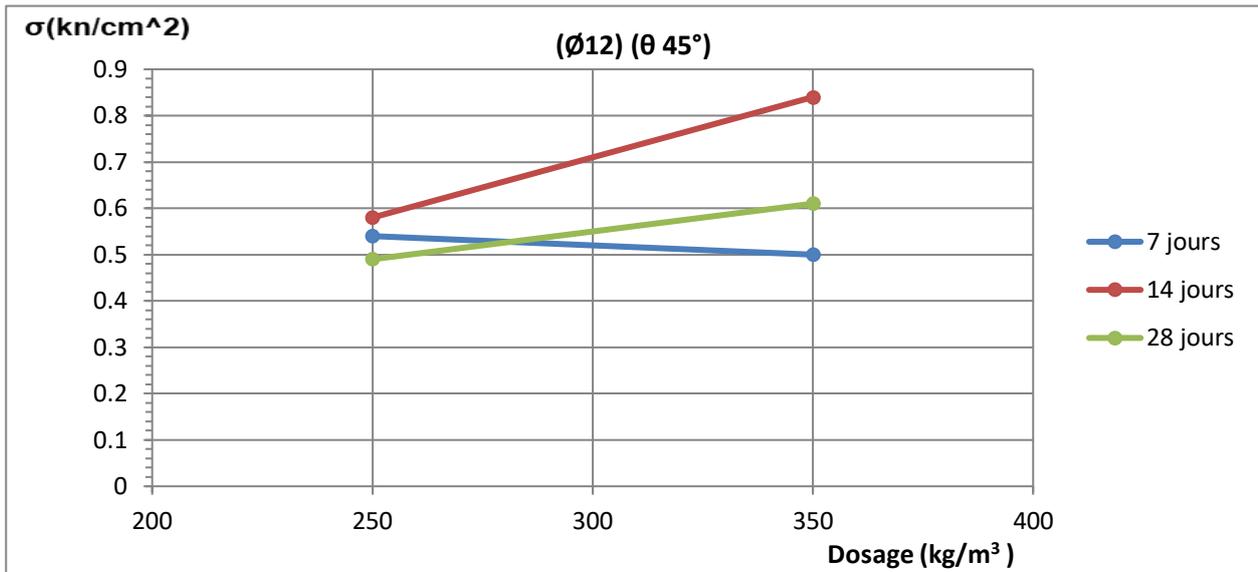
Figures III.23 : σ en fonction de Dosage pour l'âge (14) jours



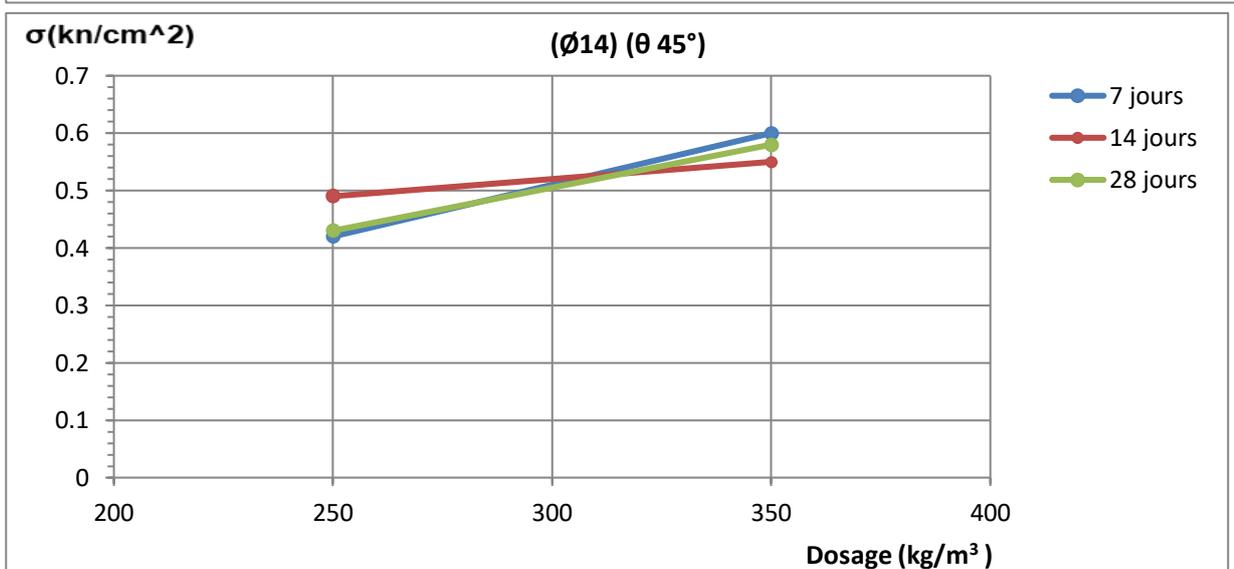
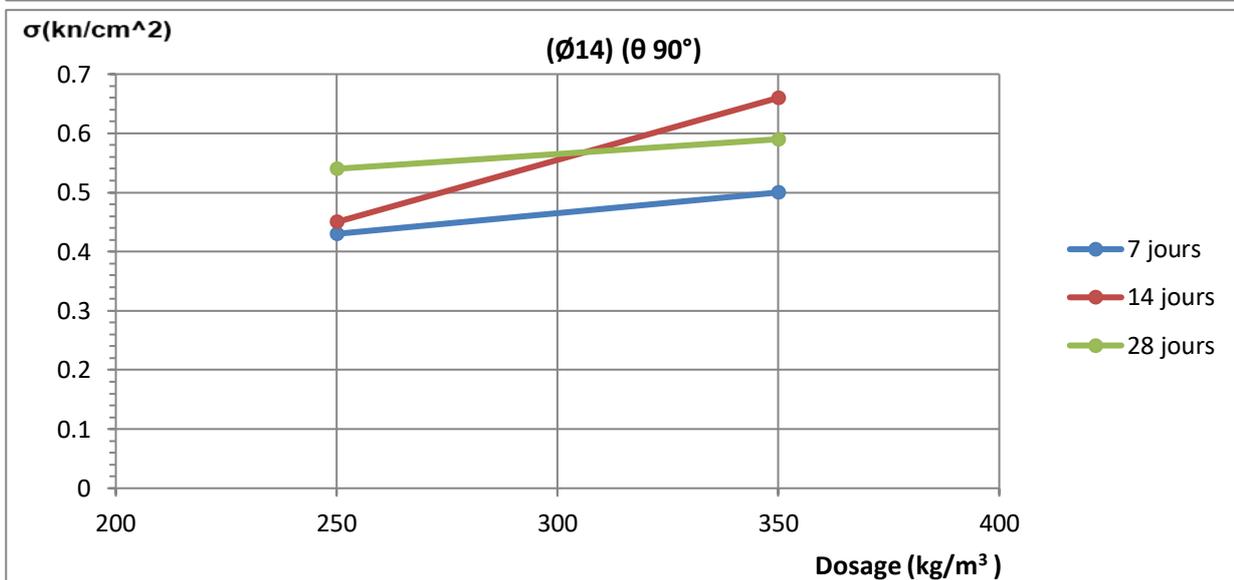
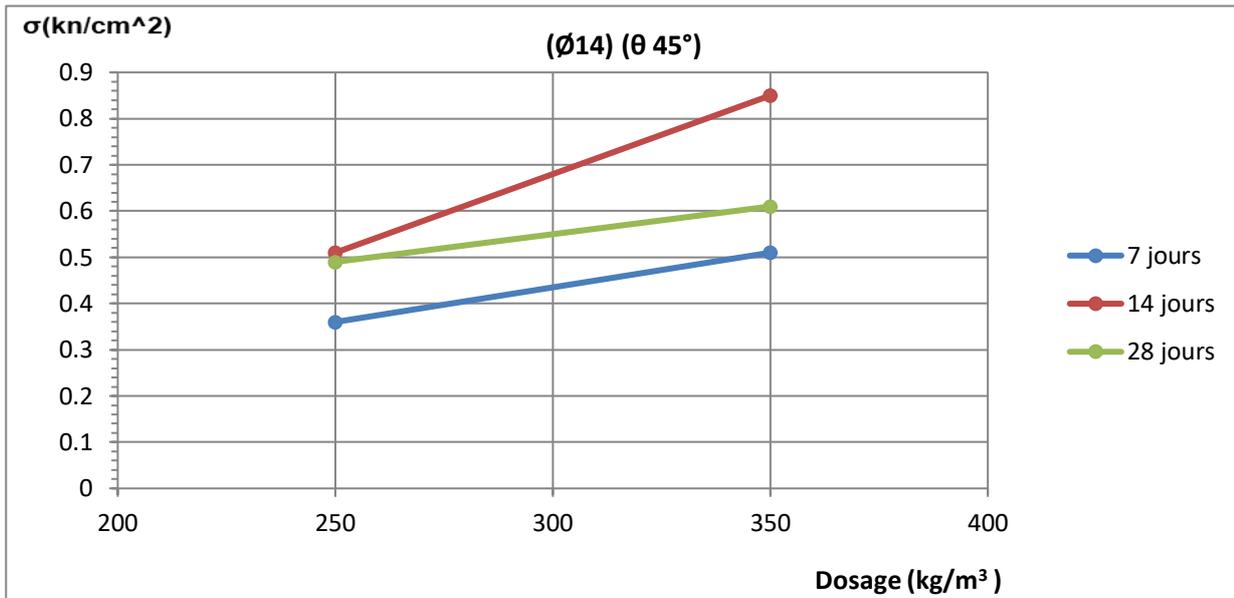
Figures III.24 : σ en fonction de Dosage pour l'âge (28) jours



Figures III.25 : σ en fonction de Dosage pour diamètre (Ø8)



Figures III.26 : σ en fonction de Dosage pour diamètre (Ø12)



Figures III.27 : σ en fonction de Dosage pour diamètre (Ø14)

Chapitre IV
Analyse des résultats

IV) Analyse des résultats

IV.1) Tableaux comparatif (expérimental / analytique)

Afin de comparer les résultats du calcul et les résultats de l'expérience, nous avons choisi un tableau qui comprend tous les cas et possibilités qui peuvent être analysés et comparés.

IV.1.1) Pour le dosage 250 kg/m³

Tableau IV.1 : Tableau comparatif (expérimental / analytique)

250																	
θ	Ø	age	σ		Ø	θ	age	σ		age	θ	Ø	σ				
			EX	AN				EX	AN				EX	AN			
45	8	7	0.32	0.23	8	45	7	0.32	0.23	7	45	8	0.32	0.23			
		14	0.34	0.24			14	0.34	0.24			12	0.54	0.32			
		28	0.42	0.25			28	0.42	0.25			14	0.36	0.36			
	12	7	0.54	0.32		90	7	0.29	0.32		90	8	0.29	0.32	8	0.29	0.32
		14	0.58	0.32			14	0.37	0.32			12	0.39	0.44			
		28	0.51	0.32			28	0.37	0.32			14	0.43	0.50			
	14	7	0.36	0.36		180	7	0.25	0.19		180	8	0.25	0.19	8	0.25	0.19
		14	0.51	0.35			14	0.29	0.22			12	0.2	0.19			
		28	0.49	0.37			28	0.31	0.24			14	0.42	0.19			
	90	8	7	0.29	0.32	12	45	7	0.54	0.32	14	45	8	0.34	0.24		
			14	0.37	0.32			14	0.58	0.32			12	0.58	0.32		
			28	0.37	0.32			28	0.51	0.32			14	0.51	0.35		
12		7	0.39	0.44	90		7	0.39	0.44	90		8	0.37	0.32	8	0.37	0.32
		14	0.65	0.44			14	0.65	0.44			12	0.65	0.44			
		28	0.48	0.44			28	0.48	0.44			14	0.45	0.53			
14		7	0.43	0.50	180		7	0.2	0.19	180		8	0.29	0.22	8	0.29	0.22
		14	0.45	0.53			14	0.47	0.22			12	0.47	0.22			
		28	0.54	0.49			28	0.49	0.24			14	0.49	0.22			
180		8	7	0.25	0.19	14	45	7	0.36	0.36	28	45	8	0.42	0.25		
			14	0.29	0.22			14	0.51	0.35			12	0.51	0.32		
			28	0.31	0.24			28	0.49	0.37			14	0.49	0.37		
	12	7	0.2	0.19	90		7	0.43	0.50	90		8	0.37	0.32	8	0.37	0.32
		14	0.47	0.22			14	0.45	0.53			12	0.48	0.44			
		28	0.49	0.24			28	0.54	0.49			14	0.54	0.49			
	14	7	0.42	0.19	180		7	0.42	0.19	180		8	0.31	0.24	8	0.31	0.24
		14	0.49	0.22			14	0.49	0.22			12	0.49	0.24			
		28	0.43	0.24			28	0.43	0.24			14	0.43	0.24			

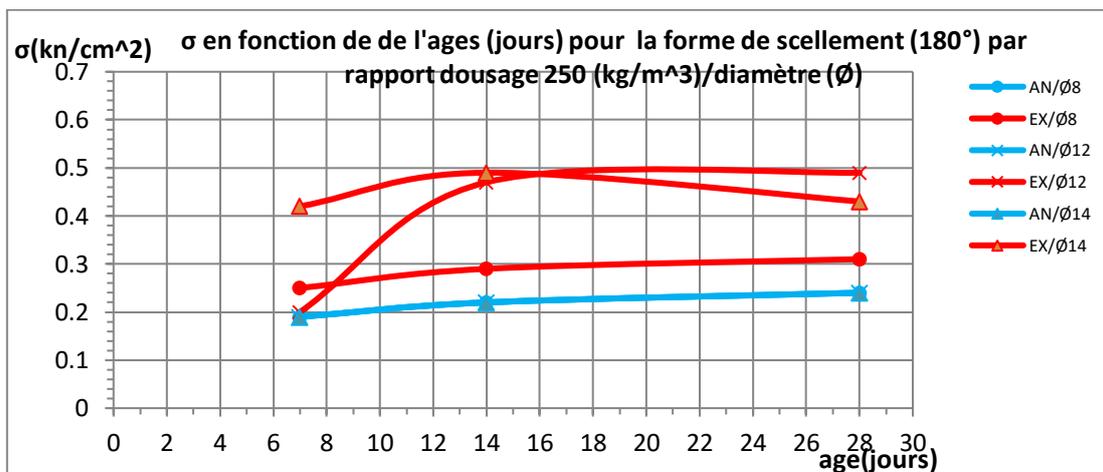
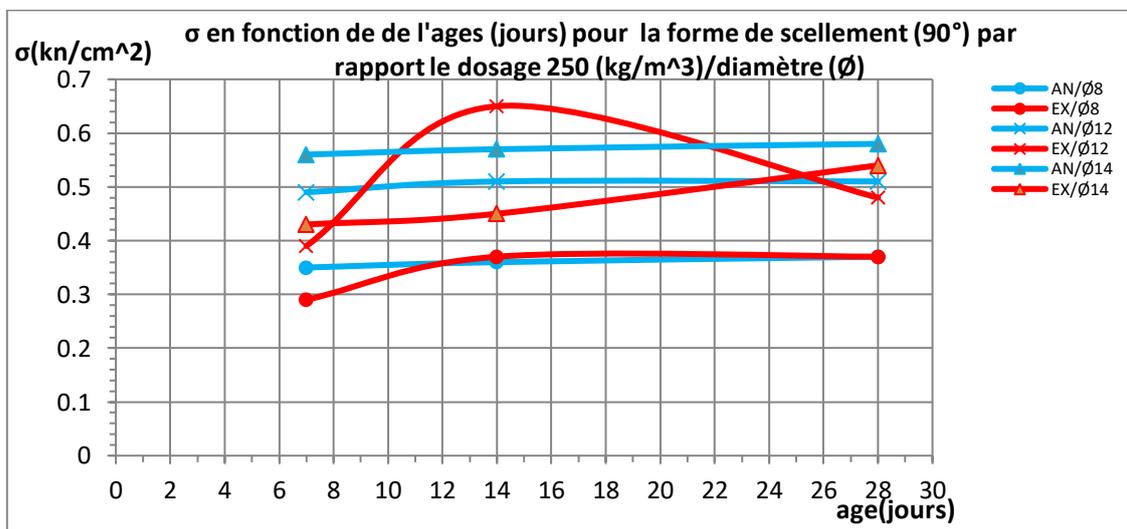
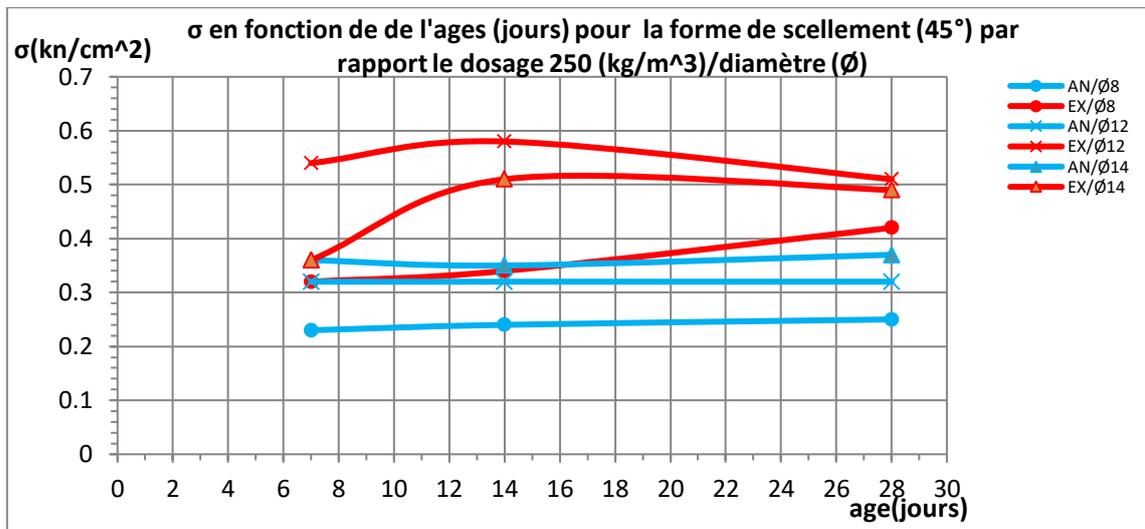
IV.1.2) Pour le dosage 350 kg/m³

Tableau IV.2 : Tableau comparatif (expérimental / analytique)

350																	
θ	Ø	age	σ		Ø	θ	age	σ		age	θ	Ø	σ				
			EX	AN				EX	AN				EX	AN			
45	8	7	0.74	0.24	8	45	7	0.74	0.24	7	45	8	0.74	0.24			
		14	0.74	0.25			14	0.74	0.25			12	0.5	0.34			
		28	0.74	0.26			28	0.74	0.26			14	0.51	0.35			
	12	7	0.5	0.34		90	7	0.78	0.32		90	8	0.78	0.32	8	0.78	0.32
		14	0.84	0.33			14	0.77	0.33			12	0.6	0.44			
		28	0.61	0.31			28	0.74	0.33			14	0.5	0.50			
	14	7	0.51	0.35		180	7	0.58	0.22		180	8	0.58	0.22	8	0.58	0.22
		14	0.85	0.34			14	0.85	0.25			12	0.56	0.22			
		28	0.61	0.34			28	0.77	0.28			14	0.58	0.22			
	90	8	7	0.78		0.32	12	45	7		0.5	0.34	14	45	8	0.74	0.25
			14	0.77		0.33			14		0.84	0.33			12	0.84	0.33
			28	0.74		0.33			28		0.61	0.31			14	0.85	0.34
12		7	0.6	0.44	90	7		0.6	0.44	90	8	0.77		0.33	8	0.77	0.33
		14	0.66	0.44		14		0.66	0.44		12	0.66		0.44			
		28	0.61	0.43		28		0.61	0.43		14	0.66		0.51			
14		7	0.5	0.50	180	7		0.56	0.22	180	8	0.85		0.25	8	0.85	0.25
		14	0.66	0.51		14		0.76	0.25		12	0.76		0.25			
		28	0.61	0.50		28		0.54	0.28		14	0.55		0.25			
180		8	7	0.58	0.22	14		45	7	0.51	0.35	28		45	8	0.74	0.26
			14	0.85	0.25				14	0.85	0.34				12	0.61	0.31
			28	0.77	0.28				28	0.61	0.34				14	0.61	0.34
	12	7	0.56	0.22	90		7	0.5	0.50	90	8		0.74	0.33	8	0.74	0.33
		14	0.76	0.25			14	0.66	0.51		12		0.61	0.43			
		28	0.54	0.28			28	0.61	0.50		14		0.61	0.50			
	14	7	0.6	0.22	180		7	0.6	0.22	180	8		0.77	0.28	8	0.77	0.28
		14	0.55	0.25			14	0.55	0.25		12		0.54	0.28			
		28	0.58	0.28			28	0.58	0.28		14		0.58	0.28			

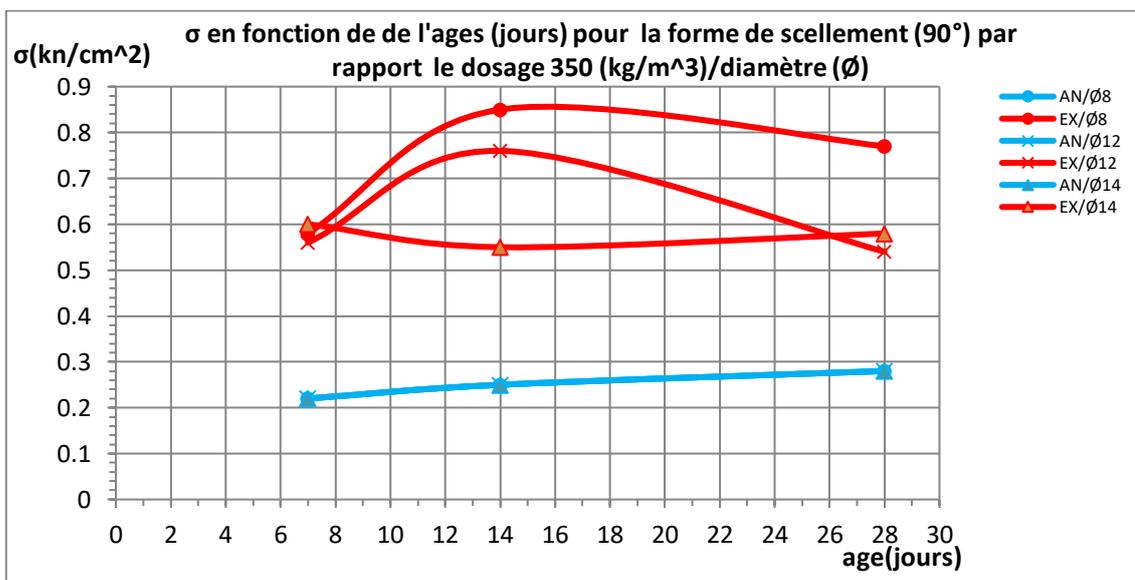
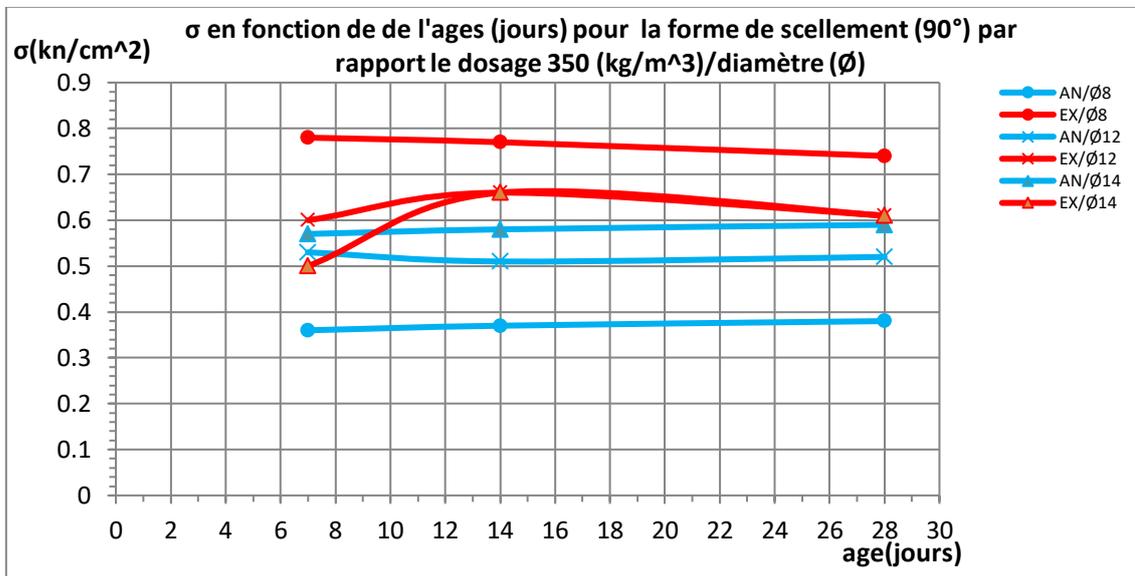
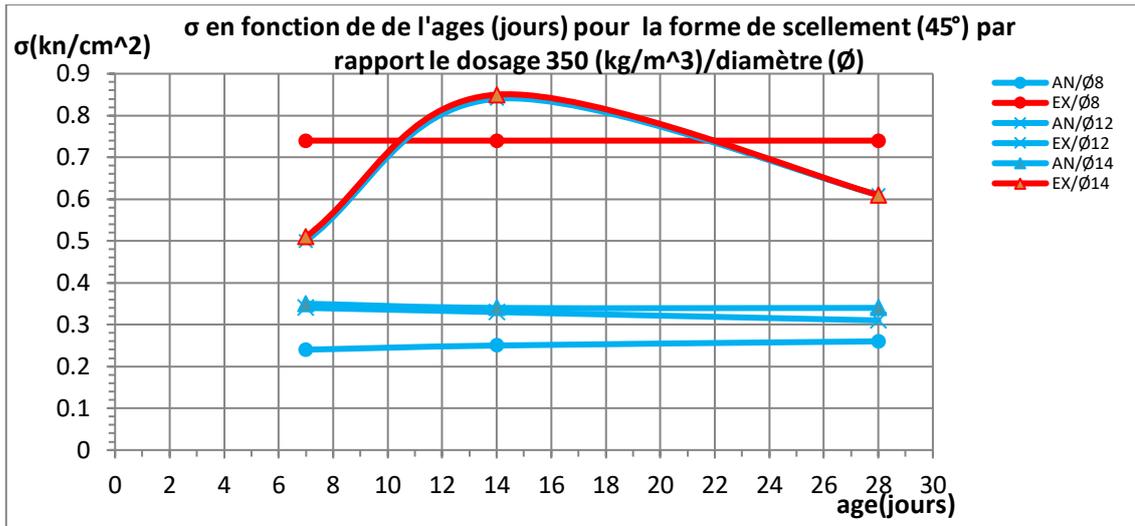
IV.2) Courbes comparatives

IV.2.1) Pour le dosage 250 kg/m³



Figures IV.1: σ en fonction des âges

IV.2.2) Pour le dosage 350 kg/m³



Figures IV.2 : σ en fonction des âges

IV.3) Conclusions

Dans ce travail (malgré les conditions défavorables) le phénomène de l'adhérence a été étudié par :

- Une voie analytique pour déterminer les valeurs limites des forces et également les valeurs des contraintes.
- Une deuxième voie expérimentale pour tester à travers l'essai d'arrachement l'adhérence de chaque barre enfoncée d'un massif de béton.

Par la suite un travail de comparaison a été mené.

Les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- 1) La conclusion majeure qu'on a tiré suite à notre étude est que quelque soit les combinaisons les valeurs expérimentaux sont importantes et supérieures à celles obtenues analytiquement.
- 2) le paramètre d'adhérence est lié à plusieurs paramètres entre autres : le dosage, le scellement, le diamètre des aciers.
- 3) chaque paramètre influe de sa façon sur le comportement de l'adhérence.
- 4) En comparant l'influence du dosage sur l'adhérence, on a confirmé que le dosage 350 kg/m^3 donne de meilleurs résultats que celui de 250 kg/m^3 .
- 5) au cours des essais expérimentaux toutes les éprouvettes ont présenté un état de destruction brutale c'est-à-dire que l'adhérence se dégrade sans présenter d'avertissement.
- 6) Concernant l'influence du type d'ancrage sur l'adhérence, on s'est assuré que l'ancrage rectiligne donne des résultats faible par rapport au l'ancrage par courbure.
- 7) On sait que la dureté et la résistance du béton à la compression augmentent dès le premier jour de collage jusqu'à ce qu'il atteigne son maximum au jour 28 puis commence à diminuer lentement, mais selon notre étude , l'âge de 14 jours a donné de meilleures valeurs que l'âge de 28 jours pour les deux types de dosage.

IV.4) Perspectives

Quelque soit l'effort fourni, un travail de recherche demeure incomplet au cours du temps ce qui nécessite des renforcements et des mise à jours; Notre travail n'pas fini malgré les résultats qu'on a jugés satisfaisants ce qui nous donne la possibilité de fixes quelques perspectives et éventuellement des recommandations.

- Renforcer l'étude par un calcul numérique.
- Considérer un mode chargements cyclique et de ne pas se limiter au mode monotone.
- Plusieurs paramètres concernant les composantes de béton armé peuvent être également aux analysés (type de liant, condition atmosphériques, le gel et le dégel...etc).

ANNEXE

ANNEXE [14]**1) Les propriétés physiques****A- Masse Volumique:**

$$\rho = \frac{M_1}{V}$$

- **V:** volume du récipient.
- **M₀:** Masse du récipient vide.
- **M₁:** Masse du sable.

1- Sable carrière:

$$M_0=280g \quad M_1= 1637g \quad V= 1 \text{ Litre}$$

$$\rho = 1637 \frac{g}{cm^3} = 1.637 \text{ kg/m}^3$$

2-Gravier ordinaire:**(8-15)∅**

$$M_0= 280g \quad M_1= 1440g \quad V=1L$$

$$\rho = 1440 \frac{g}{cm^3} = 1.44 \text{ kg/m}^3$$

(15-25)∅

$$M_0= 280g \quad M_1= 1332g \quad V= 1L$$

$$\rho = 1332 \frac{g}{cm^3} = 1.332 \text{ kg/m}^3$$

B-Masse spécifique :

Sable : $300/119=2521 \text{ kg/m}^3$

Gravie ordinaire :

8-15∅ : $500/191.2=2615 \text{ kg/m}^3$

15-25∅ : $500/189.4=2640 \text{ kg/m}^3$

C-Absorption d'eau:

$$A = (M_1 - M) * 100\% \frac{M_1}{M}$$

- M_1 : Masse de l'échantillon saturé.
- M : Masse de l'échantillon sec.

- Gravier ordinaire (8-15)∅ :**(8-15)∅**

$$M_1 = 500 \text{ g} \quad M = 494 \text{ g}$$

$$A = 1.2\% < 5\%$$

(15-25)∅

$$M_1 = 500 \text{ g} \quad M = 494 \text{ g}$$

$$A = 1.2\% < 5\%$$

Temps d'absorption d'eau : 24h

D-Propriété de sable (équivalent de sable):

$$Es = \frac{h_1}{h_2} \times 100\%$$

- M : masse de l'échantillon du sable $m = 120 \text{ g}$.
- h_1 : hauteur de sable lavé.
- h_2 : hauteur de sable lavé avec l'élément fin.

Sable :

Hauteur Total H_1	Hauteur du Sable visible H_2	ES (%) = $(h_2 \times 100) / H_1$	ES %
10.4	7.6	73.1	75
10.2	7.9	77.5	

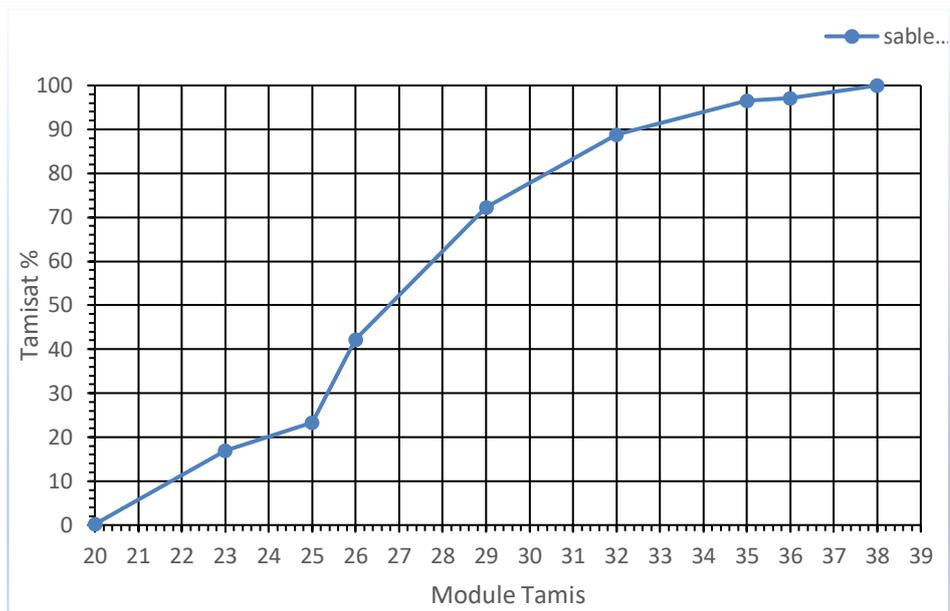
Désignation : granulats ordinaires :

Classe 0/5 (Sable roulé):

Poids utilisé Pour l'essai (g)	Diamètre Tamis (mm)	Module Tamis	Poids Du refus Partiels	Poids refus cumulé	Pourcentage Refus cumulés	Complément A 100 des refus cumulés
2000	5	38	0	0	0	100
	3.15	36	58.50	58.50	2.93	97.07
	2.5	35	11.00	69.50	3.48	96.52
	1.25	32	154.90	224.40	11.22	88.78
	0.63	29	330.19	554.59	27.73	72.27
	0.315	26	602.00	1156.59	57.83	42.17
	0.20	25	377.40	1533.99	76.70	23.30
	0.16	23	127.09	1661.08	83.10	16.90
	0.080	20	321.36	1982.44	99.12	0.88

Module de finesse :

$$Mf = \sum_{0.16}^{2.5} \frac{\text{réfus cumulés}\%}{100} = \frac{260.06}{100} = 2.60$$



Correction du module de finesse du sable :

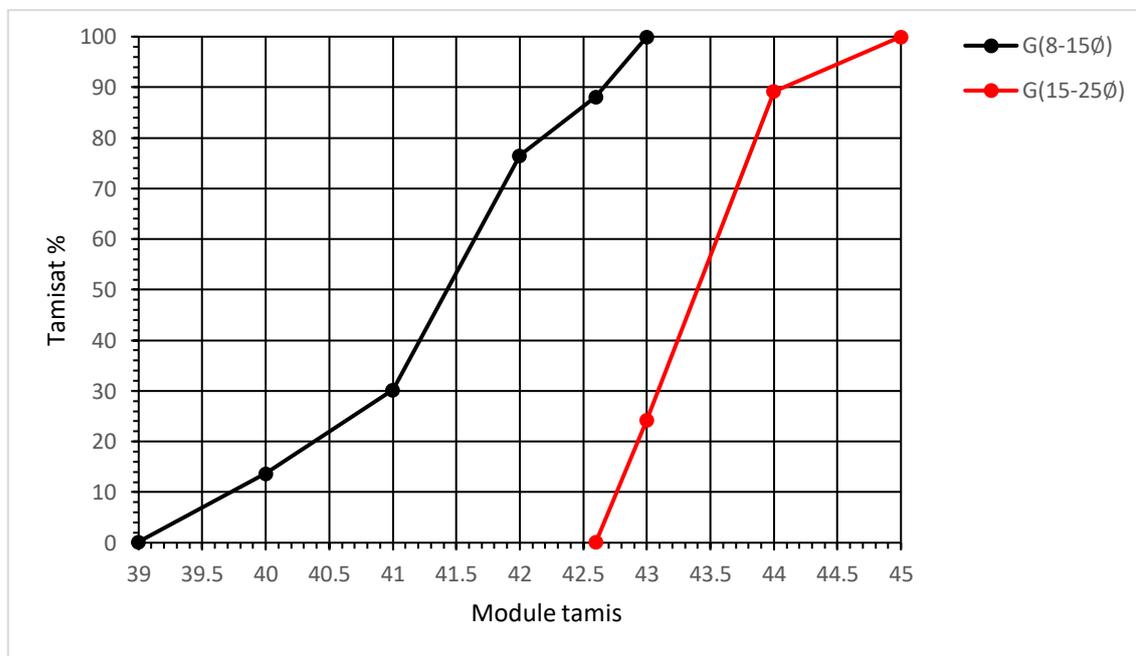
1. Granularité de gravier naturel :

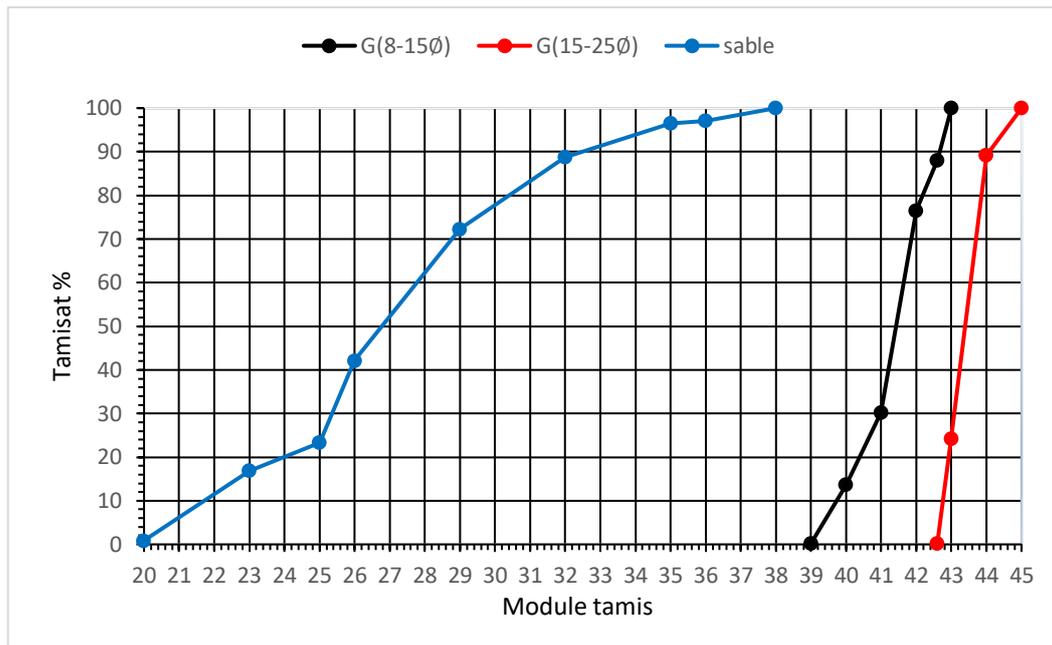
(8 – 15)Ø

Poids utilisé Pour l'essai (g)	Ouverture (mm)	Module Tamis	Poids Du refus Cumulé	Pourcentage Refus Cumulé	Complément A 100 des Refus Cumulés
5000	16	43	0	0	100
	14	42.6	595	11.90	88.10
	12.5	42	1175	23.50	76.50
	10	41	3490	69.80	30.20
	8	40	4315	86.30	13.70
	6.30	39	4990	99.8	0.20

(15 – 25)Ø

Poids utilisé Pour l'essai (g)	Ouverture (mm)	Module Tamis	Poids Du refus Cumulé	Pourcentage Refus Cumulé	Complément A 100 des Refus Cumulés
5000	25	45	0	0	100
	20	44	540	10.80	89.20
	16	43	3790	75.80	24.20
	14	42.6	4990	99.80	0.20



Analyse granulométrique

Méthode de composition du béton :

La méthode de « Dreux-Gorisse » :

Composition du béton à base de granulats naturels BGN :

Données de bases :

-Dimension maximale des granulats $D = 25\text{mm}$

-Granulats (graviers concassés et sable roulé) de trois classes :

- Sable (0/5)
- Gravier (8/15)
- Gravier (15/25)

-Coefficient granulaire : $G=0.5$

Le rapport $(E/C) = 0.5$ $E = 350 \times 0.5 = 175 L$

• Caractéristiques du sable :

-Equivalent de sable $ES = 75\%$

-Module de finesse $MF = 2.60$

Evaluation de l'ouvrabilité :

-Plasticité : béton ferme

-Serrage : bonne vibration

-Affaissement A en cm : 3 à 5

-Nombre de chocs : 15 à 25

• Valeur du terme correcteur (K) :

-Vibration : normale

-Forme de granulats : concassé

-Dosage en ciment : 350 kg/m^3

→ $K = 0$

• Coefficient de compacité :

-Consistance : ferme

-Serrage : bonne vibration

- $D = 25$

-Coefficient de compacité : $\gamma = 0,837$

-Sable et gravier concassé → correction : $-0,03$

→ $\gamma = 0,807$

Tracé des courbes :

• Courbe granulométrique :

Sur un graphique granulométrique type AFNOR, on trace les courbes granulométriques de chaque classe.

On porte les divers pourcentages des tamis en ordonnée et en abscisse les dimensions des tamis.

• Courbe de référence :

-Point n°01 B : $X = D = 25$

$Y = 100\%$.

-Point n°02 A : $X = (45 + 38)/2 = 41.5$

$Y = 50 - \sqrt{D} + K + K_s$

-Sable jaune

-Vibration normale

$$-C = 350 \text{ kg/m}^3$$

$$\rightarrow K = 2$$

$$K_s = 6M_f - 15 \text{ et } M_f = 2.60$$

$$\rightarrow K_s = 0.6$$

$$Y = 50 - \sqrt{25} + 2 + 0.6$$

$$Y = 47.6$$

$$\text{-Point } n^{\circ}03 \text{ O: } X = 0,08$$

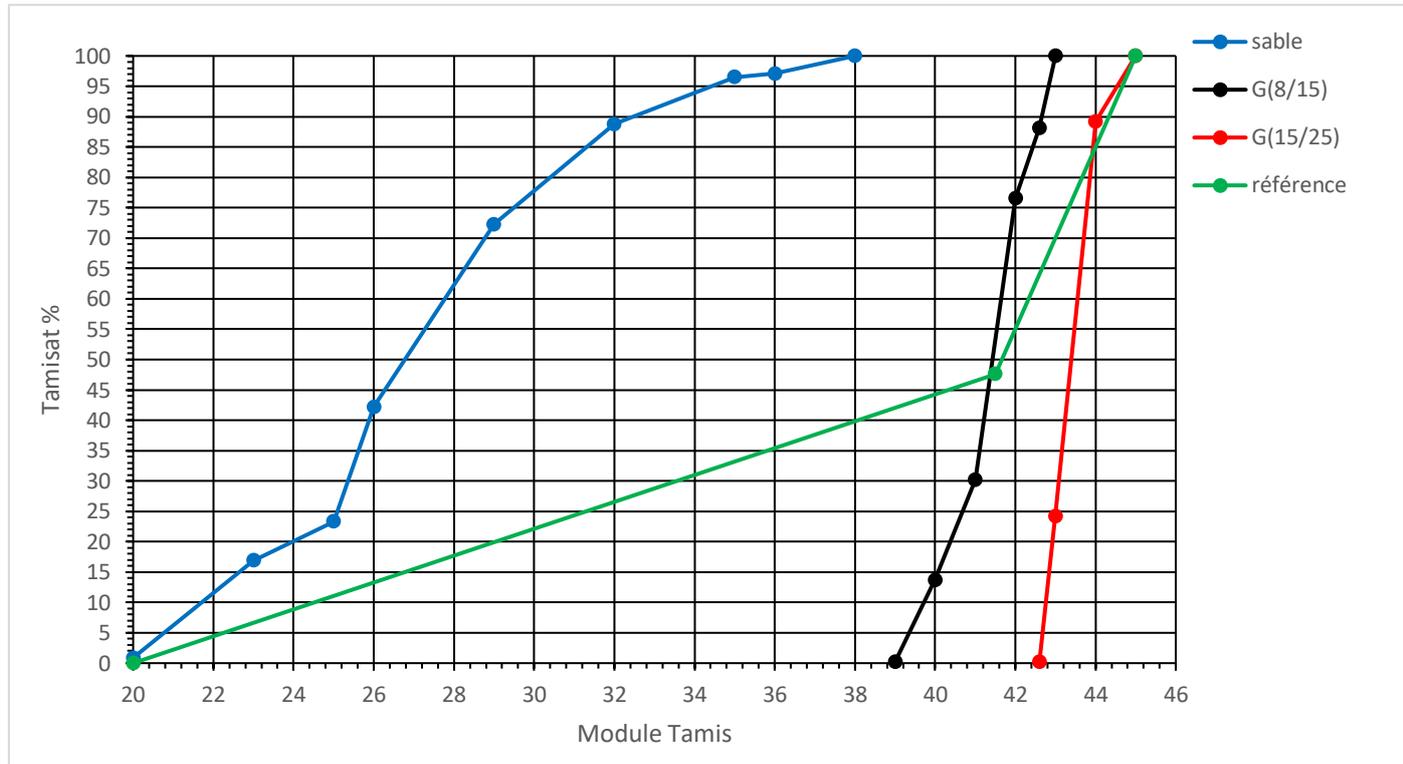
$$Y = 0.00$$

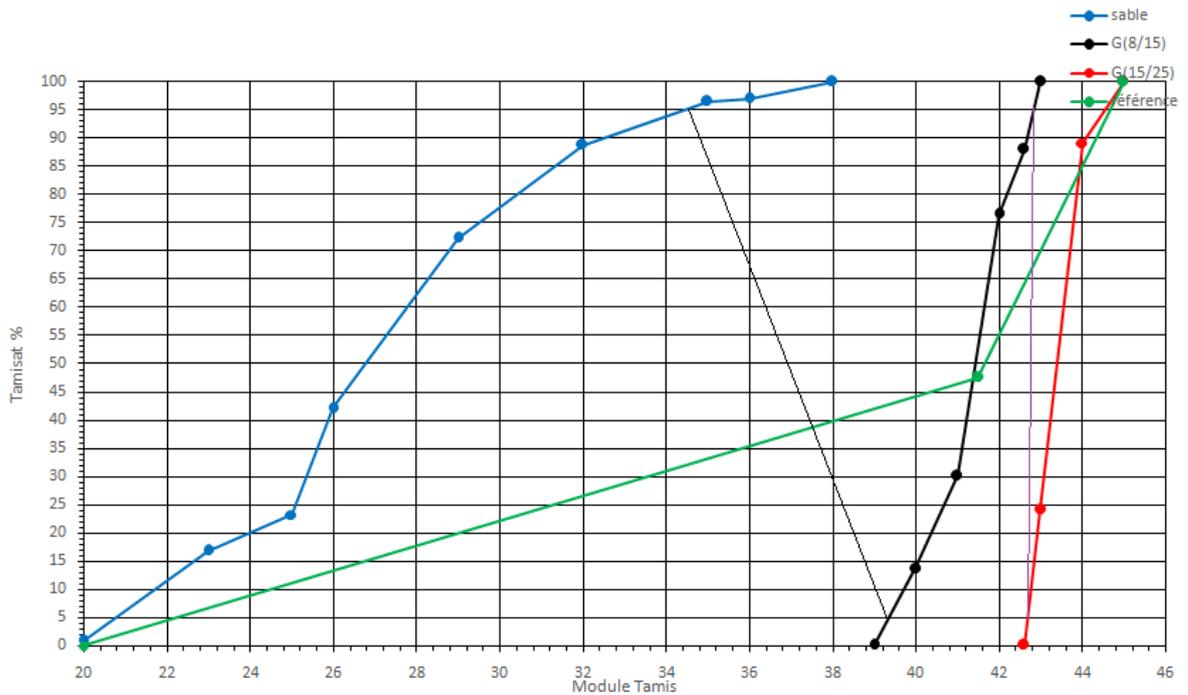
• Courbe de mélange :

Avec les pourcentages pondéraux, on compose la courbe de mélange.

Ouverture (mm)	Module Tamis	Pourcentage Sable	Pourcentage (8/15)G	Pourcentage)25/15(G
25	45			100
20	44			89.20
16	43		100	24.20
14	42.6		88.10	0.20
12.5	42		76.50	
10	41		30.20	
8	40		13.70	
6.30	39		0.20	
5	38	100		
3.15	36	97.07		
2.5	35	96.52		
1.25	32	88.78		
0.63	29	72.27		
0.315	26	42.17		

0.20	25	23.30		
0.16	23	16.90		
0.080	20	0.88		





Poursontage du les granulats:

S=39%

G1=28%

G2=33%

•Volume absolu du ciment:

$$\text{Ciment: } c = C/3.1 = 112.9 \text{ l/m}^3$$

•Volume absolu des granulats:

$$\text{Sable + Gravillon + Gravier : } V = 1000\gamma - c$$

$$V = 1000 * 0.807 - 112.9 = 694.1 \text{ l/m}^3$$

•Volume absolu du sable: $v_1 = V \cdot \% \text{ sable}$

$$v_1 = 694.1 * (39/100) = 270.70 \text{ l/m}^3$$

•Volume absolu du gravillon (8/15) : $v_2 = V \cdot \% \text{ gravier}$

$$v_2 = 694.1 * (28/100) = 194.35 \text{ l/m}^3$$

•Volume absolu du gravillon (15/25) : $v_3 = 33\% V \text{ gravier}$

$$v_3 = 694.1 * (33/100) = 229.05 \text{ l/m}^3$$

- Dosage pondéral des granulats (pour 1 m³ de béton):

- **Sable**

$$S = v_1 * \gamma_s$$

$$\text{Sable} = 270.70 * 2.521 = 682.4347 \text{ kg/m}^3$$

- **(8/15)Ø**

$$G = v_2 * \gamma_G$$

$$\text{Gravier} = 194.35 * 2.615 = 508.22525 \text{ kg/m}^3$$

- **(15/25)Ø**

$$G = v_3 * \gamma_G$$

$$\text{Gravier} = 229.05 * 2.640 = 604.692 \text{ kg/m}^3$$

Masse pour 0.108 m³ (54 éprouvettes).

250kg/m ³	350kg/m ³
Ciment 350 *0.054= 13.50 kg	Ciment 350 *0.054= 18.90 kg
Eau 175*0.054= 9.45 L	Eau 175*0.054= 9.45 L
Sable 682.4347*0.054= 36.85 kg	Sable 682.4347*0.054= 36.85 kg
8/15 508.22525*0.054= 27.44 kg	8/15 508.22525*0.054= 27.44 kg
15/25 604.692*0.054= 32.653 kg	15/25 604.692*0.054= 32.653 kg

Références bibliographiques

- [1] Techniques Du Bâtiment 1125 L'adhérence béton – acier Mars 2006
- [2] cours B.A chapitre 3 adhérence acier- béton <https://doc-genie-civil.com/adherence-acier-beton/>
- [3] Explication de l'adhérence des armatures à l'intérieur du béton {
<https://www.4geniecivil.com/2016/06/explication-de-ladherence-des-armatures-avec-le-beton.html> }
- [4] Techniques Du Bâtiment 1125 L'adhérence béton – acier Mars 2006
- [5];[6] Eurocode 2 et Cours de béton armé de J.P. Guissart, Institut Gramme, 2000
- [7] ,[8] ,[9] BAEL 91 ver 99
- [10] EUROCODE 2
- [11], [12] (BAEL/CBA93, A.6.1.25) , cours B.A chapitre 3 adhérence acier- béton
<https://doc-genie-civil.com/adherence-acier-beton/>
- [13] https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Flearning-deprecated.univ-annaba.dz%2Fpluginfile.php%2F43308%2Fmod_resource%2Fcontent%2F0%2FBA%2520TD%2520N%25C2%25B0%25205.doc&wdOrigin=BROWSELINK
- [14] (mémoire de master 2021/2022 encadré par docteur Hmidane H)