

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Université SAAD DAHLEB, BLIDA
البلدية - جامعة سعد دحلب

Faculté des sciences de l'ingénieur
كلية العلوم الهندسية

Département de Génie civil
دائرة الهندسة المدنية

THEME

**ETUDE COMPARATIVE DES PERTES
DE PRECONTRAINTE
PAR DIFFERENTS CODES**

Mémoire

Pour L'obtention du Diplôme de Magistère
en Génie Civil

Option : Constructions Civiles et Industrielles

Présenté par

Melle BOUCHERIT DALILA.

Mai 2002

ملخص

إن ضياع الإجهاد يشكل خسارة كبرى ليس فقط على خصائص الفولاذ و لكن أيضا ه يؤدي إلى تدهور حالة التأثيرات للخرسانة، و بالخصوص إذا تعلق الأمر بالضياع الطويل المدى.

إن التقييم الدقيق للضياع يعتبر مرحلة مهمة لحساب البناءات. إن حساب القيم الأولية و النهائية لقوة الإجهاد تتطلب تقدير دقيق لهذا الضياع، هذا الأخير يتطلب تحليل أكثر دقة، خاصة في حساب الضياع الطويل المدى الذي هو أكثر تعقيدا من الضياع الآني.

الهدف الأساسي من هذه الدراسة هو مقارنة ضياع الإجهاد المحسوب بعدة طرق مختلفة: **ACI-92, ECO2-92, BPEL-91, PCI-75** ، و نظرا لاختلاف أساليب الحساب المقترحة من طرف هذه الطرق ، قمنا بمقارنة الضياع اعتمادا على نتائج دراستين تجريبيتين أجريتا في مخبر و على قياسات أنجزت على جسر قام بها باحثون آخرون. تم من خلال هذه الدراسة تحليل تأثير بعض العوامل مثل عمر الخرسانة أثناء عملية الإجهاد، فترة العلاج، نسبة رطوبة المحيط، نسبة الماء/الإسمنت، نسبة الحصى/الإسمنت و كذا طبيعة الحبيبات.

النتائج المحصل عليها أظهرت أهمية إدخال بعض العوامل المتعلقة بظروف عملية الإجهاد و مركبات الخرسانة. إضافة إلى ذلك تم تقدير مجالات اختلاف الطرق المقترحة في حساب ضياع الإجهاد الطويل المدى و من خلال النتائج التجريبية حددت هذه الفوارق.

و في الأخير تم اقتراح برنامج لحساب الضياع باستعمال طريقة **ACI-92** و بالاعتماد على مبدأ خطوة بخطوة.



Résumé

Les pertes de la précontrainte constituent un inconvénient majeur, non seulement en raison de la perte de certaines caractéristiques de l'acier qui en résulte, mais encore parce qu'elles conduisent à une aggravation de l'état de sollicitation du béton, en particulier dans le cas des pertes différées.

La prévision aussi exacte que possible des pertes de précontrainte est donc une étape essentielle pour le calcul des ouvrages. En effet le calcul des valeurs initiales et finales de la force de précontrainte exige une évaluation précise de ces pertes, et en particulier la détermination des pertes différées qui sont plus complexes, que les pertes.

Le but principal de cette étude étant la comparaison des pertes de précontrainte calculées à partir de différentes méthodes relative au codes; ACI-92, BPEL-91, ECO2-92, et PCI-75, et ce en raison des différences dans les approches adoptées par ces codes. L'étude comparative est basé sur les résultats de deux études expérimentales réalisés en laboratoire et des mesures effectués sur un pont par d'autres chercheurs. L'influence de certains paramètres tels que : l'âge du béton au moment de la mise en tension, la période de cure, l'humidité relative de l'environnement, les rapport E/C et G/S ainsi que la nature des granulats a été analysée.

Les résultats obtenus ont permis de montrer l'intérêt d'introduire, dans le calcul des pertes différées, certains facteurs liés aux conditions de mise en tension et à la composition du béton. Par ailleurs, l'étude comparative a permis d'évaluer l'impact des différentes méthodes proposées dans le calcul des pertes différées et à travers les résultats expérimentaux de vérifier les écarts obtenus par ces différentes approches.

Un logiciel de calcul des pertes par la méthode de ACI sur la base de la méthode pas à pas est aussi proposé.

Summary

Prestress Losses not only causes the loss of some steel characteristics, but they also lead to the increase of stress on concrete, particularly with the long term losses.

The precise estimation of prestress losses is essential for the design of buildings. The calculation of the initial and final values of the prestress force requires a precise assessment of prestress and in particular the final losses, which are more important and more difficult to calculate than the instantaneous losses.

The purpose of our work is to compare between prestress losses calculated by four methods; ACI-92, BPEL-91, ECO2-92, and PCI-75. and this differences in approaches adopted by these codes. The comparative study is based on results of two experimental laboratory studies and insitu measurements of a bridge realized by other researchers. The effect of the age of the concrete at the time of prestress, the period of curing, the relative humidity of the environment, the Water/Cement ratio and Gravel/Sand as well as the nature of aggregates was analyzed.

The results obtained permitted to show the need to introduce, in the calculation of long term losses, some factors such as tensioning condition and the composition of the concrete. In addition, the comparative studies permitted to compare the different method proposed in the calculation of long term prestress losses as compared to the experimental.

A software of prestress losses calculation by the ACI code based on step by step method is also proposed.

Remerciements

Au terme de ce travail je tiens à remercier en premier lieu dieu miséricordieux qui m'a donné la force à achever cette réalisation et nous lui rendons grâce.

Mes remerciements vont en premier lieu à Docteur BOUKENDAKDJI MUSTAPHA Maître de conférence à l'institut de Génie Civil de l'université de Blida, pour m'avoir dirigé et suivi, et pour ses précieux conseils, qu'il n'a cessé de me prodiguer.

Je tiens à remercier, plus particulièrement Dr SAID KENAÏ Maître de conférence, pour m'avoir accepté de suivre et diriger le reste du travail, et surtout d'avoir apporté une attention toute particulière à la correction de mon manuscrit.

Je remercie également tous les membres de jury composé de Dr N. BOURAHLA Maître de conférence à l'université de Blida, Dr L. AZZOUC Maître de conférence à l'université de Laghouat, Dr A. BRAHMA Maître de conférence à l'université de Blida, et Dr A. HADJ ARAB Chargé de court à l'université de Blida pour avoir accepté à examiner ce mémoire.

Mes remerciements vont aussi à M^r le chef de département de génie civil Dr B. Menadi, et à tous les enseignements du département de génie civil.

En fin, et à cette occasion, il m'est très agréable de pouvoir présenter ici, mes remerciements les plus profonds, à M^r Z.OULDZMIRLINE et toutes les personnes, qui de près ou de loin ont m'aidé à la réalisation de cette thèse.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à ceux qui me sont les plus chers au monde, mes parents, en signe de reconnaissance pour tous leurs sacrifices, amour et soutient consacrés à ma réussite et que je leur souhaite une longue vie.

A mes chers frères, surtout : Aboubaker, Abd-El Karim et Ismaïl

A ma chère sœur.

A toutes mes amies (s) sans exception.

A l'équipe de service de planification du Centre Universitaire de Médéa.

A tous ceux qui ont collaboré de près ou de loin à achever ce travail.

Les Principales Notations

Notations communes entre les codes :

- α : la déviation angulaire totale du câble sur la distance x
AN : les pertes instantanées dues au glissement d'ancrage.
CR : les pertes différées dues au fluage de béton.
Es : module d'élasticité des armatures de la précontrainte.
ES : les pertes instantanées dues au raccourcissement élastique du béton
FR : les pertes instantanées dues au frottement des câbles dans le cas de la post-tension.
g : Glissement par rentrée de l'ancrage en mètre.
P : Pente moyenne de la contrainte en fonction de l'abscisse après frottement :
RE : les pertes différées dues à la relaxation des armatures.
RH : l'humidité relative de l'environnement (%)
SH : les pertes différées dues au retrait de béton.
x : la distance de la section considérée à celle des sorties des organes de mise en tension

Les notations du code BPEL :

- $\Delta\sigma_{pi}$: Les pertes instantanées.
 σ_{po} : la valeur probable de la tension à l'origine
 $\Delta\sigma_{pj}(x)$: désignant la perte de tension totale, c'est-à-dire la somme de toutes les pertes effectuées au jour j et dans la section d'abscisse x .
 $\Delta\sigma_{bj}$: désignant la variation de contrainte agissant au niveau du centre de gravité des armatures de précontrainte dans la section considérée sous les diverses actions permanentes appliquées au jour j .
 $\sigma_{pmt}(x)$: est égale à $\sigma_{pi}(x)$, tension initiale de l'armature, dans le cas de la post-tension, et à la tension à l'origine diminuée des pertes à la mise en tension dans le cas de la pré-tension
f : le coefficient de frottement en courbe (rd^{-1}) ;
 $f(t - t_1)$: loi d'évolution du fluage qui varie de 0 à 1 lorsque la durée du chargement, $(t - t_1)$, varie de 0 à l'infini.
 f_{prg} : la contrainte de rupture garantie.
 φ : le coefficient de perte de tension par unité de longueur (m^{-1})
j : l'âge du béton au moment de sa mise en précontrainte
 $K_{fl}(t_1)$: le coefficient de fluage correspondant à l'âge du chargement t_1 ,
 $k(t_1)$: dépend du durcissement du béton à l'âge de mise en charge.
 ε_r : étant le retrait total du béton.
 ε_r : la déformation finale de retrait, et $r(t)$ la loi d'évolution du retrait, qui varie de 0 à 1. lorsque le temps, t , compté à partir de la fabrication du béton, varie de zéro à l'infini.

- ε_{ic1} : la déformation conventionnelle instantanée produite par la contrainte appliquée σ_1 .
- RH : l'hygrométrie ambiante moyenne, exprimée en pourcentage d'humidité relative,
- r_m : le rayon moyen de la pièce exprimé en centimètres
- $r(t)$: Une fonction traduisant l'évolution du retrait en fonction du temps.
- ρ_h : L'hygrométrie ambiante exprimée en pourcentage d'humidité relative : dans l'eau on prend RH = 100 ;
- ρ_{1000} : la valeur garantie de la relaxation isotherme à 1 000 heures en % de la tension initiale
- t_1 : l'âge du béton, exprimé en jours, compté à partir du jour de fabrication.

Les notations du code ECO2

- α : déviation angulaire totale de 0 à x.
- $B_s(t-t_s)$: coefficient définissant le développement du retrait dans le temps.
- $B_C(t-t_0)$: exprime le développement de fluage dans le temps après le chargement.
- B_{cs} : coefficient dépend du type de ciment.
- $\delta_0(t_0)$: la contrainte appliquée à l'âge t_0 .
- $\Delta\sigma_{pr}$: pertes par relaxation des armatures
- δ_{ad} : le glissement à l'ancrage.
- δ_{cg} : la contrainte dans le béton au niveau des armatures.
- e : l'excentricité.
- $E_c(t_0)$: module statique du béton à l'âge de changement (t_0)
- ε_{sh} : la déformation du béton due au retrait.
- ε_{cs} : le retrait total à un instant t considéré peut être estimé par :
- ε_{cs0} : retrait ultime.
- f_c : la contrainte de compression dans le béton.
- f_{cm} : la contrainte de compression du béton à 28 jours.
- φ : coefficient de fluage
- $\phi_{\infty}(t_0)$: coefficient de fluage ultime
- ϕ_{re} : facteur de relaxation donné par le tableau suivant.
- k : déviation angulaire accidentelle de l'armature.
- l : longueur de l'élément précontraint.
- M : le rapport de module élastique des armatures sur le module élastique de béton.
- M_0 : moment dû au chargement.
- p : perte par frottement par mètre.
- r^2 : rapport du moment d'inertie sur la section de béton.
- REp : relaxation des armatures déterminée par la figure 2-3 :
- t : l'âge du béton (jours)
- t_0 : l'âge de l'application de la charge.
- t_s : l'âge du béton jusqu'au début de retrait.
- t_0 : l'âge du béton au moment de chargement.
- t : l'âge du béton à un moment considéré.
- μ : Coefficient de frottement.
- V/S : rapport de volume sur la surface de l'élément.

Les notations du code ACI

- E_s : module d'élasticité des armatures de la précontrainte.
 E_{ci} : module d'élasticité de béton au moment de chargement.
 f_{cpi} : la contrainte au niveau des armatures due à la force dans les armatures de la précontrainte avant la réduction des pertes (E_s , CR, SH et RE).
 f_c : la contrainte de la compression du béton au niveau des armatures juste après la mise en charge elle est exprimée par :
 $\varepsilon_{Sh}(t, t')$: le retrait à un instant t (jours) mesuré depuis l'âge t' (jours) .
 $\varepsilon_{Sh\infty}$: retrait ultime pour une cure humide ou sèche
 f_c : la contrainte de compression dans le béton.
 ϕ_{cr} : le coefficient de fluage.
 $\varepsilon_{fl}(t, t_0)$: la déformation élastique plus la déformation de fluage sous une contrainte unitaire
 σ : la contrainte appliquée à l'âge t_0
 $E_c(t_0)$: le module statique du béton à l'âge de changement (t_0)
 $\phi(t, t_0)$: coefficient de fluage est exprimé par la formule suivante :
 $\phi_{\infty}(t_0)$: coefficient de fluage ultime

Les notations du code PCI :

- AUC : fluage ultime dans le temps après le transfert de la précontrainte donné par le tableau
AUS : le retrait ultime après la fin de la cure
 f_{cr} : la contrainte dans le béton au niveau du centre de gravité des armatures due à la force de la précontrainte plus la charge permanente (poids) calculé de la même manière que ECO2.
 $f_{py} = 0,9 f_{pu}$ avec f_{pu} : force garantie ultime de l'acier
 f_{st} : contrainte dans les armatures dans le temps t_1
 f_{py} : contrainte de 1 % de l'éclatement des armatures
MCF : coefficient dépend de l'âge de mise en charge et de la période de la cure de béton
PCR : fluage ultime dans un intervalle de temps $[t_i, t_j]$, il est donné par : PSH : de retrait pendant l'intervalle du temps t_1, t_0, t ,
SCF : coefficient dépend de l'effet de la dimension de l'élément sur le fluage de béton
SSF : coefficient dépend de la dimension de l'élément donné par le tableau 2-13:
UCR : perte ultime de la précontrainte due au fluage pour une cure humide ne dépasse pas 7 jours et pour un poids normal du béton.
USH : perte ultime de la précontrainte due au retrait de béton

Sommaire

ملخص

Résumé

Summary

Remerciements

Dédicaces

Listes des principales notations

Listes des figures

Listes des tableaux

INTRODUCTION.....1

Chapitre I:

Revue bibliographique sur les pertes de précontrainte

1.1. HISTORIQUE DU BETON PRECONTRAIT	4
1.2. DEFINITION DU BETON PRECONTRAIT.....	4
1.3. LES PROCEDURES DE LA PRECONTRAINTE.....	5
1.3.1 Précontrainte par post-tension.....	5
1.3.2 Précontrainte par pré-tension.....	5
1.4. LES PERTES DE TENSION.....	7
1.4.1 Les Pertes de tension dans le cas de la précontrainte par Post tension.....	6
A. Les pertes instantanées.....	7
A.i. Les pertes dues au raccourcissement élastique	7
A.ii. Les pertes dues aux frottements du câble.....	7
A.iii. Les pertes dues au glissement d'ancrage.....	8
B Les pertes différées.....	9
1.4.2. Les pertes de tension dans le cas de la précontrainte par pré-tension.....	9
1.5. LE RETRAIT.....	9
1.5.1.Le Retrait Plastique.....	10
1.5.2. Le Retrait d'auto dessiccation.....	10
1.5.3. Le Retrait Thermique.....	11
1.5.4. La Retrait par Carbonatation.....	11
1.5.5. Facteurs Influant sur le Retrait.....	12
i. L'humidité relative de l'environnement.....	12

ii.	La période de cure.....	13
iii.	Type et classification des granulats.....	13
iv.	Rapport E/C et dosage en ciment.....	15
v.	Effet des adjuvants.....	17
vi.	Forme des pièces et armatures des ouvrages	18
1.6.	LE FLUAGE.....	20
1.6.1.	Facteur Influant le Fluage.....	21
i.	L'humidité relative de l'environnement.....	21
ii.	Rapport contrainte/résistance.....	22
iii.	L'âge du béton au moment de chargement	22
iv.	La dimension des ouvrages et le pourcentage d'armature.....	23
v.	Dosage en ciment et en eau.....	25
vi.	La température.....	25
vii.	Les adjuvants.....	26
viii.	Les granulats.....	26
1.7.	RETRAIT ET FLUAGE DE BETON A HAUTE PERFORMANCE.....	28
1.7.1.	Retrait.....	28
1.7.2.	Fluage.....	30
1.8.	RELAXATION DES ARMATURES DE PRECONTRAINTE.....	31
1.9.	ADHÉRENCE ACIER – BÉTON.....	34
1.10.	CONCLUSION.....	34

Chapitre II:

Les méthodes d'estimation des pertes de précontrainte

2.1.	INTRODUCTION.....	36
2.2.	LE CODE " BPEL-91".....	38
2.2.1.	LES PERTES DE TENSION DANS LE CAS DE LA PRECONTRAINTE PAR POST-TENSION.....	38
2.2.1.1.	Les Pertes de Tension Instantanées.....	38
i.	Les Pertes de tension par déformations élastiques du béton.....	38
ii.	Les Pertes de tension par frottement de l'armatures.....	39
iii.	Les Pertes de tension dues au glissement d'ancrage.....	40

2.2.2. PERTES DE TENSION DANS LE CAS DE LA PRECONTRAINTE PAR PRE-TENSION.....	41
2.2.2.1. Les Pertes de Tension à la Mise en Oeuvre.....	41
i. Les Pertes à la mise en tension des armatures.....	41
ii. Les Pertes entre la mise en tension des armatures et la mise en précontrainte de l'élément.....	41
iii. Les Pertes à la mise en précontrainte de l'élément.....	41
2.2.2.2. Les Pertes de Tension Différées.....	42
i. Les Pertes de tension dues au retrait du béton.....	42
ii. Les Pertes de tension dues au fluage du béton.....	43
iii. Les Pertes de tension dues à la relaxation de l'acier.....	46
2.3. LA METHODE DE "L'ECO2-92".....	48
2.3.1. Les Pertes à Court Terme.....	48
i. Les pertes dues au raccourcissement élastique (ES).....	48
ii. Les pertes dues au frottement des armatures (FR).....	49
iii. Les pertes dues au glissement d'ancrage (AN).....	50
2.3.2 Les Pertes à Long Terme.....	50
i. Les pertes de tension dues au retrait du béton (SH).....	50
ii. Les pertes de tension dues au fluage du béton (CR).....	52
iii. Les pertes de tension dues à la relaxation des armatures (RE).....	54
2.4. LA METHODE DE "ACI-92".....	55
2.4.1 Les pertes instantanées.....	55
i. Les pertes dues aux raccourcissements élastiques (ES).....	55
ii. Les pertes dues aux frottements des armatures (FR).....	56
iii. Les pertes dues au glissement d'ancrage (AN).....	56
2.4.2 Les Pertes Différées.....	57
i. Les pertes dues au retrait du béton (SH).....	57
ii. Les pertes dues au fluage du béton (CR).....	59
iii. Les pertes dues à la relaxation des armatures (RE).....	61
2.5 LA METHODE DE "PCI-75".....	63
2.5.1 Les Pertes Instantanées.....	64
i. Les pertes dues au raccourcissement élastique du béton(ES).....	64

ii. Les pertes de frottement (FR).....	64
iii. Les pertes dues au glissement d'ancrage (AN).....	64
2.5.2. Les Pertes Différées.....	64
i. Les pertes dues au retrait du béton (SH).....	64
ii. Les pertes dues au fluage du béton (CR).....	65
iii. Les pertes dues à la relaxation des armatures (RET).....	66
2.6 DUSCUSSION GENERALE.....	67
2.6.1. Les Pertes Instantanées.....	67
i. Les pertes dues au frottement des armatures.....	67
ii. Les pertes d'ancrage	68
2.6.2. Les Pertes Différées.....	68

Chapitre III :

Etude comparative des déformations et des pertes de la précontrainte

3.1. INTRODUCTION.....	70
3.2. PREMIERE ETUDE.....	71
3.2.1. L'effet de L'âge de Béton au moment de la Mise en Chargement.....	73
i. La résistance.....	73
ii. Module élastique.....	75
iii. La déformation élastique.....	76
iv. Fluage.....	77
v. Les pertes dues aux fluage et la déformation élastique	80
3.2.2. L'effet de L'humidité sur le Fluage.....	81
i. Le fluage.....	81
ii. Les pertes dues au fluage.....	87
3.2.3 L'effet de la Période de la Cure et de L'humidité sur le Retrait.....	89
i. L'effet de la période de cure.....	90
ii. L'effet de l'humidité sur le retrait.....	92
iii. Les pertes dues au retrait.....	94
3.3. DEUXIEME ETUDE.....	96
3.3.1. Présentation de l'étude.....	96

i. Caractéristiques du béton.....	96
ii. Composition des bétons.....	96
iii. Les résultats des essais de l'étude expérimentale.....	96
3.3.2. Comparaison des Résultats Expérimentaux avec ceux des Codes.....	100
3.3.2.1. Analyse de l'influence de la nature des granulats.....	100
i. Retrait.....	100
ii. Fluage.....	102
iii. Les pertes dues au retrait et au fluage.....	104
3.3.2.2. Analyse de l'influence du rapport G/S à E/C	106
i. Retrait.....	106
ii. Fluage.....	109
iii. Les pertes dues au retrait et au fluage.....	111
3.3.2.3. Analyse de l'influence du rapport E/C.....	113
i. Retrait.....	113
ii. Fluage.....	115
iii. Les pertes dues au retrait et au fluage.....	117
3.4. DISCUSSION.....	120

Chapitre IV:

Analyse des pertes de la précontrainte d'un pont

4.1. GENERALILTES.....	122
4.2. DESCRIPTION DU PONT.....	122
4.3. PROGRAMME DE MESURE.....	125
4.4. ETUDE ANALYTIQUE DES DONNEES.....	127
4.4.1. PCI.....	128
4.4.2. ACI.....	129
4.4.3. BPEL.....	130
4.4.4. ECO2.....	131
4.5. LES PERTES PAR RELAXATION.....	132

Chapitre V:

Logiciel de calcul des pertes de la précontrainte

5.1. INTRODUCTION.....	134
5.2. LOGICIEL DE PROGRAMMATION <<Visual Basic>>.....	134
5.2.1. Dessin de l'interface.....	135
5.2.2. Définition des propriétés.....	136
5.2.3. Ecriture du code.....	136
5.2.4. Le contrôle DATA.....	136
5.3. LOGICIEL DE CALCUL DES PERTES DE LA PRECONTRAINTE « <i>Analyse des pertes</i> ».....	137
5.3.1. Saisie des données.....	138
5.3.2. Les boîtes de dialogue de logiciel.....	141
5.3.3. Création d'une note de calcul.....	142
5.3.4. Comparaison des résultats de programme.....	143

Conclusion Générale

1. Généralités.....	145
2. Conclusions Générales.....	145
3. Recommandations.....	147

Référence bibliographique

Annexes

- Annexe A : Les facteurs influant Les pertes*
- Annexe B : La Méthode pas à pas*
- Annexe C : Organigramme de calcul des pertes*
- Annexe D : Programme de calcul des pertes*
- Annexe E : Note de calcul*

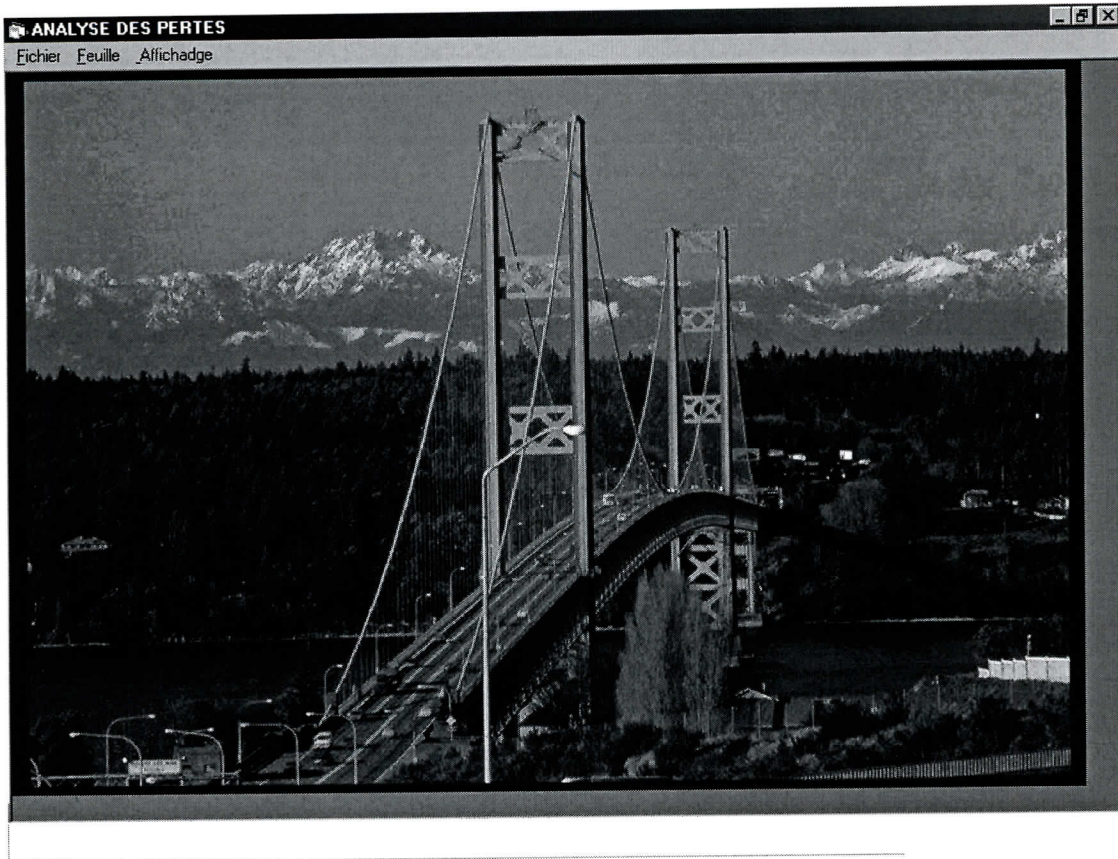


Figure 5-3 : La fenêtre principale du logiciel Analyse des pertes

5.3.1. Saisie des Données :

Avec un seul click sur le menu 'Nouveau fichier' le programme répond en affichant la première feuille de saisie des données, nommé « *Les caractéristiques de la poutre* » comme sans nom dit cette feuille est destinée pour la saisie des données liées aux caractéristiques de la poutre, elle regroupe :

- 1) Les champs pour la saisie.
- 2) Des boutons d'option :

Ils ont utilisé en groupe autoriser, le choix d'une option parmi d'autres possible.

Ces boutons rendent le programme plus flexible. La définition de la procédure de la précontrainte se fait en sélectionnant une option choisie.

- 3) Un contrôle combo box :

Il définit à l'utilisateur les types de la relaxation des armatures de la précontrainte. Le choix se fait par un seul click sur le type de la relaxation correspond.

rayon moyen r_m	46
2-3 La relaxation en pourcentage de la contrainte appliquée.....	54
3-1 Les résultats expérimentaux des déformations élastiques plus les fluages d'un béton conservé dans l'eau et soumis à une contrainte de 15 Mpa dans les six âge de chargement.....	72
3-2 Les résultats expérimentaux des déformations élastiques plus les fluages d'un béton conservé dans l'air où HR=68% et soumis à une contrainte de 15 Mpa dans les six âge de chargement.....	72
3-3 Comparaison de développement de la résistance du béton dans le temps entre les résultats expérimentaux et les résultats des codes.....	73
3-4 Comparaison des pourcentages d'estimation de la résistance du béton calculée par les différents codes par rapport aux résultats mesurés.....	74
3-5 Comparaison de pourcentage d'estimation de module élastique de différents codes....	75
3-6 Comparaison des déformations élastiques expérimentales avec les résultats des codes.....	76
3-7 Les déformations élastiques plus les fluages calculés par.....	78
(a)- Le code BPEL-91	
(b)- Le code ECO2-92	
(c)- Le code ACI-92	
3-8 Comparaison de fluage propre entre les différentes méthodes sous l'influence de l'âge de béton au moment de la mise en charge.....	79
3-9 Comparaison des pertes dues au fluage propre plus la déformation élastique estimés par les différents codes sous l'effet de l'âge de chargement.....	81
3-10 Les déformations élastiques plus les fluages calculés par le code ECO2-92, sous l'influence de l'humidité pour des bétons chargés à :	83
a- 7 jours	
b- 28 jours	
c- 56 jours	
3-11 Les déformations élastiques plus les fluages calculés par le code BPEL-91, sous l'influence de l'humidité pour des bétons chargés à :	84
a- 7 jours	
b- 28 jours	
c- 56 jours	
3-12 Les déformations élastiques plus les fluages calculés par le code ACI-92, sous l'influence de l'humidité pour un bétons chargé à :	85
a- 7 jours	
b- 28 jours	
c- 56 jours	
3-13 Comparaison de fluage total sous l'effet de l'humidité relative	86
a- Béton chargé à 7 jours	
b- Béton chargé à 28 jours	
c- Béton chargé à 56 jours	
3-14 Comparaison des pertes dues au fluage et la déformation élastique sous l'effet de l'humidité relative pour un béton chargé à :	88
a- à l'âge de 7 jours	
b- à l'âge de 28 jours	
c- à l'âge de 56 jours	
3-15 Résultats expérimentaux de retrait pour les six périodes de la cure.....	89
3-16 Retrait estimé par les codes sous l'influence de la périodes de la cure.....	91
a- ACI-92	

b- BPEL-91	
c- ECO2-92	
3-17 L'effet de l'humidité sur le retrait estimé par :.....	93
a- ACI-92	
b- BPEL-91	
c- ECO2-92	
3-18 Comparaison du pourcentage d'estimation des pertes entre les différents codes pour une période de cure =28 jours.....	95
3-19 Les déformations totales mesurées sous charge de 10 MPa.....	99
3-20 Retraits mesurés.....	99
3-21 Fluages mesurés sous charge de 10 MPa.....	99
3-22 Résultats des retraits mesurés et calculés sous l'effet des granulats.....	100
a- Expérimentaux	
b- Code ACI-92	
c- Code BPEL-91	
d- Code ECO2-92	
3-23 Comparaison de retrait sous l'effet de type des granulats.....	102
3-24 Résultats des fluages mesurés et calculés sous l'effet de type des granulats.....	103
a- Expérimentaux	
b- Code ACI	
c- Code BPEL	
d- Code ECO2	
3-25 Comparaison de fluage sous l'effet de type des granulats.....	104
3-26 Comparaison des pertes calculées par les codes et par les déformations élastiques sous l'effet de type des granulats :.....	105
a- Granulats concassés	
b- Granulats roulés	
3-27 Comparaison de pourcentage d'estimation des pertes totales entre les différents codes sous l'effet de type de granulats.....	106
3-28 Résultats des retraits mesurés et calculés sous l'effet de rapport G/S.....	108
a- Expérimentaux	
b- Code ACI	
c- Code BPEL	
d- Code ECO2	
3-29 Comparaison de retrait sous l'effet de rapport G/S.....	109
3-30 Résultats de fluage mesurés et calculés sous l'effet de rapport G/S.....	110
a- Expérimentaux	
b- Code ACI	
c- Code BPEL	
d- Code ECO2	
3-31 Comparaison des fluages sous l'effet de rapport G/S.....	111
3-32 Comparaison des pertes calculées par les codes et par les déformations élastiques sous l'effet du rapport G/S :	112
a- Gravier/Sable=1.....	
b- Gravier/Sable=1,7.....	
3-33 Comparaison de pourcentage d'estimation des pertes entre les différents codes sous l'effet de rapport G/C.....	113
3-34 Résultats des retraits mesurés et calculés sous l'effet de rapport E/C.....	114
a- Expérimentaux	

2-2	Représentation de la fonction $f(t-t_1)$ en fonction de la durée de chargement et du rayon moyen r_m	46
2-3	La relaxation en pourcentage de la contrainte appliquée.....	54
3-1	Les résultats expérimentaux des déformations élastiques plus les fluages d'un béton conservé dans l'eau et soumis à une contrainte de 15 Mpa dans les six âge de chargement.....	72
3-2	Les résultats expérimentaux des déformations élastiques plus les fluages d'un béton conservé dans l'air où HR=68% et soumis à une contrainte de 15 Mpa dans les six âge de chargement.....	72
3-3	Comparaison de développement de la résistance du béton dans le temps entre les résultats expérimentaux et les résultats des codes.....	73
3-4	Comparaison des pourcentages d'estimation de la résistance du béton calculée par les différents codes par rapport aux résultats mesurés.....	74
3-5	Comparaison de pourcentage d'estimation de module élastique de différents codes....	75
3-6	Comparaison des déformations élastiques expérimentales avec les résultats des codes.....	76
3-7	Les déformations élastiques plus les fluages calculés par.....	78
	(a)- Le code BPEL-91	
	(b)- Le code ECO2-92	
	(c)- Le code ACI-92	
3-8	Comparaison de fluage propre entre les différentes méthodes sous l'influence de l'âge de béton au moment de la mise en charge.....	79
3-9	Comparaison des pertes dues au fluage propre plus la déformation élastique estimés par les différents codes sous l'effet de l'âge de chargement.....	81
3-10	Les déformations élastiques plus les fluages calculés par le code ECO2-92, sous l'influence de l'humidité pour des bétons chargés à :	83
	a- 7 jours	
	b- 28 jours	
	c- 56 jours	
3-11	Les déformations élastiques plus les fluages calculés par le code BPEL-91, sous l'influence de l'humidité pour des bétons chargés à :	84
	a- 7 jours	
	b- 28 jours	
	c- 56 jours	
3-12	Les déformations élastiques plus les fluages calculés par le code ACI-92, sous l'influence de l'humidité pour un bétons chargé à :	85
	a- 7 jours	
	b- 28 jours	
	c- 56 jours	
3-13	Comparaison de fluage total sous l'effet de l'humidité relative	86
	a- Béton chargé à 7 jours	
	b- Béton chargé à 28 jours	
	c- Béton chargé à 56 jours	
3-14	Comparaison des pertes dues au fluage et la déformation élastique sous l'effet de l'humidité relative pour un béton chargé à :	88
	a- à l'âge de 7 jours	
	b- à l'âge de 28 jours	
	c- à l'âge de 56 jours	
3-15	Résultats expérimentaux de retrait pour les six périodes de la cure.....	89
3-16	Retrait estimé par les codes sous l'influence de la périodes de la cure.....	91

a- ACI-92	
b- BPEL-91	
c- ECO2-92	
3-17 L'effet de l'humidité sur le retrait estimé par :.....	93
a- ACI-92	
b- BPEL-91	
c- ECO2-92	
3-18 Comparaison du pourcentage d'estimation des pertes entre les différents codes pour une période de cure =28 jours.....	95
3-19 Les déformations totales mesurées sous charge de 10 MPa.....	99
3-20 Retraits mesurés.....	99
3-21 Fluages mesurés sous charge de 10 MPa.....	99
3-22 Résultats des retraits mesurés et calculés sous l'effet des granulats.....	100
a- Expérimentaux	
b- Code ACI	
c- Code BPEL	
d- Code ECO2	
3-23 Comparaison de retrait sous l'effet de type des granulats.....	102
3-24 Résultats des fluages mesurés et calculés sous l'effet de type des granulats.....	103
a- Expérimentaux	
b- Code ACI	
c- Code BPEL	
d- Code ECO2	
3-25 Comparaison de fluage sous l'effet de type des granulats.....	104
3-26 Comparaison des pertes calculées par les codes et par les déformations élastiques sous l'effet de type des granulats :.....	105
a- Granulats concassés	
b- Granulats roulés	
3-27 Comparaison de pourcentage d'estimation des pertes totales entre les différents codes sous l'effet de type de granulats.....	106
3-28 Résultats des retraits mesurés et calculés sous l'effet de rapport G/S.....	108
a- Expérimentaux	
b- Code ACI	
c- Code BPEL	
d- Code ECO2	
3-29 Comparaison de retrait sous l'effet de rapport G/S.....	109
3-30 Résultats de fluage mesurés et calculés sous l'effet de rapport G/S.....	110
a- Expérimentaux	
b- Code ACI	
c- Code BPEL	
d- Code ECO2	
3-31 Comparaison des fluages sous l'effet de rapport G/S.....	111
3-32 Comparaison des pertes calculées par les codes et par les déformations élastiques sous l'effet du rapport G/S :	112
a- Gravier/Sable=1.....	
b- Gravier/Sable=1,7.....	
3-33 Comparaison de pourcentage d'estimation des pertes entre les différents codes sous l'effet de rapport G/C.....	113
3-34 Résultats des retraits mesurés et calculés sous l'effet de rapport E/C.....	114
a- Expérimentaux	

b- Code ACI	
c- Code BPEL	
d- Code ECO2	
3-35 Comparaison de retrait sous l'effet de rapport E/C.....	115
3-36 Résultats de fluages mesurés et calculés sous l'effet de rapport E/C.....	116
a- Expérimentaux	
b- Code ACI	
c- Code BPEL	
d- Code ECO2	
3-37 Comparaison de fluage sous l'effet de rapport E/C.....	117
3-38 Comparaison des pertes calculées par les codes et par les déformations élastiques sous l'effet du rapport E/C :.....	118
a- Eau/Ciment=0,53.....	
b- Eau/Ciment=0,45.....	
3-39 Comparaison de pourcentage d'estimation des pertes entre les différents codes sous l'effet de rapport E/C.....	119
4-1 Plan et élévation du pont.....	123
4-2 Les détails de la section transversale du pont et des emplacements de la jauge de tension mécanique.....	124
4-3 La variation de la contrainte dans les armatures de la précontrainte mesurée par les jauges mécaniques.....	126
4-4 Comparaison des résultats des contraintes dans l'acier mesurées par les jauges et calculées par les codes.....	127
4-5 Comparaison des pertes par relaxation.....	133
4-6 Comparaison des contraintes dans les armatures après les pertes par retrait, fluage et la relaxation.....	133
5-1 Fenêtre de Visual Basic.....	133
5-2 L'ouverture d'une base de donnée.....	135
5-3 La fenêtre principale du logiciel Analyse des pertes.....	137
5-4 La première fenêtre de saisie des données du logiciel Analyse des pertes.....	138
5-5 La fenêtre des coefficients de frottement.....	139
5-6 La deuxième fenêtre de saisie des données du logiciel Analyse des pertes.....	139
5-7 La fenêtre des résultats du logiciel Analyse des pertes.....	140
5-8 Les boîtes de dialogue du logiciel Analyse des pertes.....	141
5-9 L'affichage de la note de calcul de logiciel Analyse des pertes.....	142
5-10 Comparaison des résultats de programme.....	143
(a)- les pertes dues au retrait et au fluage.	
(b)- le développement de la contrainte dans les armatures de précontraint.	

Liste des tableaux

Tableau	Titre	Page
1-1	L'effet de dosage en ciment sur le retrait.....	15
1-2	Résultats des fissures de retrait à 42 jours.....	19
1-3	La déformation en millimètres par mètre à cinq ans d'un béton chargé à 100 kgf/cm ²	21
1-4	Résultats des retraits endogène et total en $\mu\text{m}/\text{m}$	29
1-5	Retrait des bétons avec Eau/Liant égal à 0,28 à l'âge de 40 jours.....	30
1-6	Retrait des bétons avec Eau/Liant égal à 0,23 à l'âge de 80 jours.....	30
1-7	Résultats de fluage après huit mois.....	30
2-1	Les valeurs des coefficients de frottement selon code BPEL.....	40
2-1	Les coefficients de frottement selon code ECO2.....	49
2-2	Facteurs de la relaxation des armatures de la précontrainte.....	54
2-3	Coefficients de frottement selon le code ACI.....	56
2-4	Les valeurs de coefficient k_{sh}	57
2-5	Coefficient k'_1	58
2-6	Coefficient k'_3	58
2-7	Les valeurs des coefficients a et b.....	60
2-8	Coefficient k_3	61
2-9	Les valeurs des coefficients de la relaxation k_{re} et J.....	62
2-10	Les valeurs de coefficient de la relaxation C.....	62
2-11	Minimum des intervalles utilisés dans la méthode de PCI.....	63
2-12	Coefficient de retrait SSF.....	65
2-13	Retrait ultime AUS.....	65
2-14	Coefficient de fluage SCF.....	65
2-15	Coefficient de fluage MCF.....	66
2-16	Fluage ultime AUC.....	66
2-17	Facteurs d'estimation des pertes différées (retrait et fluage du béton) de différents codes..	69
3-1	Composition du béton.....	71
3-2	Le développement de la résistance relative à la résistance à 28 jours.....	74
3-3	Comparaison du module élastique entre les différents codes et les résultats expérimentaux.....	75
3-4	Les déformations élastiques en GPa.....	76
3-5	Les pertes de la précontrainte dues au fluage et la déformation élastique sous l'effet de l'âge de chargement.....	80
3-6	Les pertes dues au fluage et la déformation élastique déterminées par les différentes méthodes sous l'effet de l'humidité (période de cure est 28 jours).....	94
3-7	Les compositions granulométriques des différents bétons.....	97
3-8	Les paramètres et les bétons à comparer.....	97
3-9	Les caractéristiques des bétons.....	98
4-1	Les facteurs de la méthode de PCI.....	128
4-2	Les pertes calculées par la méthode de PCI.....	129
4-3	Les facteurs de la méthode de ACI.....	129
4-4	Les pertes calculées par la méthode de ACI.....	130
4-5	Les pertes calculées par la méthode de BPEL.....	131
4-6	Les pertes calculées par la méthode de ECO2.....	132

Introduction

INTRODUCTION

1. Généralités :

Le béton constitue, sans aucun doute, le matériau de construction le plus utilisé dans le monde actuellement depuis son apparition, il ne cesse pas d'être l'objet de recherche des travaux entrepris par les spécialistes, néanmoins son comportement très complexe et loin d'être maîtriser, ceci est dû essentiellement au nombre important des paramètres qui régissent ses caractéristiques.

Lors de la mise en précontrainte d'un élément, il se produit des pertes de précontrainte allant de 15 à 25% de la contrainte initiale appliquée. Cette partie de la perte de la contrainte se produit par glissement des armatures à l'ancrage (recule d'ancrage) et par raccourcissement élastique du béton, et dans le cas de la post tension les pertes qui se produit dues aux frottements entre les armatures et la gaine. Après cette phase les sections dans le béton sont affectées par le fluage et le retrait du béton ainsi que la relaxation des armatures de précontrainte, ces trois phénomènes constituent les pertes différées qui se produisent sur plusieurs années, et qui représentent presque 80% des pertes totales [1].

2. Objectif :

Dés la mise en tension, le béton subit des déformations lentes et des variations de contraintes différées qui conduisent à une aggravation de l'état de sollicitation de l'élément, ainsi qu'une chute de tension. Donc la contrainte réelle dans les armatures de précontrainte sera la contrainte initiale moins les pertes, par conséquent il est nécessaire d'estimer la valeur des pertes car :

- Si la magnitude des pertes est sous estimée, il se produit des fissures qui provoquent une flèche.
- Si les pertes sont sur estimées, une grande force de la précontrainte reste après pertes, et se produit une augmentation du raccourcissement axiale pendant que la ductilité de l'élément sera réduite.

En effet, toute structure en béton précontraint doit être stable aussi bien pendant la construction qu'à son état final ; par conséquent, la prévision aussi exacte que possible des pertes est donc essentielle pour le calcul des ouvrages.

Vue l'importance des conséquences de la mauvaise estimation des pertes sur les structures, nous avons fixé comme objectif une étude comparative des pertes de précontrainte entre quatre méthodes les plus applicables à travers le monde (le code Américain ACI-92 ; Le code européen ECO2-92 ; Le code française BPEL-91 ; La méthode de PCI-75.).

Cette comparaison étant faite en considérant certains facteurs qui jouent un rôle important sur les pertes différées. A travers cette étude on fait le choix sur un des quatre méthodes pour l'élaboration un logiciel de calcul des pertes en basant sur le principe pas à pas.

3. Plan de travail :

Aux objectifs visés ci dessus, ce travail est composé de trois parties et une conclusion.

La première partie se compose de deux chapitres, le premier présente des définitions et des procédures de la précontrainte et les facteurs qui influent sur les pertes, on donne en premier lieu les différents types des pertes et on termine par présentation des facteurs qui influent sur les pertes et les résultats expérimentaux obtenus qui confirment cette influence. Dans le deuxième chapitre, on présentera les quatre méthodes d'estimation des pertes et suite par une discussion sur les facteurs pris en compte par les différentes méthodes dans le calcul des pertes.

La deuxième partie comporte notre travail personnel, qui présente une :

- Etude comparative des déformations différées (retrait et fluage) ainsi que les pertes produites par ces déformations sous l'effet des conditions de la mise en précontrainte de l'élément (l'âge de béton au moment de la mise en charge, l'humidité de l'environnement et la période de la cure), et de la composition du béton (type des granulats, rapport Gravier/Sable et rapport Eau/Ciment).

Ensuite, une étude comparative des pertes d'un pont mesurées et celles calculées par les quatre codes est présentée.

La troisième partie consiste à l'élaboration d'un logiciel de calcul des pertes en utilisant le langage « Visual basic » et on se basant sur la méthode du code ACI-92 , et en utilisant la méthode pas à pas.

A fin de mettre en évidence l'efficacité du ce programme, une étude comparative à travers un exemple de calcul sera présentée.

Enfin cette étude se termine par un dernier chapitre comportant les conclusions et les recommandations de ce travail.

Chapitre I

Revue Bibliographique

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES PERTES DE PRECONTRAINTE

1.1. HISTORIQUE DU BETON PRECONTRAINTE :

Le mot «précontrainte» a été imprimé la première fois en janvier 1933 dans un article de la revue travaux (Science et industrie) sous le titre «Idées et voies nouvelles ». Le premier brevet de FREYSSINET sur la précontrainte date du 2 octobre 1928, il était intitulé : « Procédé de fabrication de pièces en béton armé ». Les études sur la pré-compression du béton sont antérieures à celle de FREYSSINET. Comme les tentatives de CONSIDER et BACH, de retarder les apparitions de fissuration par compression de béton et pré-tension de l'acier [2], ou le brevet de P.H.JACKSON en Californie en 1886 qui est la première application de béton précontraint [2], et le brevet de C.F.W.DOEHRING en 1888 comportant quelques principes de précontrainte [2] et le brevet de F.LEONHARDT et T.Y. LIN en 1930.

1.2. DEFINITIONS DU BETON PRECONTRAINTE:

Le béton précontraint est un matériau auquel on fait subir un traitement mécanique préalable pour le rendre apte à résister aux deux sens de sollicitations compression et traction. le traitement consiste à appliquer avant les charges, des contraintes de compression agissantes particulièrement dans les zones où les charges devraient faire naître des tensions. En d'autres termes le béton sera pré-comprimé ou précontraint avant action des charges extérieures, de telle façon que l'effet différentiel de la précontrainte et des charges ne laissera plus subsister que les zones comprimées [3, 4], la force de compression permanente qui constitue la précontrainte du béton est généralement réalisée par la mise en tension des armatures en acier dur dont les ancrages sont solidaires de la pièce (cas de post tension).

La force de traction dans les armatures est très importante, son ordre de grandeur est souvent de plusieurs méga Newtons [4]. Elle peut être obtenue, soit à l'avance, avant la mise en place du béton dans son coffrage, soit au contraire après durcissement du béton au moyen de vérins prenant

appui sur celui-ci. Dans le premier cas il s'agit de précontrainte par pré-tension, et dans le second de précontrainte par post-tension. Cette distinction est essentielle car elle conduit à des applications de natures très différentes, tant en ce qui concerne la conception que la mise en œuvre elle-même. En post tension la force de précontrainte varie à la fois :

- Dans l'espace, avec l'abscisse le long de l'armature, du fait des frottements à la mise en tension.
- Dans le temps, à cause des déformations différées du béton (retrait et fluage) d'une part, et de la relaxation de l'acier d'autre part.

En pré-tension, la force de précontrainte varie principalement dans le temps du fait de l'application successive des actions permanentes à la structure au cours des diverses phases de sa mise en œuvre.

1.3. LES PROCEDURES DE LA PRECONTRAINTE PAR MISE EN TENSION DES ARMATURES:

1.3.1 Précontrainte par Post-tension :

Le principe de la précontrainte par post-tension est de tendre les armatures en prenant appui sur la pièce durcie à pré contraindre. Pendant sa mise en tension, l'armature s'allonge tandis que le béton comprimé présente un léger raccourcissement (pour permettre le mouvement relatif qui en résulte). Il est nécessaire de ménager dans le béton des évidements tubulaires généralement formés par des gaines métalliques de section circulaire disposées et réglées dans les coffrages avant bétonnage (figure 1-1).

Clavette
Blocage des armatures

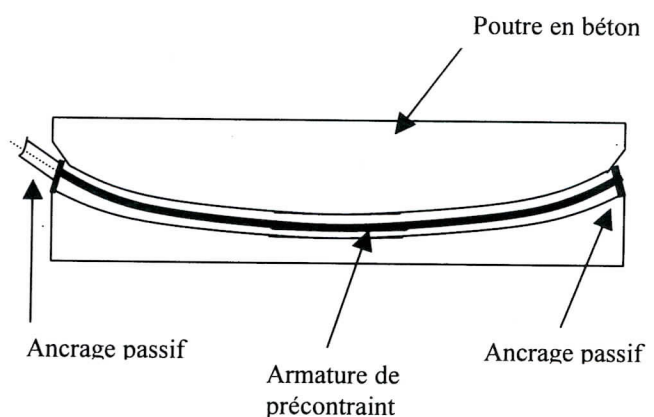
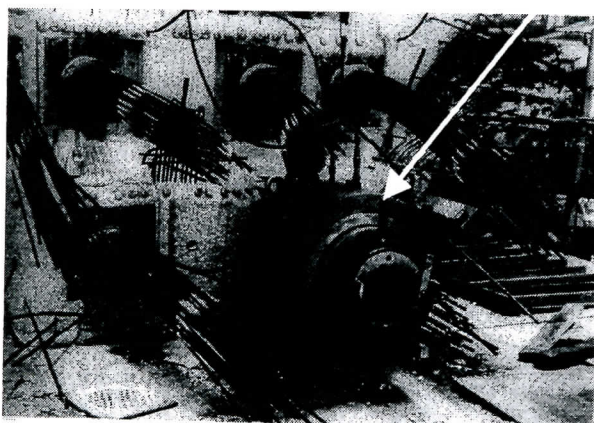


Figure : 1-1 : La procédure de la précontrainte par post-tension

1.3.2 Précontrainte par Pré-tension :

La précontrainte par pré-tension, est obtenue en tendant à l'avance les aciers, en les fixant sur des culées solidement ancrées. Les armatures règnent sur toute la longueur du moule, et souvent sur la longueur de plusieurs moules disposés bout à bout sur un banc de mise en tension, dont la longueur peut atteindre une centaine de mètre (figure 1-2)

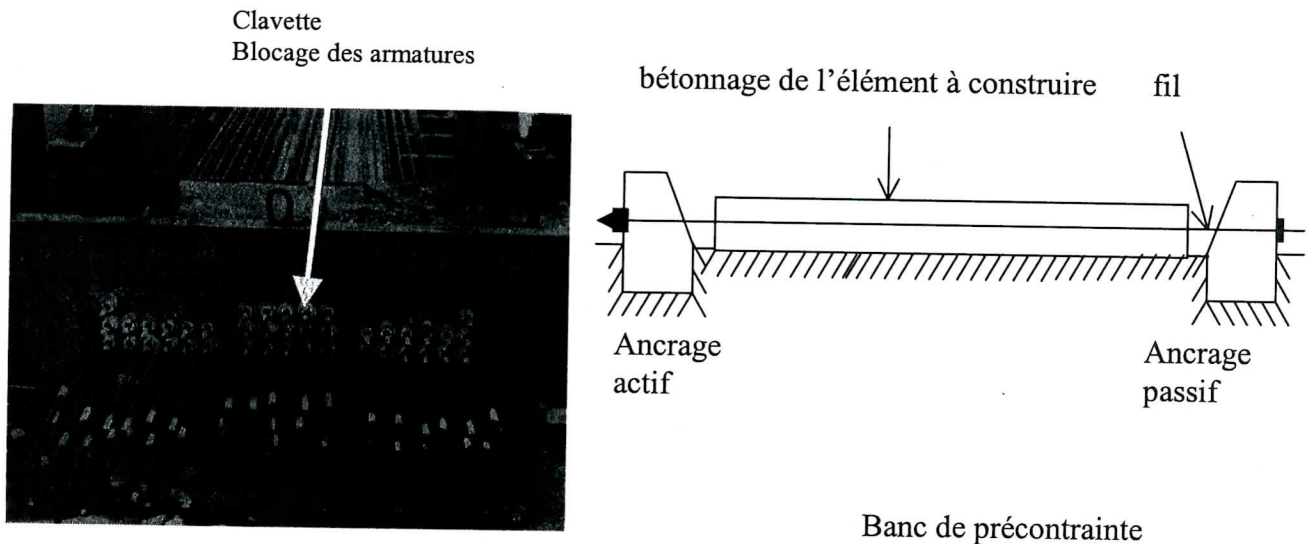


Figure : 1-2 : La procédure de la précontrainte par pré-tension

1.4. LES PERTES DE TENSION :

De façon générale, on désigne sous le nom de *perte de précontrainte* toute différence entre la force exercée par le vérin lors de la mise en tension de l'armature, et la force (intérieure) qui s'exerce en un point donné d'une armature à une époque donnée.

1.4.1 Les Pertes de tension dans le cas de la précontrainte Par Post-tension : [5,6]

La tension initiale du câble de précontrainte, mesurée au vérin, est un paramètre que le projecteur d'un ouvrage en béton précontraint connaît avec certitude. Cette valeur qui ne correspond pas à la tension réelle dans les câbles dans une section donnée de l'ouvrage et à un instant donné de sa durée de vie, sert de référence aux calculs de dimensionnement et en particulier au calcul de la tension probable dans les câbles. Cette dernière est égale à la tension initiale diminuée des pertes de précontrainte qui peuvent être classées en deux catégories selon leurs origines :

A.iii Les Pertes dues au glissement d'ancrage :

Ces pertes correspondent à un glissement des torons ou fils dans les clavettes, et des clavettes dans les plaques d'ancrages lors de la détension du vérin et du blocage des clavettes. L'effort de traction exercé par le câble bloque par effet de coin les clavettes dans les ancrages. Ce glissement prend des valeurs de 1 à 12 mm, suivant la puissance de l'ancrage et le procédé de précontrainte utilisé [4]. Le mouvement qui a lieu en sens inverse de celui qui a été créé par la mise en tension provoque un frottement de signe opposé au précédent. Entre la précontrainte par post-tension et la précontrainte par pré-tension les systèmes d'ancrage diffèrent ; dans le cas de la pré-tension on trouve un seul type d'ancrage, alors que dans le cas de la post-tension plusieurs types d'ancrages [3,5] comme il est représenté dans la figure 1-4. Cette différence dans les systèmes d'ancrage provoque une différence des pertes par glissement à l'ancrage.

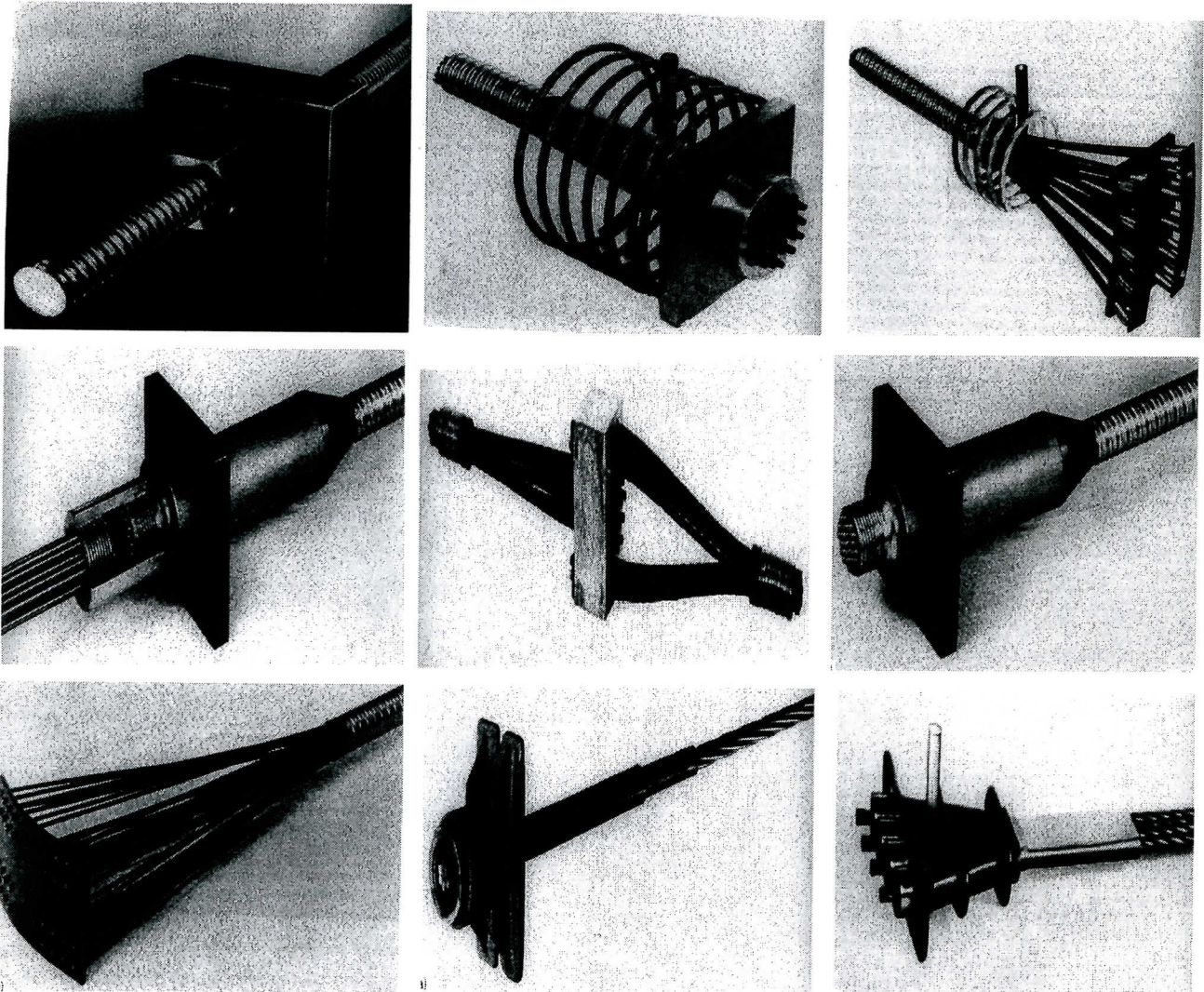


Figure : 1-4 : Quelques types de système d'ancrage [3, 5]

B. Les pertes différées :

Les armatures de précontrainte liées au béton à leurs extrémités par les ancrages et tout le long de leur tracé par le coulis d'injection, sont astreintes à subir les mêmes variations de déformation que le béton adjacent. Cette déformation qui a pour conséquence de détendre les armatures de précontrainte, due à un raccourcissement du béton. Ce raccourcissement est dû au retrait et au fluage du béton ainsi qu'à la relaxation des armatures.

1.4.2 Les Pertes de tension dans le cas de la précontrainte par pré-tension : [3,4]

Dans le cas de la pré-tension, les armatures de précontrainte subissent des pertes instantanées et des pertes différées.

- **Les pertes instantanées :** dues aux pertes de tension qui résulte du glissement de l'armature par rapport à son ancrage et par raccourcissement élastique de béton.

- **Les pertes différées :** Les pertes de tension différées doivent être calculées phase par phase, en suivant les différentes étapes de la construction. C'est-à-dire de l'application des actions permanentes, chacune des pertes dues au retrait et au fluage du béton ainsi qu'à la relaxation des aciers. Certaines phases de la construction entraînent une variation instantanée de la contrainte du béton au niveau du centre de gravité des armatures de précontrainte : Si la variation de la contrainte dans les armatures correspond à un accroissement de la compression du béton ; Cette variation est une surtension de l'armature de précontrainte. Si cette variation correspond à une diminution de la compression du béton alors ; Cette variation est une perte de précontrainte.

1.5. LE RETRAIT :

C'est un phénomène de raccourcissement qui accompagne la prise de ciment d'un élément de béton libre de toute sollicitation mécanique externe. Cette variation de volume est causée par la réduction du volume de béton par l'évaporation de l'eau de gâchage. Mais il existe plusieurs types de retraits, qui peuvent avoir lieu simultanément ou successivement.

1.5.1 Le Retrait Plastique :

L'hypothèse généralement admise est que le retrait plastique est engendré par la dépression capillaire, qui se développe lorsque des ménisques se forment dans les capillaires du béton frais [8]. Au début, l'eau de gâchage n'est pas encore liée aux constituants des ciments ; elle n'est retenue que physiquement et mécaniquement. Donc une partie de l'eau de gâchage départ plus ou moins facilement, soit par évaporation, soit par absorption du support (coffrage en bois trop sec) ou par des granulats poreux également non humidifiés (cas du béton de granulats légers). Un point caractéristique de ce retrait particulier est qu'il se produit pendant un temps limité. La déformation apparaît dès que la surface exposée est exempte d'eau de ressuage. En atmosphère calme (vent faible), le début de la période de retrait plastique coïncide avec le début de prise qui est aussi la fin du ressuage [9]. Ce retrait est d'autant plus important que pour les éléments de structure présentant un rapport surface / volume important, les éléments où la prise est lente (une température ambiante basse, un excès d'eau de gâchage ou l'utilisation d'adjuvant retardateur), et dans le cas où la dessiccation est forte (Une hygrométrie sèche, l'action du vent, et une température du béton élevée).

1.5.2 Le Retrait D'auto Dessiccation :

Le retrait d'auto dessiccation désigne la contraction, isotherme, observée sur une éprouvette de béton en cours d'hydratation et protégée de tout échange d'eau avec le milieu extérieur. Ce retrait augmente lorsque le rapport E/C diminue, il peut dépasser 10^{-4} en déformation linéaire après quelques jours de conservation [9]. Ce retrait provient d'un phénomène (d'auto – dessiccation) de la pâte de ciment au cours de son hydratation, le volume des hydrates formés est plus petit que le volume de l'eau et du ciment initial. Cette diminution de volume représente environ 18% du volume de ciment anhydre consommé par l'hydratation. Elle engendre la création de vides gazeux à l'intérieure de la porosité de la pâte de ciment, donc la création de ménisques et de tractions capillaires interne, comme s'il s'agissait d'une dessiccation avec départ d'eau à l'extérieure. Ce phénomène prend de l'importance avec les bétons à hautes et à très hautes performances quand les rapports E/C sont de l'ordre de 0,3 (Figure 1-5).

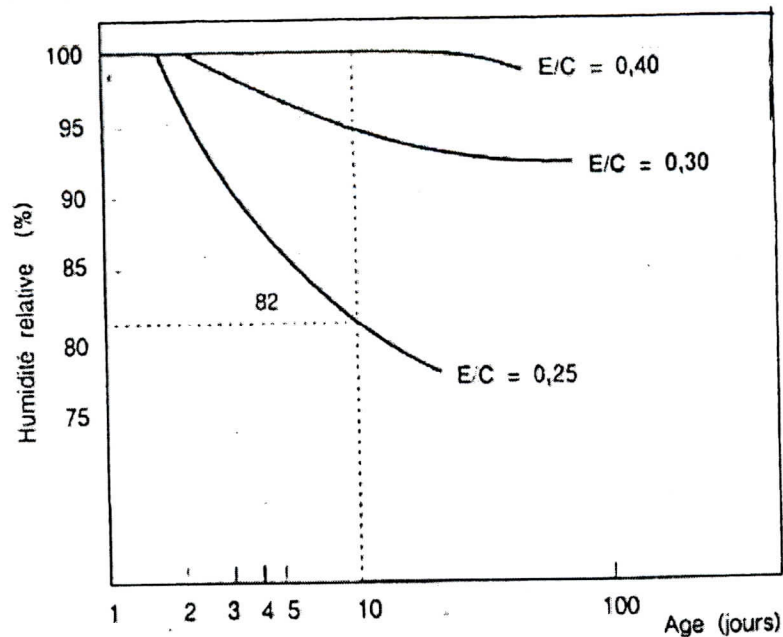


Figure : 1-5 : Auto-dessiccation de la pâte de ciment en court d'hydratation [8]

1.5.3 Le Retrait Thermique :

Il est dû à des baisses de température provenant soit du ciment lui-même lors de l'hydratation aux premiers âges suivie de son refroidissement, soit des variations climatiques du milieu qui peuvent être plus ou moins importantes et plus ou moins rapides. Lors de l'élévation de la température, on peut avoir une expansion thermique.

En général, le retrait thermique total qui s'additionne à un éventuel retrait hydraulique est important que l'expansion thermique.

Ce retrait est donné par la formule : $R_{th} = \alpha \Delta\theta$.

Avec $\Delta\theta$ = différence de température.

α : coefficient de dilatation thermique (varie de 7 à 14 $\mu/m^\circ C$).

Les fissures observées sur les ouvrages massifs ou même à partir d'une épaisseur de 10 à 20 cm sont le plus souvent dues à des fissures de retrait thermique [7,10].

1.5.4 Le Retrait par Carbonatation :

Le retrait par carbonatation nous signifie la réaction de CO_2 avec le ciment hydraté. En présence d'humidité, CO_2 forme un acide carbonique qui réagit avec $Ca(OH)_2$ produit lors de l'hydratation du ciment pour former $CaCO_3$, cette réaction est appelée carbonatation.

Le retrait due à cette réaction atteint une valeur maximale lorsque le béton est en état d'équilibre dans un environnement où l'humidité relative (HR) est de 50%. Mais pas à 100% ou 25%. Dans le cas dernier, il y a de l'eau insuffisante dans les pores de la pâte de ciment pour former de l'acide carbonique. De l'autre côté, quand les pores sont plein de l'eau la diffusion de CO_2 dans la pâte est très lente[10]

1.5.5 Facteurs Influant sur Le Retrait

i. L'humidité relative de l'environnement :

Lors de séchage du béton la première eau à être évaporée n'engendre aucun changement de volume, on estime qu'il s'agit de l'eau libre contenue dans des pores capillaires de grandes dimensions. A mesure que le séchage progresse, le retrait devient plus important (figure 1-6). D'après JOISEL [10], à 100% d'humidité relative, il n'y a pas de retrait (ni de gonflement, à condition d'utiliser un liant parfaitement stable). Selon Joisel [10], le retrait serait proportionnel à :

$$(1-n)^{0,7}$$

Avec n : degré hygrométrique moyen (n serait donc égal respectivement à 0,5 ; 0,6 et 1 dans une atmosphère à 50%, 60% et 100% d'humidité relative respectivement) [11].

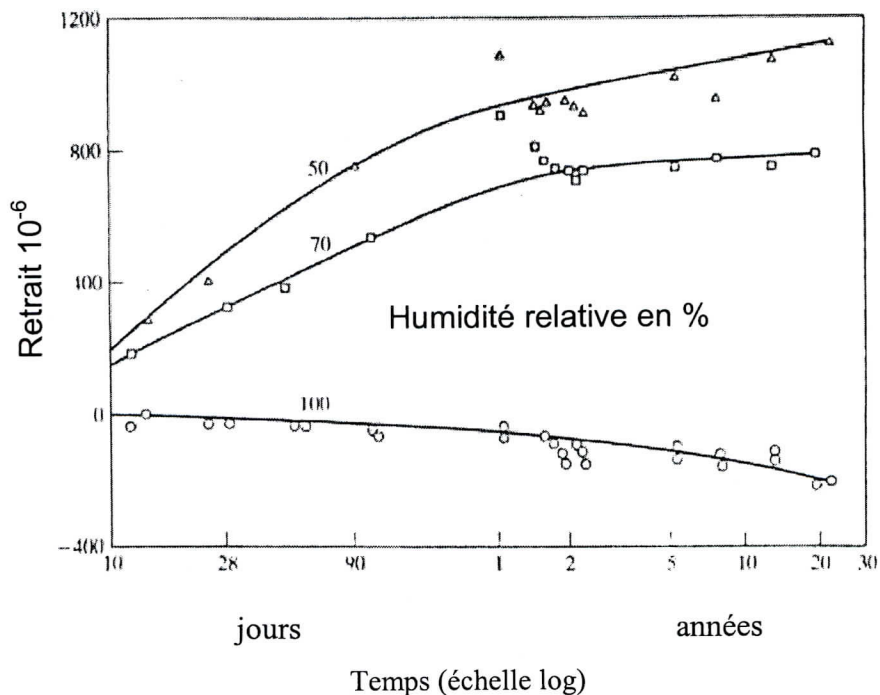


Figure : 1-6 : Relation entre le retrait et le temps d'exposition à différentes humidités relatives

D'après LERCH [10] : « Toutes choses égales par ailleurs, la perte d'eau du béton passe de 1 à 10 pour un vent croissant de 0 à 40 km/h, de 1 à 9 pour une humidité relative, tombant de 90 à 10% et de 1 à 7 pour des températures de béton et de l'air allant de -10 à $+38^{\circ}\text{C}$ ». Brooks et Al-Quarra [13] ont trouvé que le retrait à 68% d'humidité relative égal 1,6 le retrait déterminé à 80% d'humidité relative.

ii. La période de cure :

La cure permet de conserver l'humidité et la température du béton, et protéger le béton frais contre l'évaporation rapide d'eau, et donc favorise l'hydratation du ciment et le développement de la résistance du béton dans le temps.

De LARRARD [14] a trouvé, qu'une cure non surveillée conduit à la fissuration superficielle du béton, notamment dans les dalles.

La figure ci dessous (figure 1-7) montre l'influence de la période du cure sur l'évolution de retrait dans le temps.

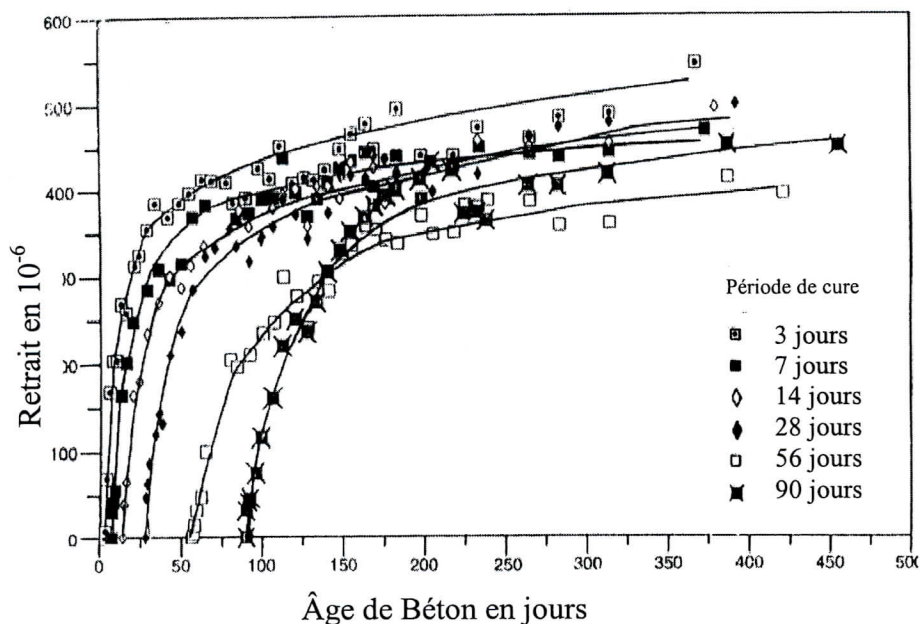


Figure : 1-7 : L'effet de la période de la cure sur le développement du retrait dans le temps [13]

iii. Types et classification des granulats :

Le retrait du ciment dû au séchage ne représente qu'une partie de celui du ciment pur parce que les particules de granulat non seulement diluent la pâte, mais la renforcent contre la

contraction. Le béton de schiste expansé entraîne un retrait un tiers plus important que celui du granulats courant. La grenaille de fonte provoque d'un autre côté un retrait un tiers plus faible que celui du béton ordinaire [10]. Les propriétés élastiques des granulats déterminent, d'une manière générale, le degré de contrainte offert. Le retrait dépend aussi de la forme des granulats (les granulats concassés donneraient un retrait un peut plus élevé que celui des granulats roulés) [15], un granulats plus gros permet l'emploi d'un mélange contenant moins de ciment et par suite sujet à un moindre retrait.

Le retrait des granulats eux-mêmes peut jouer un rôle extrêmement important dans la détermination du retrait du béton, comme dans le cas de certains grés à grains fins (ardoises, basaltes).

Les bétons qui contiennent du quartz, du calcaire, du gravit ou du feldspath présentent un faible retrait [10].

SELON NEVILLE et J. BROOKS [12] le retrait du béton sh_c dépend de retrait de la pâte de ciment sh_p et de pourcentage des granulats g (figure 1-8).

$$sh_c = sh_p(1-g)^n$$

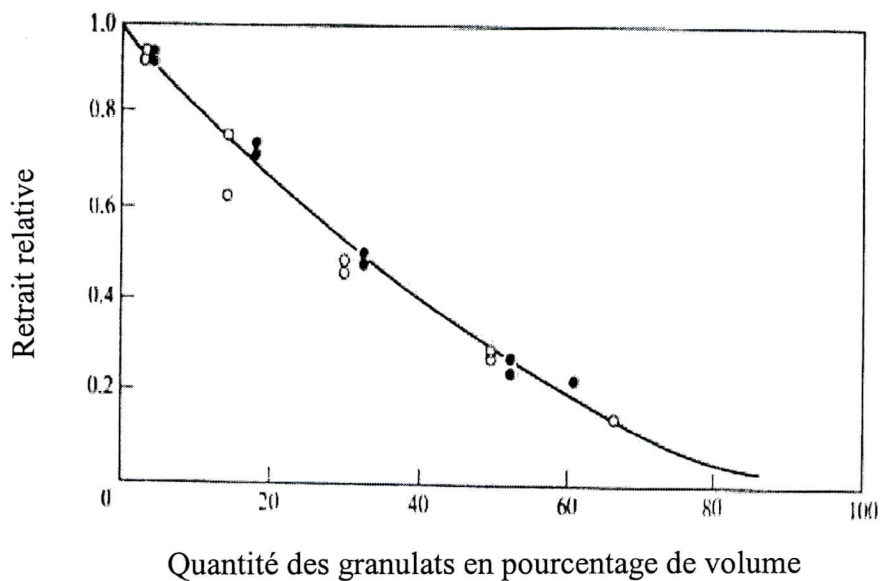


Figure : 1-8 : Influence de dosage des granulats Sur le rapport retrait de béton/retrait de la pâte ciment [12]

Le retrait du béton dépend aussi du rapport Gravier/Sable (G/S), et du type des granulats (granulats granitiques concassés - granulats sélico-calcaires roulés), comme il est montre dans la figure 1-9.

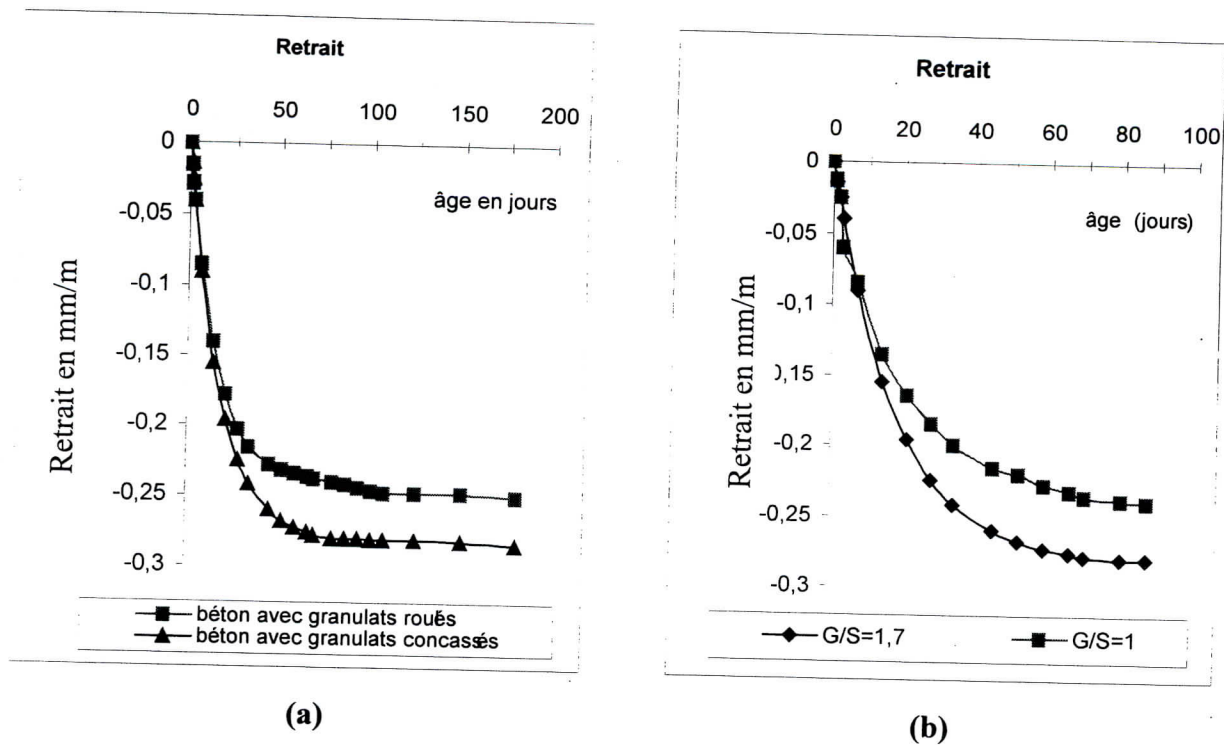


Figure : 1-9 : Effets des granulats sur le retrait [15]

- (a) - effet de type des granulats (granulats granitiques concassés - granulats silicocalcaires roulés)
 (b) - effet du rapport Gravier/Sable

iv. Rapport E/C et dosage en ciment:

La teneur en eau probablement le facteur le plus important parmi les paramètres qui dépend de la composition du béton exerçant une influence sur le retrait de béton, une teneur plus élevée en ciment augmente le retrait du béton ; la relation entre les retraits de la pâte de ciment pure, du mortier et du béton est de l'ordre d'environ 5, 2, et 1 pour les matériaux donnés, ce pendant, et pour une teneur uniforme en eau, le retrait du béton varie peu pour un large écart de teneurs en ciment ; un mélange plus riche présente un rapport eau/ciment plus faible, et ces facteurs se compensent mutuellement [18],

Tableau 1-1: L'effet de dosage en ciment sur le retrait ($\mu\text{m}/\text{m}$) [10]

Temps	7 jours	28 jours	360 jours	1000 jours
Pâte pure (4*5*16 cm)	800	1300	1850	1900
Mortier 1/3 (4*4*16 cm)	350	650	800	850
Béton 0/20 mm dosé à 350 kg/m ³ - (7*7*28 cm)	130	270	420	450

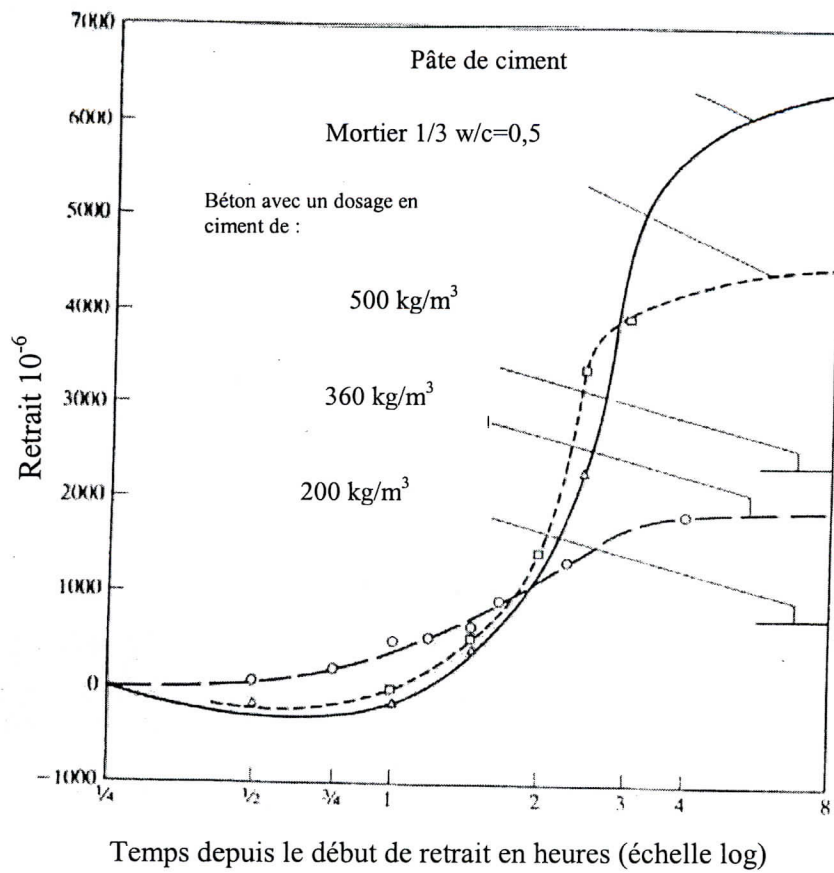


Figure 1-10 : Effet de dosage de ciment sur retrait plastique [12]

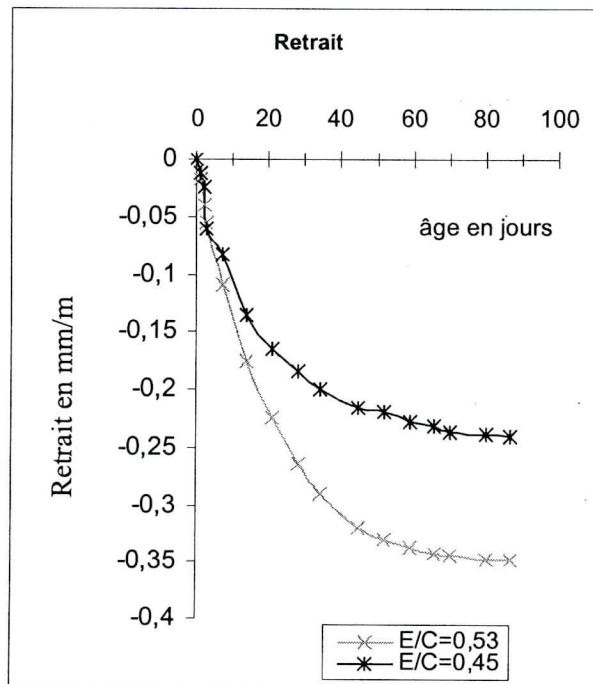


Figure 1-11 : Effet de rapport eau/ciment sur le retrait plastique [16]

v. Effet des adjuvants :

On définit les adjuvants comme étant des produits, qui ajoutés au béton en faible quantité, permettent d'améliorer certaines propriétés ou qualités souhaitées sur le béton frais ou sur le béton durci. Les adjuvants qui augmentent les besoins en eau du ciment augmentent le retrait et qui en diminuent les besoins, diminuent le retrait. Dans la proportion souvent utilisée comme accélérateur, le chlorure de calcium peut augmenter le retrait dû au séchage dans une proportion pouvant atteindre 50 pour cent [10]. Le retrait peut être minimisé en gardant le contenu de l'eau par volume de l'unité de béton aussi bas que possible mais cette solution provoque des problèmes dans l'ouvrabilité et le coulage du béton. Certains chercheurs [16,17,18] ont trouvé que les réducteurs d'eau augmentent le retrait, alors que d'autres [19,20] ont montré qu'il n'y a pas un effet de réducteur d'eau sur le retrait, à condition que le pourcentage de liquide reste constant. SHAYA et SUGITA [16,17] ont constaté que la meilleure solution pour diminuer le retrait est d'utiliser des adjuvants réducteurs de retrait (SRA), et que l'addition de 2% de ces adjuvants (SRA) réduit le retrait plastique de 20% comme il est représenté dans les figures (1-12) et (1-13)

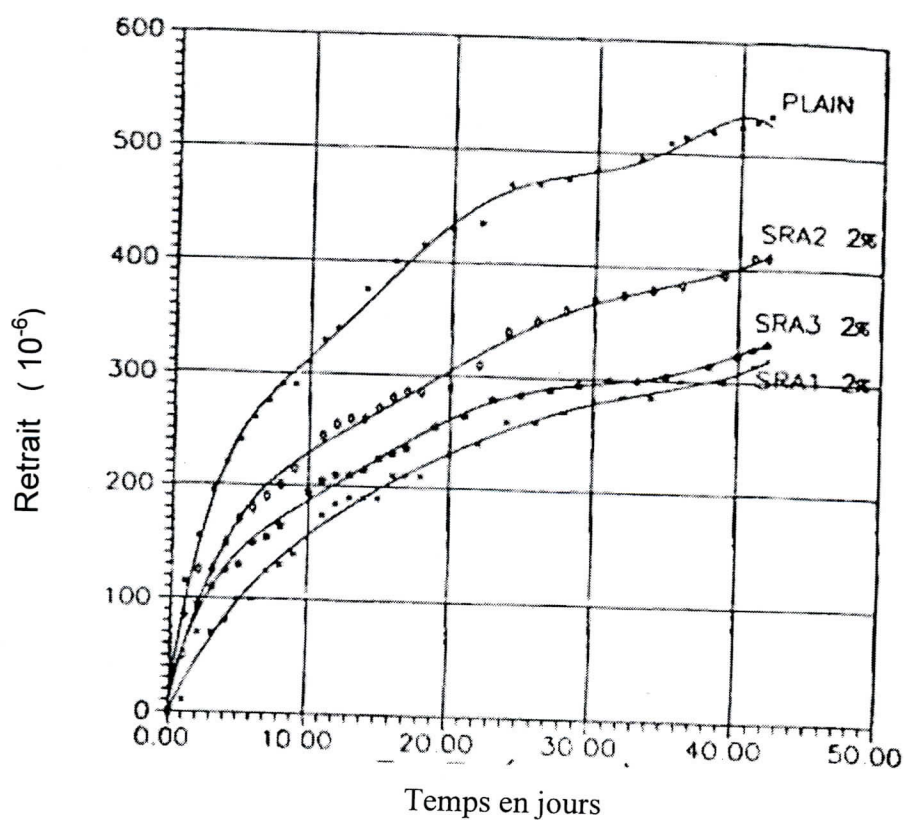


Figure : 1-12 : Résultats de retrait des bétons contiennent 2% des adjuvants réducteurs de retrait

[16]

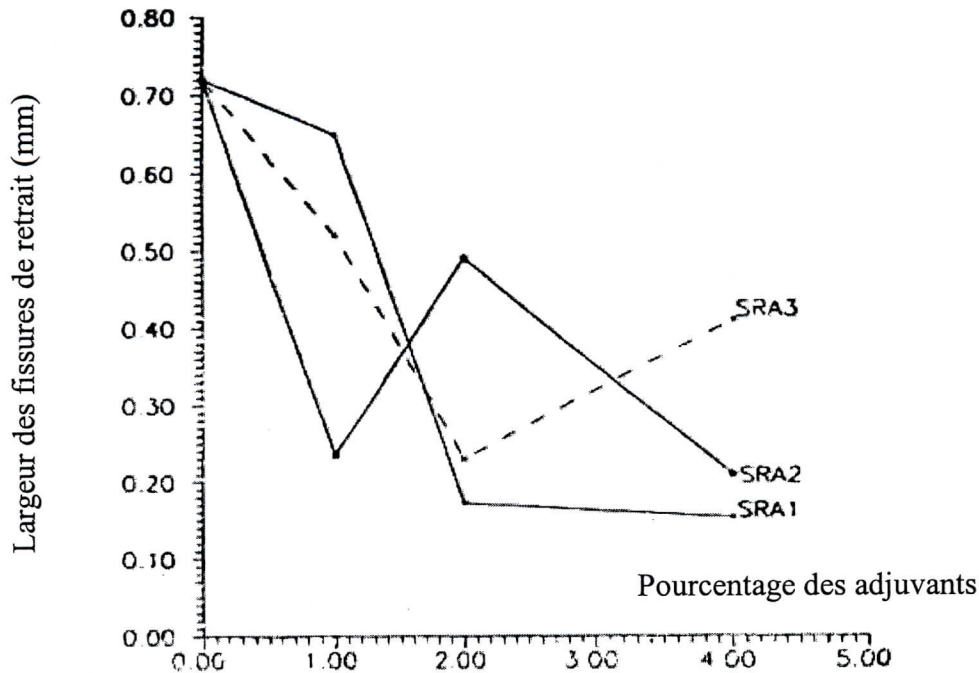
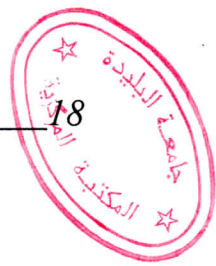


Figure 1-13 : largeur maximale des fissures en fonction de pourcentage des adjuvants réducteurs de retrait à 42 jours [16]

vi. Forme des pièces et armatures des ouvrages :

Le retrait plastique est d'autant plus grand que le rapport surface/volume de la pièce est plus élevé, le retrait avant prise d'une dalle de 2 cm d'épaisseur sera le double de celui d'une dalle de 7 cm d'épaisseur [10]. La moitié du retrait est réalisé à une semaine pour une section de 4 x 4 cm, alors qu'il faudrait attendre un an pour section de 30 x 30 cm lorsque la pièce est armée le retrait plastique diminue beaucoup [10], l'accrochage ou l'adhérence plus ou moins grand du matériau sur son support joue un rôle également important.

Les armatures s'opposent au retrait de la pâte par exemple, 2% d'armature (par rapport à la section du béton) ont pour effet de diviser par deux ou trois le retrait [10]. Selon SHOGA et SUGITA, KRENCHER et SHAH, MAMBERG, HAHME, SWAMY [16,21,22] l'addition des fibres d'acier est nécessaire non pas seulement pour renforcer le béton mais aussi pour diminuer l'épaisseur des fissures dues au retrait.

Tableau 1-2: résultats des fissures de retrait à 42 jours. [16]

Bétons	L'épaisseur maximale des fissures (mm)
Plain non armé	0,72
SRA 2% (Béton contient les adjuvants réducteurs de retrait)	0,3
SFRC 0,25 % (Béton contient les fibres d'acier)	0,24
PFRC 0,5% (Béton contient fibre polypropylène)	0,23

L'influence des fibres d'acier sur le développement de la contrainte et de la déformation de retrait est représentée par la figure (1-14) pour un béton de rapport E/C=0,7 et de période de cure égale un jour.

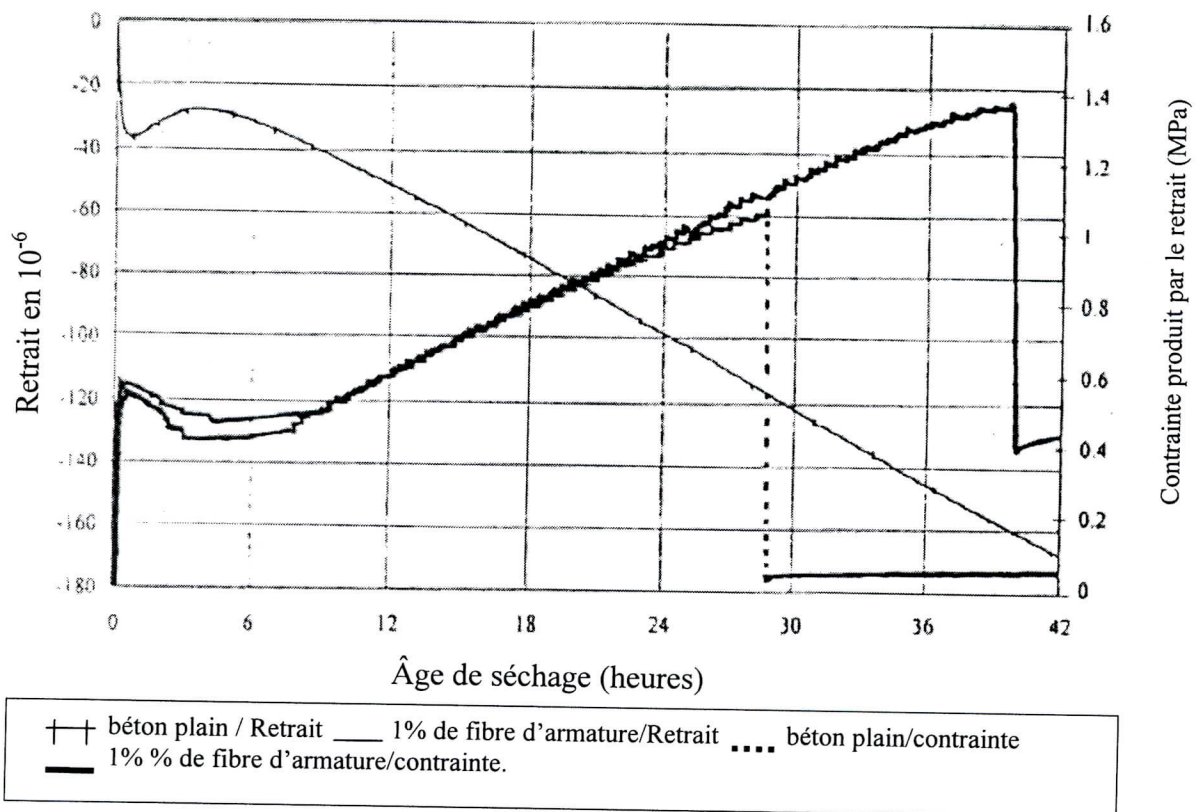


Figure 1-14 : Effet du pourcentage des armatures sur le retrait [23]

1.6. LE FLUAGE :

Le fluage est caractérisé par une augmentation de la déformation du béton dans le temps, sous l'effet d'une contrainte constante. La contrainte du béton au niveau des armatures de précontrainte n'est pas constante dans le temps, même si l'on fait abstraction des charges variables appliquées à la structure pendant des durées trop brèves. La déformation finale du béton sous l'effet du fluage est importante. Son ordre de grandeur peut atteindre le double de la déformation élastique instantanée [24]. Les déformations sous charge du béton sont difficiles à analyser car le béton est un matériau possédant une certaine hétérogénéité dont les propriétés évoluent suivant les conditions du milieu. Dans ce qui suit on tente de citer les facteurs influant le fluage.

Le fluage total observé est la somme de fluage propre et le fluage dû au séchage.

Le fluage propre se produit quand le béton est chargé dans des conditions ambiantes constantes (HR=100%). Et le fluage de dessiccation c'est le fluage additionnel dû à la variation de l'humidité quand le même béton est permis de sécher pendant qu'il est sous charge. On appelle le fluage spécifique, le fluage en microns par mètre obtenu par unité de charge en MPa, c'est à dire le rapport fluage/contrainte appliquée.

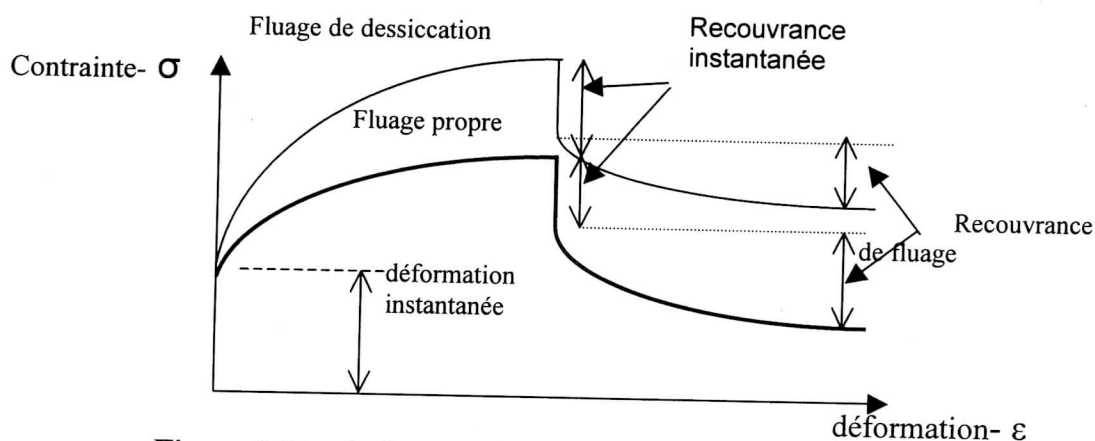


Figure 1-15 : le fluage et le fluage de recouvrance d'un béton conservé dans l'eau et autre dans l'air [12]

1.6.1 Facteurs Influant Le Fluage :

Le fluage est influencé par plusieurs facteurs qui dépendent de la composition du béton et des conditions d'environnement. Ces facteurs n'ont pas un effet seulement sur le grandeur final du fluage mais aussi sur leur développement à chaque instant t.

i. L'humidité relative de l'environnement :

L'humidité relative est un des paramètres essentiels comme dans le cas du retrait, car la valeur finale de fluage dépend des conditions hygrométriques (humidité). Plus l'humidité relative est basse, plus le fluage est important. Plusieurs recherches [12,25,26,27], ont montré que le fluage est important dans des régions sec tandis que dans des régions où l'humidité relative est importante, le fluage est moins important ou même négligeable. Selon TROXELL et RAPHAEL [28], ont confirmé le fluage varie linéairement avec l'humidité relative.

Pour une humidité relative constante on ne trouve que le fluage propre, et lorsque l'humidité varie le fluage de dessiccation apparaisse (figure 1-16). L'effet de l'humidité relative est montré sur la figure 1-16 et le tableau 1-3 .

Tableau 1-3: La déformation en millimètres par mètre a cinq ans d'un béton chargé a 100 kgf/cm^2
[29]

Epoque de chargement	Conservation	
	Air à 50% d'humidité	Eau
7 jours	2,2	0,8
3 mois	1,5	0,5
2 ans	0,9	0,35

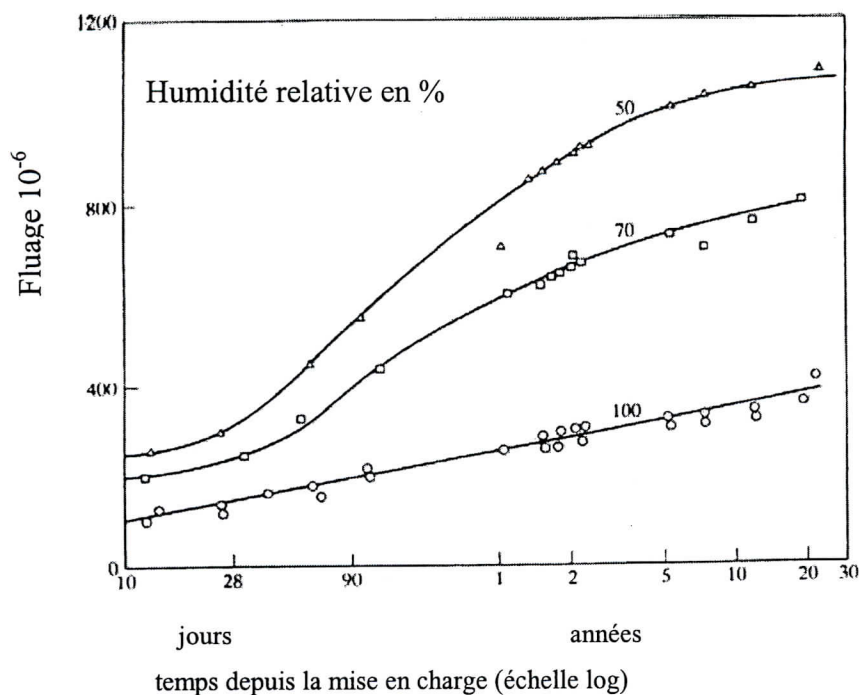


Figure 1-16 : Fluage d'un béton curé jusqu'à l'âge de 28 jours, puis chargé et conservé Aux différentes humidités [28]

ii. Rapport contrainte /résistance :

La déformation instantanée, comme le fluage, sont proportionnels à la charge appliquée, lorsque celle-ci reste à l'intérieur d'un certain domaine. Ce domaine serait tel que le rapport contrainte appliquée/résistance du béton soit compris entre 0 et 0,4 à 0,7. Au-delà d'une certaine limite, il se produirait des micros-fissures dans le béton [3,4,5,6], de sorte que le fluage progresserait proportionnellement beaucoup plus que la charge appliquée. C'est ainsi que la limite de la contrainte à partir de laquelle le fluage cesserait d'être proportionnel à la charge appliquée serait d'autant plus élevée que la résistance du béton serait plus forte. Selon BERTHIER [15], la bonne résistance mécanique d'un béton n'est pas un critère suffisant de la qualité du béton, en ce qui concerne son utilisation en béton précontraint. Il a trouvé que deux bétons ayant sensiblement la même résistance au moment de la mise en charge ont des modules nettement différents et un comportement sous charge différent aussi.

iii. L'âge du béton au moment de chargement :

L'âge du béton au moment de chargement est également un paramètre très important. Plus le béton est chargé tôt et plus le fluage est important (figure 1-17)

Les déformations instantanées et le fluage sont d'autant plus élevés que le béton est chargé à un âge plus jeune, car la résistance de béton est faible. Puisque cette dernière est inversement proportionnelle aux déformations, par conséquent le fluage et la déformation élastique seront importants.

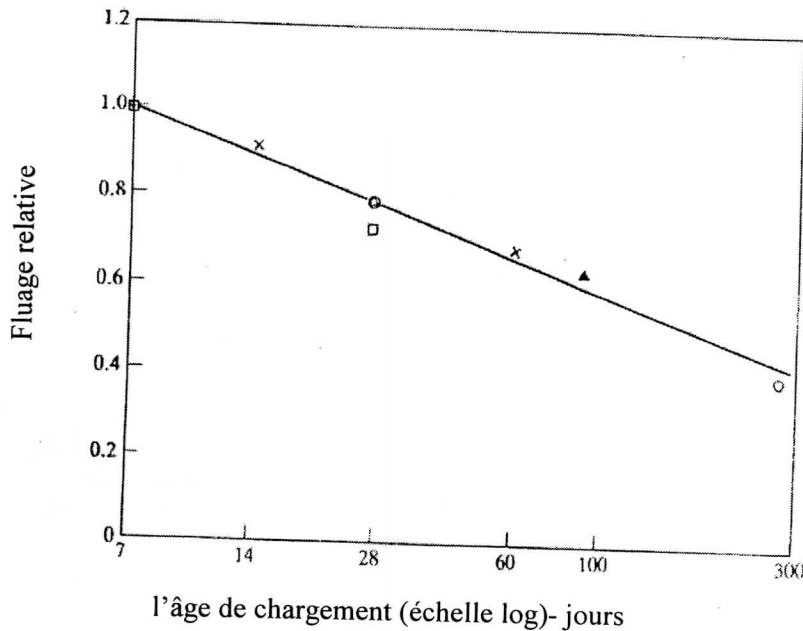


Figure : 1-17 : L'effet de l'âge de béton au moment de la mise en charge sur le fluage [30]

i. La dimension des ouvrages et le pourcentage d'armature:

Le fluage est d'autant plus important que le rapport surface/volume de la pièce sollicitée est plus élevé. Selon certains chercheurs [10], le temps nécessaire pour produire un fluage déterminé serait proportionnel au rapport :

$$(V/S)^{1,5} \quad (\text{dans le cas d'ouvrage conservé dans l'air})$$

A travers la figure (1-18) qui montre l'effet de fibre d'acier sur le fluage on constate qu'il n'y a pas une différence entre le fluage du béton plain et le fluage du béton renforcé (1,5%), alors que lorsque le pourcentage d'armature égal 1% le fluage est un peu plus grand.

Au contraire BISSONNETTE et PIGEON [31] ont trouvé que les fibres d'acier augmente le fluage de béton.

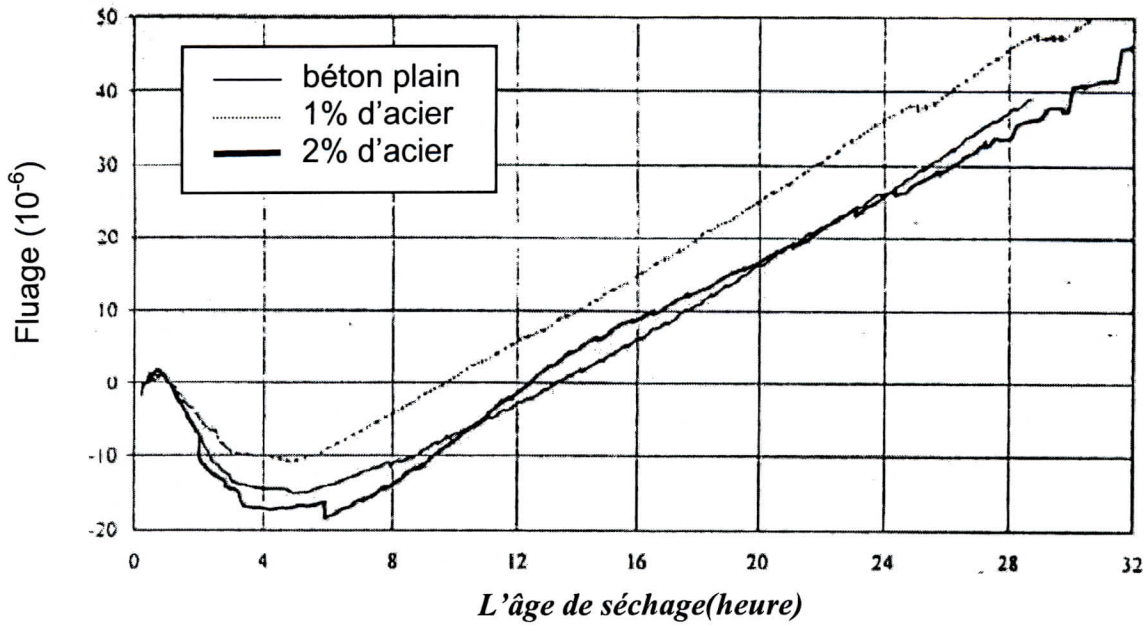


Figure :1-18 : Développement de fluage dans les bétons plain et les bétons renforcés (rapport $E/C=0,7$ et période de la cure= 1 jour) [31]

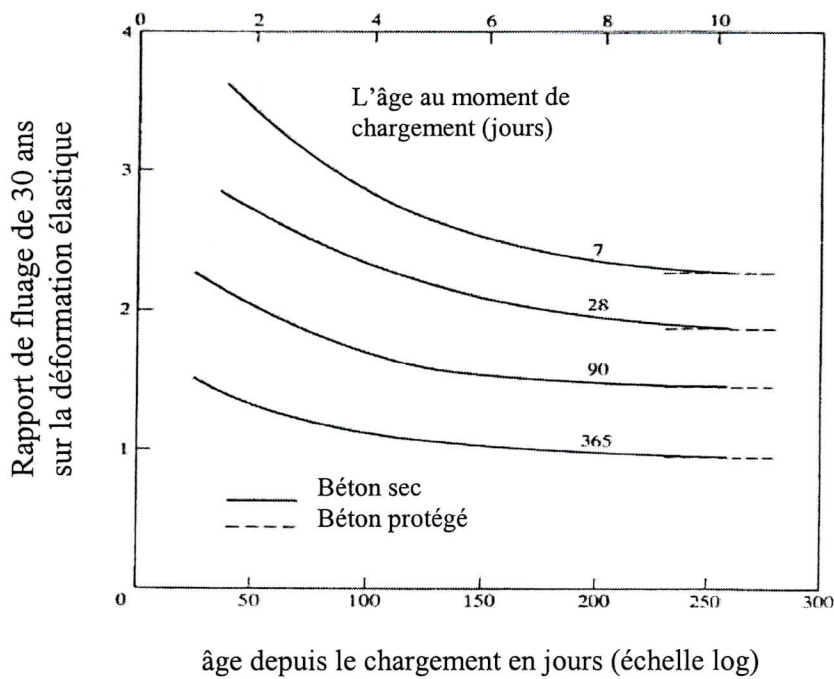


Figure :1-19 : Influence du rapport volume/surface sur le rapport fluage/déformation élastique pour béton exposé à un environnement sec et béton protégé conservé à une humidité relative de 60 % [12]

v Dosage en ciment et en eau:

Le fluage obtenu sur la pâte pure est plus élevé de deux à trois fois que celui obtenu sur un béton confectionné avec le même ciment et dosé à 350 kg/m^3 [10]. Cette constatation a lieu aussi bien pour une conservation dans l'eau que pour une conservation dans l'air. Le même phénomène est observable en ce qui concerne les déformations instantanées sous charge. En effet, on sait que dans un béton c'est surtout la pâte pure de ciment qui flue et celle-ci ne représente qu'environ 30% du volume du béton. Le fluage est lié étroitement au rapport eau/ciment. Pour un rapport E/C élevé, la porosité augmente dans la pâte de ciment, donc la résistance diminue et le fluage augmente (figure 1-20).

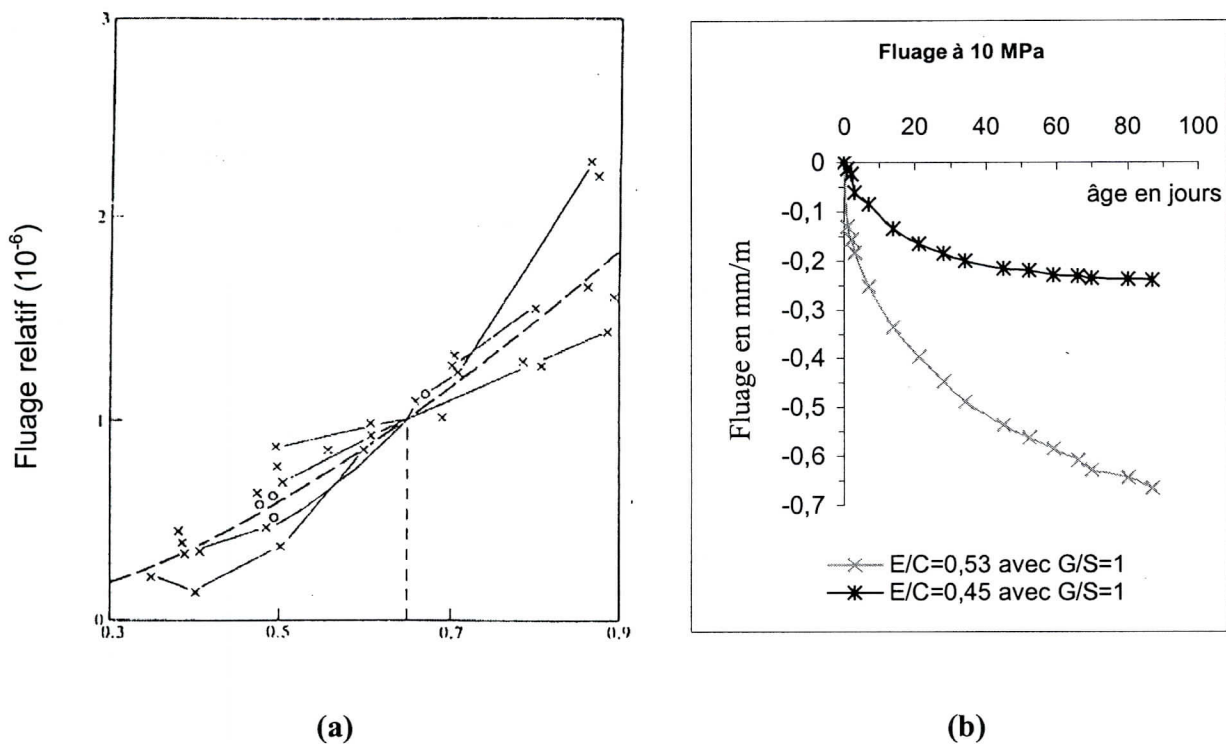


Figure 1-20 : Influence du dosage en eau et en ciment sur le fluage.

(a) - [32] ; (b) - [15].

vi La température :

Beaucoup de chercheurs ont trouvé que le fluage augmentait avec un accroissement de la température [12,26,33]. Certains ont trouvé qu'au-delà d'une température donnée (60 à 80 °C), le fluage pouvait rediminuer. Il y aurait donc selon eux un fluage maximal pour une température voisine de 70 °C par exemple. D'autre par contre, opérant dans des conditions expérimentales sans doute un peu différentes, ont trouvé qu'au contraire il y avait une augmentation constante du fluage

avec la température. England et Ross [10], ont obtenu des valeurs de fluage doublées à 80°C et quadruplées à 140°C par rapport à 20°C. De toute façon, et bien que le problème soit complexe et certains résultats contradictoires, la température exerce sur le fluage une action non négligeable. Cruz [10] a trouvé par exemple que le fluage pouvait être multiplié par six à 300°C et par quinze à 500°C (figure 1-21),

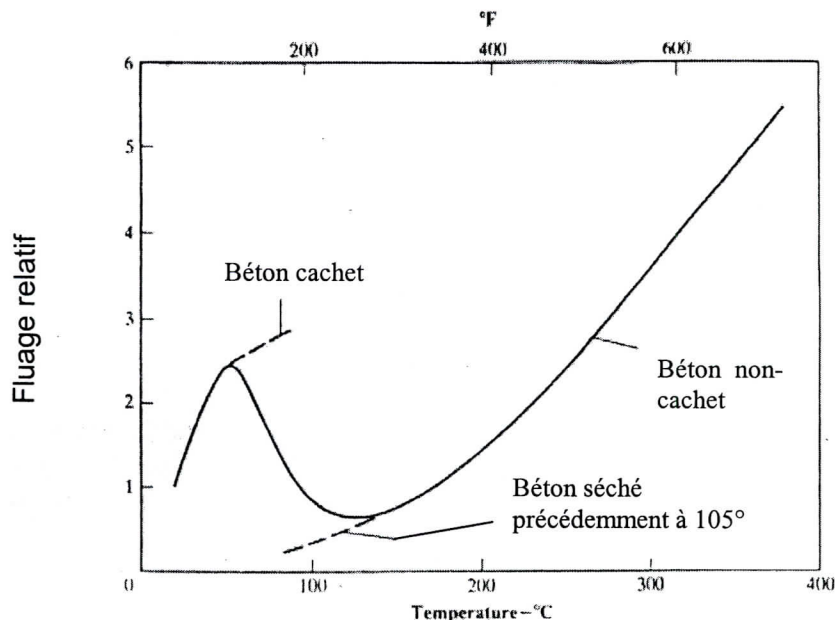


Figure 1-21 : Influence de la température sur le fluage relative [34]

vii. Les adjuvants :

Les adjuvants modifient assez peu le fluage lorsque les résistances mécaniques sont inchangées. Par contre, si un adjuvant augmente les résistances, le fluage est diminué, et inversement si un adjuvant fait baisser les résistances mécaniques le fluage est augmenté. C'est ainsi qu'un réducteur d'eau, un accélérateur de prise peuvent diminuer les déformations instantanées ainsi que le fluage, alors que ces déformations sont d'autant plus importantes que le pourcentage en air occlus additionné est plus élevé (dans ce cas l'augmentation du fluage n'est qu'une conséquence de la baisse des résistances mécaniques).

viii. Les granulats :

Les granulats interviennent 80% du volume du béton et s'opposent au fluage de la pâte qui les entoure, par leur module de déformation, Ils sont plus ou moins compressibles. Par une grande série des simulations, Le ROY [35] a constaté que le module élastique des granulats Eg a une

grande influence sur le béton et spécialement sur le fluage, alors que cet effet sur le retrait est mineur. Le fluage des roches est beaucoup plus faible que celui de la pâte pure de ciment [10]
 Les granulats peuvent se déplacer légèrement sous l'effet des charges appliquées. Certains granulats poreux peuvent même <<absorber>> un peu de pâte pure. De LARRARD [36] a constaté que le fluage peut ainsi varier du simple au triple suivant le type et la densité des granulats utilisés.

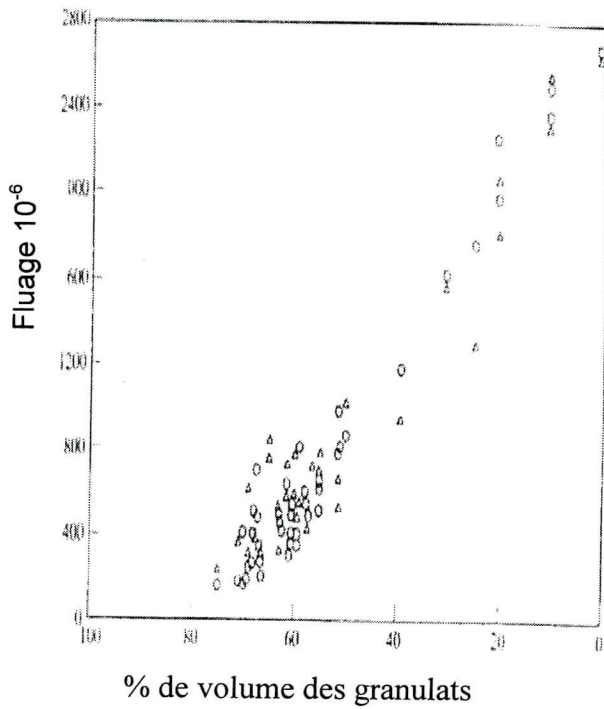


Figure: 1-22: Influence de la quantité des granulats sur le fluage [12]

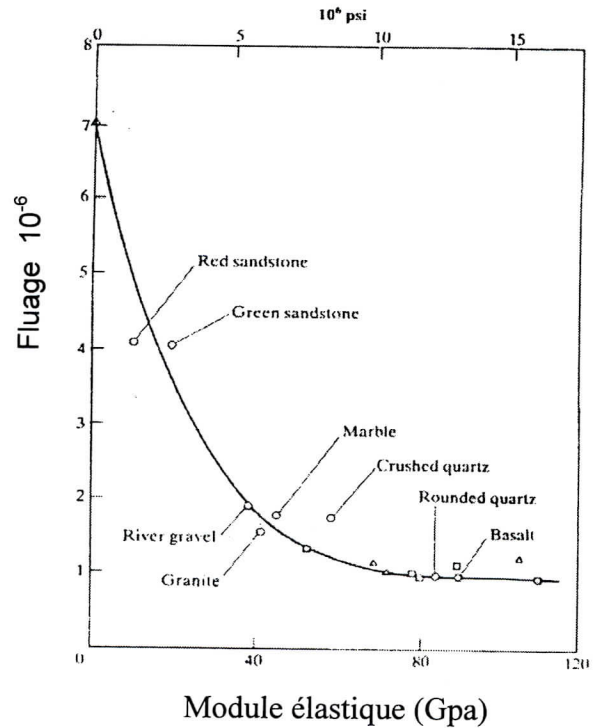
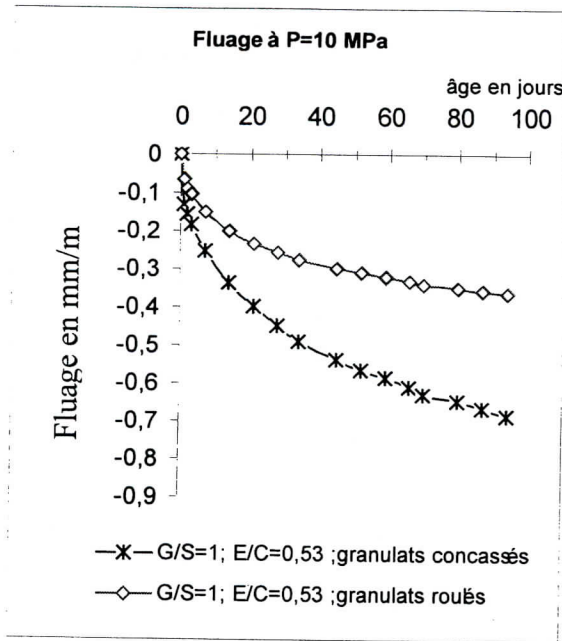
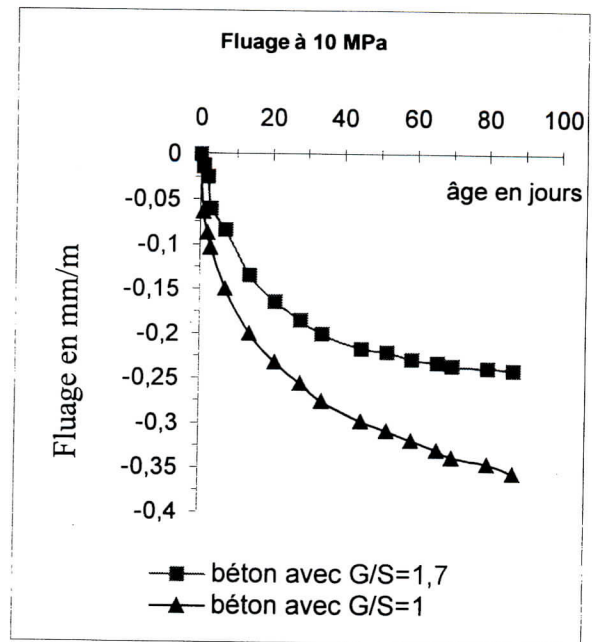


Figure 1-23 : Influence du Module élastique des granulats sur le fluage [12]

D'après RENE [15], le fluage est affecté par le type et la quantité des granulats, le fluage est plus important lorsque le béton contient des granulats granitiques concassés que lorsqu'il contient des granulats roulés (figure 1-25)



(a) l'effet de type des granulats (concassés-roulés)



(b) l'effet du rapport Gravier/Sable

Figure : 1-24 : Influence des granulats sur le fluage [15]

1.7. RETRAIT ET FLUAGE DE BETON A HAUTE PERFORMANCE:

De plus en plus de projecteurs font aux bétons à hautes performances pour réduire les délais de construction car la résistance nécessaire au décoffrage, à la manutention ou à la précontrainte plus au moins provisoire être atteindre très tôt. Dans le cas des ouvrages précontraints, il ne suffit cependant pas de prévoir de développement des résistances en compression et traction car le calcul structural est assujetti, entre autres choses, à la connaissance des déformations différées de retrait et de fluage du béton.

1.7.1 Retrait :

D'après WITTMANN [8], le retrait par auto-dessiccation est très négligeable pour le béton ordinaire ; par contre pour le cas d'un béton à haute performance, là où on a des faibles rapports (Eau /Ciment) le retrait peut dépasser 10^{-4} après quelques jours de conservation. Ceci est la conséquence du rapport (Eau / Ciment) qui diminue l'hygrométrie du matériau.

Tableau 1-5: Retrait des bétons avec Eau/Liant égal à 0,23 à l'âge de 40 jours [39]

Type de Retrait	Dosage de fumée de silice (%)			
	5	5	10	15
Retrait total (10^{-6})	386	372	427	470
Retrait d'auto- dessiccation (10^{-6})	138	155	189	252
Retrait de séchage (10^{-6})	248	217	238	218

Tableau 1-6: Retrait des bétons avec Eau/Liant égal à 0,28 à l'âge de 80 jours [39]

Type de Retrait	Dosage de fumée de silice (%)			
	5	5	10	15
Retrait Total (10^{-6})	548	448	438	496
Retrait d'auto- dessiccation (10^{-6})	212	155	244	320
Retrait de séchage (10^{-6})	336	228	194	—

1.7.2 Fluage :

Selon TAZAWA et YONEKURA [40], le fluage des bétons aux fumées de silice est supérieur à celui des bétons ordinaires. BROOKS [39] a trouvé qu'un faible dosage en fumée de silice (5 à 10 %) réduit sensiblement de fluage, mais si le dosage est supérieur à 16 %, le fluage augmente. Paradoxalement, DE LARRAD [41], a confirmé que les bétons à hautes performances fluent moins que les bétons ordinaires (Figure 1-27). Il a trouvé que le coefficient de fluage d'un béton ordinaire passe de 1,42 à 0,55 pour le béton à très haute performance.

A partir de ces résultats, il a constaté que le fluage de dessiccation est réduit de 96% puisque le rapport de la déformation est passé de 0,69 pour le béton ordinaire à 0,2 pour le béton à très haute performance.

Tableau 1-9: résultats de fluage après huit mois [41] :

	Béton Ordinaire	BTHP
Fluage propre (10^{-6})	330	299
Rapport de la déformation différée à la déformation instantané	0,79	0,53
Fluage dessiccation	310	10
Rapport de la déformation différée à la déformation instantanée	0,69	0,02

D'après De RENNARD [42] le fluage du béton à très haute performance (BTHP) se caractérise par une cinétique rapide (à 7 jours de chargement, une proposition de 67% de la déformation à un an est déjà effectuée contre seulement 41 % pour la tension).

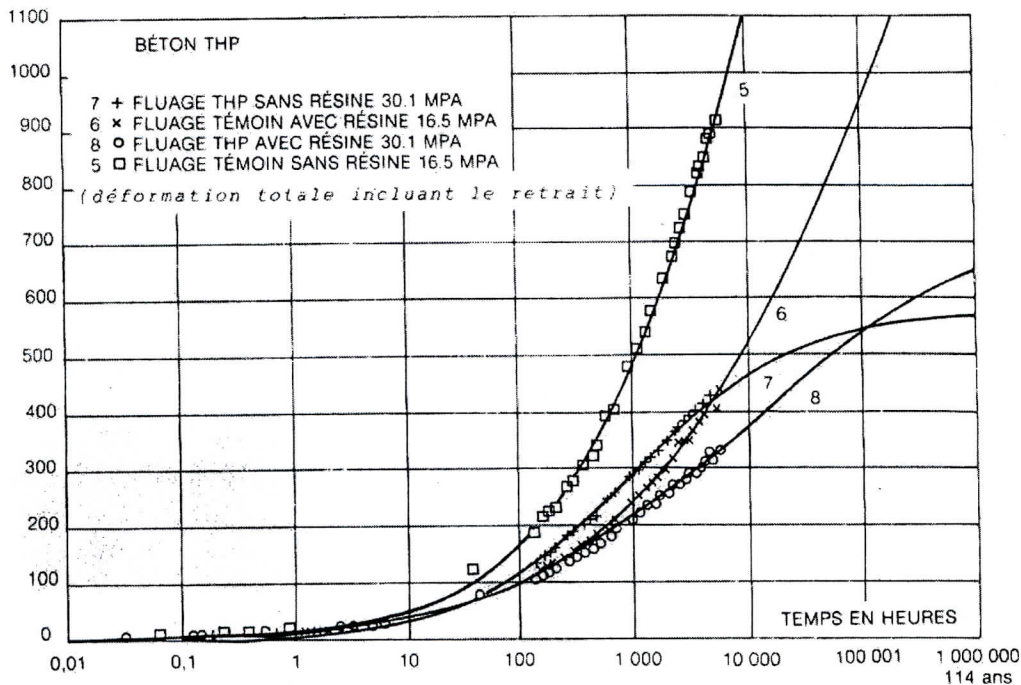


Figure : 1-26 : Comparaison entre fluage de Béton à très haute performance et fluage de béton témoin[37]

1.8. RELAXATION DES ARMATURES :

La relaxation des armatures est un relâchement de tension à longueur constante. Elle n'apparaît pour les aciers à haute limite élastique utilisée en béton précontraint que pour les contraintes supérieures à 30 ou 40% de leur contrainte de rupture garantie [3,6]

Elle dépend de la nature de l'acier et de son traitement et on distingue deux types d'aciers :

- a relaxation normale RN
- a très basse relaxation TBR

Compte tenu de la faible différence de coût existant entre ces aciers, l'économie réalisée sur les aciers par une perte par relaxation plus faible, fait choisir en général les aciers TBR. Un acier est caractérisé par sa relaxation à 1000 heures exprimée en pour cent (‰)

En générale : $\rho_{1000} = 2,5 \text{ ‰}$ pour les acier TBR.

$\rho_{1000} = 8 \text{ ‰}$ pour les acier RN.

Les aciers utilisés dans les ouvrages de béton précontraints sont de deux natures différentes :

- aciers actifs créent et maintiennent de précontrainte sur le béton.
- aciers passifs nécessaire pour reprendre les efforts tranchants (en l'absence d'étriers précontraints) pour limiter la fissuration

L'augmentation des résistances des aciers de précontrainte à été une condition nécessaire pour le développement du béton précontraint. A l'inverse des armatures de béton armé qui se contente d'un acier de qualité courante, les armatures de précontrainte exigent un acier satisfaisant à des conditions multiples et souvent contradictoires, dont les plus importants sont :

- Une ductilité suffisante pour permettre en particulier une bonne adaptation en cas de déformations anormales de la structure : séismes, tassement d'appuis...etc.
- Un faible relaxation.
- Un coût aussi bas que possible, afin de maintenir la compétitivité du béton précontraint par rapport aux matériaux concurrents, soit essentiellement le béton armé pour le bâtiment et l'acier de charpente pour les ponts [6]

Le module d'élasticité des fils des barres E_p est pris conventionnellement égale à 200 000 MPa, Pour les torons d'usage confirmé par les règles BPEL [3] et adopter la valeur $E_p=190000\text{Mpa}$

Pour les fils tréfilés et les torons les règles BPEL [3] admettent le diagramme contrainte - déformation représenté ci-après qui comprend une partie rectiligne pour

$$\varepsilon_p = \frac{\sigma_p}{E_p} + 100 \cdot \left(\frac{\sigma_p}{f_{peg}} - 0.9 \right)^5 \quad (1-1-a)$$

$$\text{Pour les valeurs de } \sigma_p \text{ comprise entre } 0 \text{ et } 0,9 f_{peg} : \varepsilon_p = \frac{\sigma_p}{E_p} \quad (1-1-b)$$

Pour les fils trempés et revenus et pour les barres le diagramme contrainte - déformation est idéalisé sous la forme de 2 droites, les valeurs de la contrainte sont le suivantes :

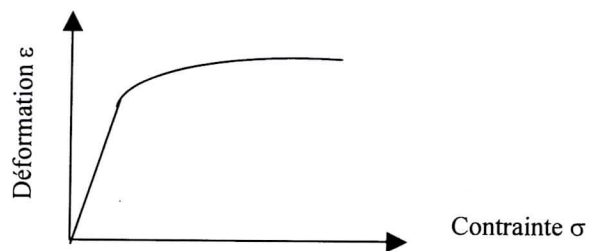


Figure 1-27 : Diagramme contrainte - Déformation [4]

Des armatures selon BPEL

$$\text{et } \begin{cases} \sigma_p = E_p \varepsilon_p & \text{pour } \varepsilon_p < \frac{f_{peg}}{E_p} \\ \sigma_p = f_{peg} & \text{pour } \varepsilon_p > \frac{f_{peg}}{E_p} \end{cases} \quad (1-2)$$

La relaxation est définie conventionnellement comme la perte relative de tension que subit au cours du temps, à une température de $20^\circ \pm 1^\circ\text{C}$, une éprouvette initialement tendue et maintenue à longueur constante.

La relaxation varie rapidement en fonction des conditions de l'essai [3] :

- l'influence de la charge initiale joue un rôle important, la valeur de référence habituelle soit $0,7 F_r$ correspond sensiblement à la tension moyenne d'une armature de précontrainte compte tenu des pertes, il est noter que F_r est la valeur vraie de la force de rupture de l'armature.

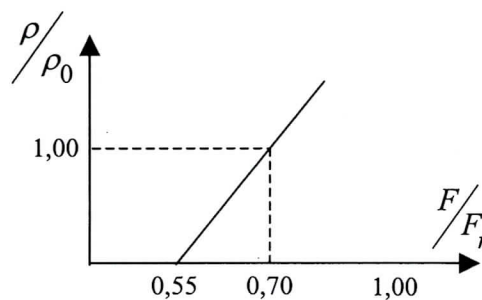


Figure 1-28 : La relaxation en fonction de rapport F/F_r , selon le code BPEL-91 [4]

- La température influe considérablement sur la relaxation. Des essais conduits par électricité de France aux températures de 20°C , 40°C et 80°C ont montré qu'à cette dernière température, on pouvait atteindre en quelques heures la relaxation qui ne se produit qu'au bout de milliers d'heures à température normale. Il semble que la chaleur ne provoque qu'une accélération de la relaxation, sans modification de sa valeur finale [6].

- Les conditions mêmes de l'essai jouent également un grand rôle dans la détermination de la relaxation. L'essai de cette dernière est beaucoup plus délicat que l'essai de fluage car s'il est simple de mesurer la longueur d'une armature soumise à une charge constante, il est au contraire très difficile d'ajuster la charge d'une armature de façon à maintenir sa longueur constante [6].

1.9. ADHERENCE ACIER - BETON :

L'adhérence acier - béton est caractérisée par la longueur conventionnelle de scellement ; Celle-ci est définie par la longueur d'enrobage du béton nécessaire pour assurer le transfert de la force de la précontrainte totale de l'armature au béton. Ce caractère est évidemment important pour la précontrainte par pré-tension.

L'interaction acier béton ou phénomène d'adhérence dépend dans une large mesure de beaucoup de paramètres ; les uns intéressant l'acier, les autres le matériau, l'optimisation de cette liaison revient à optimiser les caractéristiques du béton par une composition étudiée préalablement et les caractéristiques de l'acier par un choix rigoureux de sa surface, de sa limite d'élasticité et de son diamètre. D'après les travaux de LORRAIN et KHELLAFI [43] ils ont constaté que les déplacements de l'armature par rapport au béton d'enrobage est d'autant plus faible que le béton vieillit. CAIRMS et RAMLI [43], ont testé l'effet de la peinture protectrice il ont trouvé que la peinture epoxydique diminue la contrainte d'adhérence de 15 à 35%. LORRAIN et HAMOUINE [43] ont trouvé que pour un même béton utilisant deux armatures l'une présentant une rugosité et l'autre lisse, la contrainte d'adhérence pour la première est plus importante et plus grande que la seconde avec rapport de 2 à 3.

Sur les études dirigées par GAMBAROIVA et ROSATI [43] sur l'adhérence des barres de faibles et de grands diamètres, enrobées dans un béton pré fissuré, on remarque que le rôle du diamètre n'est pas négligeable et que les diamètres réduits sont quelques peu avantageux, en ce qui concerne la résistance et la rigidité de l'adhérence. De LARRARD [44], a constaté que l'adhérence des grosses armatures est inférieure à celle des petites armatures.

1.10. CONCLUSIONS :

D'après ce qui a été présenté dans ce chapitre, on constate que l'importance des pertes différées est considérable devant les pertes instantanées, non seulement parce qu'elle sont variable dans le temps, mais surtout à cause des facteurs qui influent sur ces pertes et qui sont nombreux. D'une part certains de ces facteurs sont instables tels que l'humidité et la température ce qui rend les pertes non linéaires, par conséquent le contrôle et la modélisation des pertes deviennent difficiles. Et d'autre part il existe plusieurs facteurs liés à la composition du béton, et qui sont difficiles à exprimer sous forme des coefficients tels que la nature des granulats, le degré d'hydratation du ciment, et les adjuvants.

Pour les autres facteurs tels que le rapport Eau/Ciment, et la période de cure sont pris en compte par quelques règlements et négligeables pour les autres (dans l'annexe A on résume les pertes et les facteurs influant sur ces pertes).

Chapitre II

Les Méthodes d'estimation
des pertes de précontrainte

LES METHODES D'ESTIMATION DES PERTES DE PRECONTRAINTE

2.1 INTRODUCTION :

Les pertes de précontrainte ont fait l'objet depuis l'apparition des problèmes de la précontrainte d'un très grand nombre d'étude et de publication ; ces études se basent sur les facteurs qui influent sur les pertes (conditions d'environnement de fabrication du béton et la qualité de celui-ci, de la propriété des armatures utilisées, de coulis d'injection, la technique de la mise en tension, ce qui rend la tâche difficile pour l'ingénieur affronté avec les problèmes de modélisation), car l'acceptation universelle de toute méthode doit être précédée par confirmation par des dimensions sur les structures, malheureusement, il y'a peu de donnée d'exactitude disponible à long terme pour entreprendre ces travaux.

Vu l'importance d'estimation des pertes avec une grande précision, plusieurs méthodes sont élaborées pour prédire les pertes, et qui basent sur les données expérimentales.

Ce pendant, peu d'études ont été réalisées pour comparer plusieurs méthodes à la fois : Roper et Bott [45] ont trouvé que le modèle CEB-FIP 1978 estime mieux les déformations de quelques bétons australiens que le modèle CEB-FIP 1970.

J.J.Brooks et H.AL-Quarra [13] ont trouvé que le modèle CEB 90 estime mieux le fluage d'un béton qui contient des plastifiants.

Selon David B et Harold [36], les méthodes d'estimation de retrait les plus complexes ne peuvent pas être nécessairement plus exacts que les modèles simples. La présentation des paramètres tels que le rapport Eau/Ciment, la quantité d'air et le pourcentage des granulats ne peut pas nécessairement mener à améliorer l'exactitude des modèles. Il a été montré que le modèle AS1481 exécuté pour la prédiction de retrait est mieux que les autres modèles surtout Lorsque la résistance du béton dépasse 32 MPa.

Saïdi, Hutchens et Gardella [59] ont trouvé que le modèle AASHTO est plus raisonnable dans le calcul des pertes différées dues au retrait et au fluage du béton lorsque l'humidité relative est basse.

M. Boukendakdji [33] a constaté que pour des structures non spéciales, il est préférable d'utiliser la méthode de ACI que d'autres méthodes parce qu'elle est simple et prend en considération l'effet de plusieurs sources de pertes d'une façon simple et séparable.

Dans notre étude comparative j'ai choisi quatre codes : ACI-92 ; BPEL-91 ; ECO2-92 ; PCI-75.

Le but de ce chapitre est de présenter les quatre méthodes de calcul des pertes citées auparavant.

2.2. LE CODE BPEL- 91 : [3, 4, 6]

Le règlement BPEL-91 tient compte de l'effet de la procédures de la précontrainte (post-tension, pré-tension) dans les calculs des pertes instantanées. Dans le cas de la précontrainte par post-tension, les armatures subissent des pertes de tension instantanées dues aux frottements des armatures, glissement d'ancrage et le raccourcissement élastique du béton. Tandis que dans le cas de la pré-tension il se produit des pertes à la mise en œuvre dues aux pertes entre la mise en tension des armatures, les pertes entre la mise en tension des armatures et la mise en précontraint de l'élément et les pertes à la mise en précontraint de l'élément. Concernant les pertes différées, les pertes sont les mêmes dans les deux procédures de la mise en précontraint.

La valeur probable des forces de précontrainte, au jour j et dans la section d'abscisse x, est calculée à partir de la tension $\sigma_{pmj}(x)$ (ou simplement σ_{pm}) :

$$\sigma_{pmj}(x) = \sigma_{po} - \Delta\sigma_{pj}(x) \quad (2-1)$$

σ_{po} désignant la valeur probable de la tension à l'origine

$\Delta\sigma_{pj}(x)$: désignant la perte de tension totale, c'est-à-dire la somme de toutes les pertes effectuées au jour j et dans la section d'abscisse x.

2.2.1 LES PERTES DE TENSION DANS LE CAS DE LA PRECONTRAINTE PAR POST-TENSION :

2.2.2.1 Les Pertes de Tension Instantanées :

Dans le cas de la post-tension, les armatures de précontrainte subissent des pertes de tension instantanées qui sont dues aux frottements des armatures, le glissement d'ancrage et la déformation élastique du béton.

i- Les pertes de tension par déformations élastique du béton :

La perte de tension qui résulte des déformations instantanées du béton dues à l'action des armatures de précontrainte et aux autres actions permanentes peut être assimilée à une perte moyenne affectant chacune des armatures et égale dans une section donnée à :

$$\Delta \sigma_{bj} = k \times \frac{E_p}{E_{bj}} \times \delta_{po} \quad (2-2)$$

$\Delta \sigma_{bj}$: désignant la variation de contrainte agissant au niveau du centre de gravité des armatures de précontrainte dans la section considérée sous les diverses actions permanentes appliquées au jour j.

k un coefficient multiplicateur égal à :

- 1/2 pour les variations de contrainte dues à la précontrainte relative à la phase de mise en tension des armatures considérées et aux actions permanentes appliquées simultanément.
- 1 pour les variations de contraintes dues aux actions permanentes appliquées postérieurement à cette phase de précontrainte, y compris celles dues aux armatures actives mises en tension ultérieurement.

Dans le cas de n armatures identiques tendues successivement, le coefficient k est en réalité égal à $\frac{n-1}{2n}$. Il se rapproche d'autant plus de 1/2 que le nombre d'armatures est plus élevé.

ii- Les pertes de tension par frottement de l'armature :

La tension $\sigma_{po}(x)$ d'une armature de précontrainte, dans une section donnée, lors de sa mise en tension, compte tenu des frottements, à partir de la tension σ_{po} à l'ancrage actif le plus proche, par la formule suivante :

$$\sigma_{po}(x) = \sigma_{po} e^{-f\alpha - \varphi x} \quad (2-3)$$

La perte de tension par frottement, dans la section considérée, est égale à : $\sigma_{po} - \sigma_{po}(x)$.

$$\Delta \sigma_{po}(x) = \sigma_{po} \times (1 - e^{-f\alpha - \varphi x}) \quad (2-4)$$

Dans laquelle :

x : est la distance de la section considérée à celle des sorties des organes de mise en tension ;

α : La déviation angulaire totale du câble sur la distance x ;

f : Le coefficient de frottement en courbe (rd^{-1}) ;

φ : Le coefficient de frottement par unité de longueur (m^{-1})

Les valeurs des coefficients f et φ dans des conditions normales de mise en oeuvre sont fixées par le tableau 2-1 :

Tableau 2-1 : Les valeurs des coefficients de frottement selon le code BPEL-91.

Cas	Nature des armatures	f		φ m^{-1}
		$3 < R < 6$ (mm)	$R > 6$ (mm)	
Un câble ne traversant pas des joints ou surfaces de reprise.	Fils tréfilés rond et lisses	$(22 - R)/100$	0,16	0,002
	torons	$(24 - R)/100$	0,18	
Deux câbles traversant de nombreux joints ou reprise de bétonnage.	Fils tréfilés rond et lisses	$(24 - R)/100$	0,18	0,003
	torons	$(26 - R)/100$	0,20	

- **Cas des torons gainés-protégés :**

Lorsque le câble est constitué de torons gainés protégés enfilés dans un conduit que l'on injecte au coulis de ciment avant d'effectuer les mise en tension (de façon à figer les positions des armatures et à éviter l'écrasement de leurs gaines individuelles), il convient de revenir à la formulation générale (II -1), en utilisant pour f et φ les valeurs suivantes :

$$f = 0,05 \quad ; \quad \varphi = 0,001 \text{ m}^{-1}$$

- **Câbles extérieurs au béton :**

On peut utiliser pour f et φ les valeurs suivantes :

$$0,20 \leq f \leq 0,30 \quad \text{pour les tubes en acier}$$

$$0,12 \leq f \leq 0,15 \quad \text{pour les tubes en polyéthylène haut densité (PEHD)}$$

iii- Les pertes de tension dues au glissement d'ancrage :

La perte de tension, qui peut résulter du glissement de l'armature par rapport à son ancrage, du tassement ou de la déformation de l'ancrage, appelée « perte par recul d'ancrage », est obtenue à partir de la valeur fixée par l'arrêté d'agrément du procédé de précontrainte utilisé.

$$\Delta\sigma_{po}(x) \approx \sigma_p \times (\lambda - x) \quad \text{pour } x < \lambda \quad (2-5)$$

g : Glissement par rentrée de l'ancrage en mètre.

P : Pente moyenne de la contrainte en fonction de l'abscisse après frottement :

$$P = \frac{\Delta\delta f(x)}{x} \quad (2-6- a)$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{gEp}{P}} = \text{abscisse de la limite d'influence du glissement à l'ancrage.} \quad (2-6- b)$$

2.2.2 LES PERTES DE TENSION DANS LE CAS DE LA PRECONTRAINTE PAR PRE-TENSION :

2.2.2.1 Les Pertes de Tension à la Mise en Oeuvre (glissement et frottement parasite) :

i- Les pertes à la mise en tension des armatures :

la perte qui résulte du glissement de l'armature de longueur l par rapport à son ancrage.

$$\Delta\sigma = \frac{Ep \times g}{l} \quad (2-7)$$

ii- Les pertes entre la mise en tension des armatures et la mise en précontrainte de l'élément :

On calcul la somme des pertes dues à la relaxation des aciers et de retrait du béton de la même manière que celle de la précontrainte par post- tension.

iii- Les pertes à la mise en précontrainte de l'élément

La perte de tension à la mise en précontrainte de l'élément résulte de la déformation instantanée du béton due à l'action des armatures lors de leur relâchement.

Cette perte est prise égale à :

$$\Delta\sigma_{pim} = E_p \frac{\sigma_{bj}}{E_{bj}} \times (1 + k) \quad (2-8)$$

σ_{bj} Désignant la contrainte agissant au niveau du centre de gravité des armatures de précontrainte sous les diverses actions permanentes appliquées au jour j de la mise en précontrainte.

k : caractérise la déformation non recouvrable du béton, la quelle se manifeste lorsque σ_{bj} est supérieure à $0,5f_{cj}$ ce qui est fréquent dans les éléments préfabriqués précontraint par prétension.

$$\left\{ \begin{array}{ll} \bullet K=0 & \text{si } \sigma_{bj} \leq 0,5f_{cj} \\ \bullet K=4 \left[\frac{\sigma_{cj}}{f_{cj}} - 0,5 \right]^2 & \text{si } 0,5f_{cj} \leq \sigma_{bj} \leq 0,66 f_{cj} \end{array} \right. \quad (2-9)$$

2.2.2.2 Les Pertes de Tension Différées :

Ces pertes sont dues au retrait et au fluage du béton et la relaxation des armatures. Les pertes différées finale est prise égale à :

$$\Delta \sigma_d = \Delta \sigma_r + \Delta \sigma_f + \frac{5}{6} \Delta \sigma_p \quad (2-10)$$

La perte de tension par relaxation de l'acier diminue sous l'effet du retrait et du fluage du béton. Il en a été tenu compte forfaitairement dans cette relation en minorant par 5/6 la valeur de la relaxation finale de l'acier.

i- Les pertes de tension dues au retrait du béton :

La perte finale de tension due au retrait du béton est égale à :

$$\Delta \sigma_r = \varepsilon_r [1 - r(j)] E_p \quad (2-11)$$

ε_r : Etant le retrait total du béton.

j : L'âge du béton au moment de sa mise en précontrainte

$r(t)$: Une fonction traduisant l'évolution du retrait en fonction du temps.

$$\varepsilon_r(t_0, t) = \varepsilon_r [r(t) - r(t_0)] \quad (2-12)$$

Où ε_r est la déformation finale de retrait, et $r(t)$ la loi d'évolution du retrait, qui varie de 0 à 1.

Lorsque le temps, t , compté à partir de la fabrication du béton, varie de zéro à l'infini.

On peut évaluer la loi d'évolution du retrait au moyen de l'expression donnée :

$$r(t) = \frac{t}{t + 9r_m} \quad (2-13)$$

Où t est exprimé en jours, et le rayon de la pièce r_m en centimètres ($r_m = \text{section} / \text{périmètre}$).

$$\varepsilon_r = k_s \varepsilon_0 \quad (2-14)$$

Le coefficient k_s dépend du pourcentage des armatures adhérentes $\rho_s = A_s/B$, rapport de la section des armatures passives longitudinales (et, dans le cas de la pré-tension, des armatures de précontraintes adhérentes) à la section transversale de la pièce. Il s'exprime par la formule :

$$K_s = \frac{1}{1 + 20\rho_s} \quad (2-15)$$

Le coefficient ε_0 dépend des conditions ambiantes et des dimensions de la pièce.

On prendra dans l'eau : $\varepsilon_0 = - 60 \times 10^{-6}$. (2-16- a)

Et dans l'air : $\varepsilon_0 = (100 - RH) \times \left(6 + \frac{80}{10 + 3r_m}\right) 10^{-6}$ (2-16- b)

Où RH est l'hygrométrie ambiante moyenne, exprimée en pourcentage d'humidité relative, et r_m est le rayon moyen de la pièce exprimé en centimètres (figure 2-1).

ii- Les pertes de tension dues au fluage du béton :

Si l'on applique sur un béton non chargé, à l'âge t_1 , une contrainte σ_1 que l'on maintient ensuite constante, on peut admettre que la déformation de fluage, à un instant donné, est proportionnelle à la déformation instantanée produite par la contrainte σ_1 , tant que cette contrainte reste inférieure à environ $0,7 f_{cj}$.

Les pertes totales dues aux fluages seront :

$$\Delta \sigma_f = \varepsilon_f \cdot E_p \quad (2-17)$$

La déformation de fluage qui apparaît dans l'intervalle de temps (t_1 , t) peut donc être évaluée au moyen de la formule :

$$\varepsilon_{fl}(t) = \varepsilon_{ic1} \cdot K_{fl}(t_1) \cdot f(t - t_1) \quad (2-18)$$

où :

ε_{ic1} : est la déformation conventionnelle instantanée produite par la contrainte σ_{ic1} .

$K_{fl}(t_1)$: est le coefficient de fluage correspondant à l'âge du chargement t_1 ,

$f(t - t_1)$: Loi d'évolution du fluage qui varie de 0 à 1 lorsque la durée du chargement, $(t - t_1)$, varie de 0 à l'infini.

▪ **déformation conventionnelle instantanée :**

La déformation conventionnelle instantanée du béton, initialement non chargé, sous l'effet d'une contrainte σ est la déformation instantanée qu'il subirait sous l'effet de cette contrainte s'il était âgé de 28 jours au moment du chargement.

Dans les cas où l'on a adopté le modèle linéaire pour la déformation instantanée, on a :

$$\varepsilon_{ic1} = \sigma_{ic1} / E_{i28} \quad (2-19)$$

$$E_{ij} = 11000 (f_{cj})^{\frac{1}{3}} \quad \text{en MPa} \quad (2-20)$$

$$\text{avec : } f_{cj} = \frac{j}{4,76 + 0,83 \times j} f_{c28} \quad f_{c28} \leq 40 \text{ MPa} \quad (2-21- a)$$

$$f_{cj} = \frac{j}{1,4 + 0,95 \times j} f_{c28} \quad f_{c28} \geq 40 \text{ MPa} \quad (2-21- b)$$

▪ **coefficient de fluage :**

Le coefficient de fluage, à l'âge t_1 de mise en charge, peut être évalué au moyen de l'expression :

$$K_{fl} = k_s [k_e + k_c k(t_1)] \quad (2-22)$$

les coefficients k_s , k_e , k_c et $k(t_1)$ étant définis ci-dessous :

- Le coefficient k_s dépend du pourcentage des armatures adhérentes longitudinales. Sa valeur est identique à celle donnée pour le retrait.

- Le coefficient k_c qui représente la limite inférieure du coefficient de fluage du béton non armé, lorsqu'il est chargé très vieux, est pris égal à 0,40.
- Le coefficient k_c dépend des conditions ambiantes et du rayon moyen de la pièce. Il est évalué au moyen de la formule suivante :

$$k_c = \left(\frac{120 - RH}{30} \right) + \left(\frac{2}{3} \right) \times \left(\frac{100 - RH}{20 + r_m} \right) \quad (2-23)$$

dans laquelle :

ρ_h : L'hygrométrie ambiante exprimée en pourcentage d'humidité relative : dans l'eau on prend $RH = 100$;

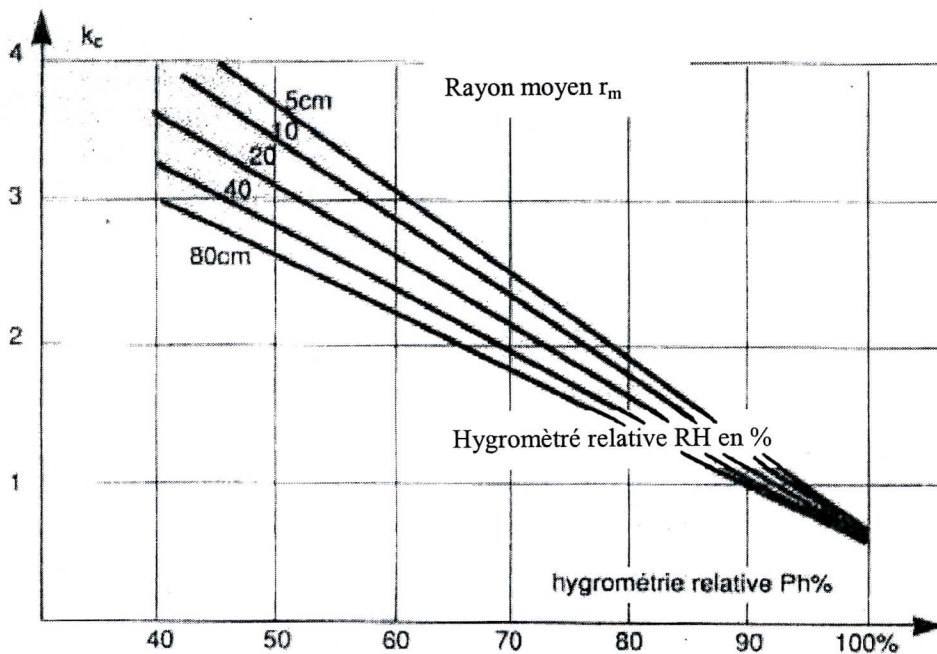


Figure : 2-1 : Représentation de paramètre K_c en fonction de l'hygrométrie rayon RH et du rayon moyen r_m [3]

$k(t_1)$: Dépend du durcissement du béton à l'âge de mise en charge. Il est donné par :

$$k(t_1) = \frac{100}{100 + t_1} \quad (2-24)$$

t_1 : L'âge du béton, exprimé en jours, compté à partir du jour de fabrication.

La loi d'évolution du fluage est donnée par l'expression (voir figure 2-2) :

$$f(t - t_1) = \frac{\sqrt{t - t_1}}{\sqrt{t - t_1} + 5\sqrt{r_m}} \quad (2-25)$$

Où r_m est le rayon moyen de la pièce, exprimé en centimètres, et $t - t_1$ la durée d'application du chargement, exprimée en jours.

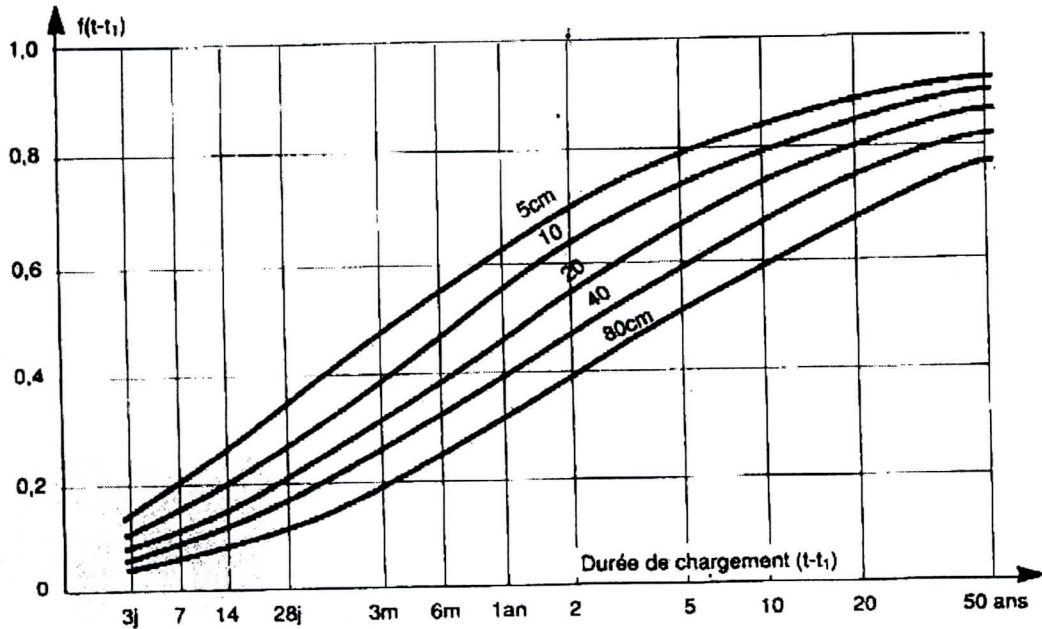


Figure 2-1 : Représentation de la fonction $f(t - t_1)$ en fonction de la durée de chargement et du rayon moyen r_m [3]

iii- Les pertes de tension dues à la relaxation de l'acier :

La perte finale de tension due à la relaxation de l'acier est donnée par :

$$\Delta \sigma_p = \frac{6}{100} \rho_{1000} \left(\frac{\sigma_{pi}}{f_{prg}} - \mu_0 \right) \sigma_{pi} \quad (2-26)$$

μ_0 : étant un coefficient pris égal à :

$$\left\{ \begin{array}{l} 0,43 : \text{pour les armatures à très basse relaxation (TBR).} \\ 0,30 : \text{pour les armatures à relaxation normale (RN).} \\ 0,35 : \text{pour les autres armatures.} \end{array} \right.$$

f_{prg} : contrainte de rupture garantie.

σ_{pi} : tension initiale = $\sigma_{p0} - \Delta \sigma_{pi}$

$\Delta \sigma_{pi}$: Pertes instantanées.

ρ_{1000} : est la valeur garantie de la relaxation isotherme à 1 000 heures.

Si on a besoin de connaître la perte par relaxation au temps t ou si on souhaite plus de précision pour l'estimation de la relaxation finale, on utilise la formule suivante :

$$\Delta \sigma_{p(x,t)} = k_1 \rho_{1000} \left(\frac{t}{1000} \right)^{\frac{3}{4}(1-\mu)} \left(e^{\frac{10\mu-7,5}{k_2}} \right) \times \sigma_{pmt}(x) \quad (2-27)$$

dans laquelle :

t : est exprimé en heures,

$\mu = \frac{\sigma_{pmt}(x)}{f_{prg}}$ où $\sigma_{pmt}(x)$ est égale à $\sigma_{pi}(x)$, tension initiale de l'armature, dans le cas de la

post-tension, et à la tension à l'origine diminuée des pertes à la mise en tension dans le cas de la pré-tension

$$\left\{ \begin{array}{ll} k_1 = 6 \times 10^{-3} & \text{si } \rho_{1000} \leq 2,5 \% \\ k_1 = 8 \times 10^{-3} & \text{si } \rho_{1000} > 2,5 \% \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} k_2 = 1,1 & \text{si } \rho_{1000} \leq 2,5 \text{ (armature TBR)} \\ k_2 = 1,5 & \text{si } \rho_{1000} \leq 8 \text{ (armature RN)} \\ k_2 = 1,25 & \text{si } 2,5 < \rho_{1000} < 8 \%. \end{array} \right.$$

2.3 LA METHODE DE L'ECO 2 – 92 : [5, 6, 46]

Le code européen du béton comme les autres codes divise les pertes de la précontrainte en deux types :

- Pertes à court terme (raccourcissement élastique du béton, glissement d'ancrage et le frottement des armatures)
- Pertes à long terme (retrait du béton, fluage du béton et la relaxation des armatures)

Les pertes totales sont la somme de ces deux types des pertes

2.3.1 Les Pertes à Court Terme :

i- Les Pertes dues au raccourcissement élastique (ES) :

Pour un élément précontraint, la déformation du béton doit égale le changement de la déformation des armatures. Cette réduction de la contrainte au niveau des armatures égale :

$$ES = m \cdot \delta_{cg} \tag{2-28}$$

Où $m = E_s/E_{cm}$: le rapport de module élastique des armatures sur le module élastique de béton.

$$E_{cm} = 9,98 \times f_{cm}^{1/3} \times (B_{cct})^{1/6} \quad \text{GPa} \tag{2-29}$$

$$f_{cm} = f_{c28} \times B_{cct} \quad \text{MPa} \tag{2-30}$$

$$B_{cct} = \exp \left\{ s \times \left[1 - \left(\frac{28}{t_0} \right)^{0,5} \right] \right\} \tag{2-31}$$

où :

$$s = \begin{cases} 0,38 & \text{Ciment de durcissement lent} \\ 0,28 & \text{Ciment normal ou } t_0 = 3 \text{ jours} \\ 0,2 & \text{Ciment portland de durcissement rapide RHPC} \end{cases}$$

t_0 : l'âge de la mise en précontrainte.

δ_{cg} : la contrainte dans le béton au niveau des armatures.

$$\delta cg = \frac{\delta p_0}{m + \frac{Ac}{Ap(1 + e/r^2)}} \cdot \frac{M_0 \cdot e}{I_c} \quad (2-32)$$

M_0 : Moment dû au chargement.

e : l'excentricité.

$r^2 = I_c/Ac$: Rapport du moment d'inertie sur la section de béton.

Dans le cas de la précontrainte par post-tension la mise en tension des câbles ne pouvant s'effectuer que câble par câble. Le raccourcissement du béton à la mise en tension d'un câble vaut :

$$ES = \frac{m \cdot \delta cg}{2} \quad (2-33)$$

ii- Les pertes dues aux frottements des armatures (FR):

Les pertes par frottement dans les éléments post-tensions ne varient pas en fonction de temps, mais elles varient en fonction de la section considérée :

$$FR = \sigma_{p0} \cdot (1 - e^{-\mu(\alpha + k x)}) \quad (2-34- a)$$

μ : Coefficient de frottement.

α : déviation angulaire totale de 0 à x .

k : déviation angulaire accidentelle de l'armature.

Tableau 2-2 : Les coefficients de frottement (μ) selon le code ECO2-92

Type de fibre/toron	Bounded grouted Duct	Tube en acier	Tube en PEHD
Lubrifié :			
Fils tréfilé à froid		0,16	0,10
toron		0,18	0,12
non lubrifié :			
Fils tréfilé à froid	0,17	0,24	0,12
toron	0,19	0,25	0,14
toron graissé			0,05

K : varie de 0,005 à 0,01 rads/m. il dépend de type de tube utilisé.

Lorsque $\mu(\alpha + k x) < 0,2$ on peut adopter que :

$$FR = \Delta \sigma_{FR} = \sigma_0 \cdot [\mu(\alpha + KX)] \quad (2-34- b)$$

iii- Les pertes dues au glissement d'ancrage (AN):

- Dans le cas de la post-tension :

$$AN=2. p.\lambda.Es. \quad (2-35)$$

$$\lambda=\left(\frac{g.Es}{p}\right)^{1/2} \quad (2-36)$$

- Dans le cas de la pré-tension :

$$AN=\frac{g \times Es}{l} \quad (2-37)$$

p : perte par frottement par mètre.

g : le glissement à l'ancrage.

l : longueur de l'élément précontraint.

2.3.2 Les Pertes à Long Terme :

Les pertes totales dues au retrait et au fluage du béton et la relaxation des armatures données par le code européen du béton est donnée comme suit :

$$\Delta\sigma_{p,c+s+r}=\frac{\varepsilon_{sh}.Es+RE+CR}{1+(m.A_p/A_c)[(1+A.e/I_c).(1+0.8\phi)]} \quad (2-38)$$

ε_{sh} : la déformation du béton due au retrait.

RE, CR : pertes par relaxation des armatures et fluage du béton respectivement.

ϕ : coefficient de fluage

i- Les pertes de tension dues au retrait du béton (SH):

$$SH = \varepsilon_{sh} . Es \quad (2-39)$$

Le retrait à un instant t considéré peut être estimé par :

$$\varepsilon_{sh} (t, t_0) = \varepsilon_{cs0} Bs(t - t_s). \quad (2-40)$$

Où :

ϵ_{cs0} : retrait ultime.

$B_s(t-t_s)$: coefficient définissant le développement du retrait dans le temps.

t : l'âge du béton (jours)

t_s : l'âge du béton jusqu'au début de retrait.

Le coefficient de retrait ultime peut être obtenu par :

$$\epsilon_{cs0} = \epsilon_s (f_{cm}) B_{RH} \quad (2-41)$$

$$\epsilon_s (f_{cm}) = [160 + 10 B_{cs} (9 - f_{cm} / f_{cm0})] \times 10^{-6} \quad (2-42)$$

avec :

f_{cm} : la contrainte de compression du béton à 28 jours.

$f_{cm0} = 10$ MPa.

B_{cs} : coefficient dépend du type de ciment.

$$B_{cs} = \begin{cases} 4 & \text{pour ciment de durcissement lent S,H.} \\ 5 & \text{Ciment normal ou de durcissement rapide R, N} \\ 8 & \text{Ciment de durcissement rapide et de contrainte élevée RS.} \end{cases}$$

$$B_{RH} = -1,55 B_{SRH} \quad \text{pour } 40\% \leq RH \leq 99\% \quad (2-43)$$

$$\begin{cases} B_{SRH} = +0,25 & \text{pour } RH \geq 99\% \\ B_{SRH} = 1 - \left(\frac{RH}{RH_0} \right)^3 \end{cases} \quad (2-44)$$

Avec :

RH : l'humidité relative de l'environnement (%)

$RH_0 = 100\%$

Le développement du retrait avec le temps est donné par :

$$B_s(t-t_s) = \left[\frac{(t-t_s)/t_1}{350 (h/h_0)^2 + (t-t_s)/t_1} \right]^{0,5} \quad (2-45)$$

Avec :

$$h = 2 \frac{A_c}{\mu}$$

A_c : l'aire de la section du béton.

μ : périmètre de la section du béton .

$t_1 = 1$ jour
 $h_0 = 100$ mm.

ii- Les pertes de tension dues au fluage du béton (CR):

Les pertes dues au fluage selon L'ECO2 peuvent être déterminées comme suit :

$$CR = \varepsilon_{cr} \cdot E_s \tag{2-46}$$

Avec - ε_{cr} : est la déformation de béton due au fluage

Dans la limite de l'ordre de contrainte de service $|\sigma_d| < 0,4 f_{cm}(t_0)$, le fluage est supposé linéaire lié au contrainte appliquée.

Pour une contrainte constante appliquée au temps t_0 la déformation due au fluage est exprimée par :

$$\varepsilon_{cr}(t, t_0) = \left(\frac{\delta_0(t_0)}{E_{28}} \right) \times \phi(t, t_0) \tag{2-47}$$

Avec

$\delta_0(t_0)$: la contrainte appliquée à l'âge t_0 .

$\phi(t, t_0)$: le coefficient de fluage est exprimé par :

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 B_C(t-t_0) \tag{2-48}$$

$B_C(t-t_0)$: exprime le développement de fluage dans le temps après le chargement.

t_0 : l'âge du béton au moment de chargement.

t : l'âge du béton à un moment considéré.

Avec :

$$\phi_0 = \phi_{RH} \times \beta(f_{cm}) \times \beta(t_0) \tag{2-49}$$

$$\beta(f_{cm}) = \frac{5,3}{(f_{cm} / f_{cm0})^{0,5}} \tag{2-50}$$

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0,1 + (t_0/t_1)^{0,2}} \tag{2-51}$$

f_{cm} , f_{cm0} , RH, RH₀, h, h₀, t₁ sont donnée dans le paragraphe de retrait

Le développement de fluage avec le temps est donné par :

$$Bs(t-t_s) = \left[\frac{(t-t_s)/t_1}{\beta_H + (t-t_s)/t_1} \right]^{0,3} \quad (2-52)$$

$$\beta_H = 150 \times \left\{ 1 + \left(1,2 \times \frac{RH}{RH_0} \right)^8 \right\} \times \frac{h}{h_0} + 250 \leq 1500. \quad (2-53)$$

En général dans les diagrammes de (ϵ , σ) on trouve la déformation de fluage plus la déformation élastique.

$$\epsilon_{cs}(t, t_0) = \delta_{\alpha(t_0)} \times \left[\frac{1}{E_{c(t_0)}} + \frac{\phi(t, t_0)}{E_{ci}} \right] = \delta_{\alpha(t_0)} \times J(t, t_0) \quad (2-54)$$

J(t, t₀) : Fonction de fluage.

Remarques :

- L'effet du type de ciment et la température de la cure sur le coefficient de fluage:

L'effet de type de ciment sur le coefficient de fluage du béton peut être donné par modification de l'âge du béton au moment de chargement t₀ par l'équation :

$$t_0 = t_{0,T} \times \left[\frac{9}{2 + (t_{0,T}/t_{1,T})^{1,2}} + 1 \right]^\alpha \geq 0,5 \text{ jours} \quad (2-55)$$

avec :

t_{0,T} : L'âge du béton lors de la mise en charge en jours.

T_{1,T} = 1 jours.

α : dépend de type de ciment.

$$\alpha = \begin{cases} -1 & \text{Ciment de durcissement lent SL.} \\ 0 & \text{Ciment de durcissement normal ou rapide.} \\ 1 & \text{Ciment de durcissement rapide et de contrainte élevée.} \end{cases}$$

iii- Pertes de tension dues à la relaxation des armatures (RE):

Selon L'ECO2 les pertes par relaxation sont déterminées par la formule suivante :

$$RE = Rep \cdot \phi_{re} \quad (2-56)$$

Rep : relaxation des armatures déterminée par la figure 2-3 :

ϕ_{re} : facteur de relaxation donné par le tableau suivant.

Tableau 2-3 : Facteurs de la relaxation des armatures de précontrainte [5]

	Classe 1 (fils et toron)	Classe 2 (fils et toron)	Classe 3 (barres)
Pré-tension	1,5	1,2	-
Post-tension	2,0	1,5	2,0

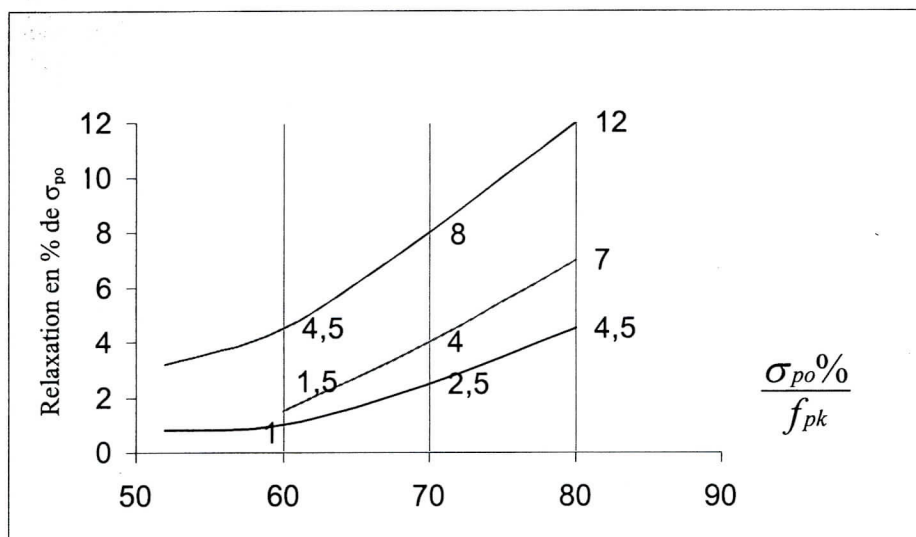


Figure 2-3 : La relaxation en pourcentage de la contrainte appliquée (Rep)[5,6]

f_{pk} : contrainte pour 1% de l'éclatement des armatures

2.4 LA METHODE DE ACI - 92 : [33 , 47, 48, 49]

La méthode de ACI à été développée pour estimer les pertes de la précontrainte dans le temps sans diviser le temps en petits intervalles.

Les pertes sont la résultante de plusieurs coefficients qui expriment l'influence de plusieurs facteurs ; cette méthode est considérée comme la méthode la plus simple pour l'évaluation des pertes de la précontrainte. Elle est applicable pour les éléments ordinaires avec une contrainte de compression dans les fibres pré-comprimés aligné de 2,41 MPa à 12,1 MPa, la résistance à la compression minimale 27,6 MPa [33].

Les pertes totales sont la somme des pertes instantanées et différées :

$$\Delta\sigma=ES+FR+AN+SH+CR+RE \quad (2-57)$$

Avec : - ES : les pertes instantanées dues au raccourcissement élastique de béton.

- FR : les pertes instantanées dues aux frottements des câbles dans le cas de la post-tension.
- AN : les pertes instantanées dues au glissement d'ancrage.
- SH : les pertes différées dues au retrait de béton.
- CR : les pertes différées dues au fluage de béton.
- RE : les pertes différées dues à la relaxation des armatures.

2.4.1 Les Pertes Instantanées :

i- Les pertes dues aux raccourcissements élastiques (ES):

$$ES=K_{ES}\times\frac{E_s}{E_{ci}}\times f_c \quad (2-58)$$

K_{ES} : Coefficient dépend de la méthode de la précontrainte :

$$\begin{cases} K_{ES}=1 & \text{dans le cas de la précontrainte par pré-tension.} \\ K_{ES}=0,5 & \text{dans le cas de la précontrainte par post tension.} \end{cases}$$

E_s : module d'élasticité des armatures de la précontrainte.

E_{ci} : module d'élasticité de béton au moment de chargement.

f_{cpi} : la contrainte au niveau des armatures due a la force dans les armatures de la précontrainte avant la réduction des pertes (ES, CR , SH et RE).

f_c : la contrainte de la compression du béton au niveau des armatures juste après la mise en charge elle est exprimée par :

$$f_c = (k_{cir} \times f_{cpi}) - f_g \quad (2-59)$$

f_g : la contrainte dans le béton au niveau des armatures due au poids de la structure au moment de chargement.

k_{cir} : Coefficient dépend de la méthode de la précontrainte :

$$\begin{cases} k_{cir} = 1 & \text{dans le cas de la précontrainte par post tension.} \\ k_{cir} = 0,9 & \text{dans le cas de la précontrainte par prétention.} \end{cases}$$

ii- Les pertes dues aux frottements des armatures (FR):

$$FR = P_x * (1 - e^{-(k_l x + \mu \alpha)}) \quad (2-60- a)$$

Dans le cas ou : $(k_l + \mu \alpha) \leq 0.3$ l'effet de frottement peut être estimé par :

$$FR = P_x * (k_l x + \mu \alpha) \quad (2-60- b)$$

Tablea 2-4 : coefficients de frottement selon le code ACI .

	Type des armatures	Coefficient k	Coefficient μ
	Fils	0,0010 – 0.0015	0,15 – 0,25
	Barres de haute résistance	0,001 – 0.0006	0,08 – 0,30
	Toron de 7 fils	0,005 – 0,0020	0,15 – 0,25
Protégé (couvrable)	Fils	0,001 – 0,002	0,05 – 0,15
	Toron de 7 fils	0,001 – 0,002	0,05 – 0,15
Graissé	Fils	0,0003 – 0,002	0,05 – 0,15
	Toron de 7 fils	0,0003 – 0,002	0,05 – 0,15

iii- Les pertes dues au glissement d'ancrage (AN) :

Le culcul se fait de la même manière que les deux codes BPEL et ECO2.

2.4.2 Les Pertes Différées :

i- Les pertes dues au retrait du béton (SH):

$$SH = \varepsilon_{sh} \cdot K_{sh} \cdot E_s \cdot (1 - 0,006 \cdot V/S) \cdot (1,5 - 0,015 \cdot RH) \quad (2-61)$$

V/S : rapport de volume sur la surface de l'élément.

RH : l'humidité relative de l'environnement en pourcentage.

➤ Dans le cas de la précontrainte par post tension k_{sh} donné par le tableau suivant (2-5):

Tableau 2-5 : Les valeurs de coefficient K_{sh}

T'	1	3	5	7	10	20	30	60
k_{sh}	0,92	0,85	0,80	0,77	0,73	0,64	0,58	0,45

➤ Dans le cas de la précontrainte par pré-tension : $k_{sh} = 1$.

T' : temps d'application de la contrainte depuis la fin de la cure (jours).

ε_{sh} : le retrait en $\mu\text{m/m}$

Le retrait $\varepsilon_{Sh}(t, t')$ a un instant t (jours) mesuré depuis l'âge t' (jours) est exprimé par :

- retrait après l'âge de 7 jours pour une cure humide :

$$\varepsilon_{Sh}(t, t') = \frac{t - t'}{35 + (t - t')} \varepsilon_{Sh\infty} \quad (2-62)$$

- retrait après l'âge de 1 à 3 jours pour une cure sèche :

$$\varepsilon_{Sh}(t, t') = \frac{t - t'}{55 + (t - t')} \varepsilon_{Sh\infty} \quad (2-63)$$

$\varepsilon_{Sh\infty}$: retrait ultime pour une cure humide ou sèche :

$$\varepsilon_{Sh\infty} = 780 \cdot 10^{-6} \cdot K'_1 K'_2 K'_3 K'_4 K'_5 K'_6 K'_7 \quad (2-64)$$

▪ Coefficient K'_1 : exprime l'effet de la période de la cure sur le retrait donné par le tableau 2-6.

Tableau 2-6 : Coefficient K'_1

Période de la cure humide	1	3	7	14	28	90
K'_1	1,2	1,1	1,0	0,93	0,86	0,75

Dans le cas d'une cure sèche avec une période de 1 à 3 jours $K'_1 = 1$

▪ Coefficient K'_2 : exprime l'effet de l'humidité

$$K_2 = 1.4 - 0.010HR \quad (40 \leq h \leq 80) \quad (2-65- a)$$

$$K'_2 = 3.00 - 0.030HR \quad (80 \leq h \leq 100) \quad (2-65- b)$$

HR : l'humide relative en %

▪ Coefficient K'_3 : il exprime l'effet du rapport V/S

- Pour $V/S < 35,7$ mm, K'_3 est donné par le tableau qui suit

Tableau 2-7 : Coefficient K'_3

V/S	12,5	19	25	31	37,5
K'_3	1,35	1,25	1,17	1,08	1,00

- Si V/S est entre 35,5 et 95 mm $[35.5 \leq V/S \leq 95mm]$

$$- \text{ Si } t-t_i \leq 1 \text{ an} \quad K'_3 = 1.23 - 0.006 \frac{V}{S} \quad (2-66- a)$$

$$- \text{ Si } t-t_i > 1 \text{ an} \quad K'_3 = 1.17 - 0.00456 \frac{V}{S} \quad (2-66- b)$$

- Si $V/S \geq 95$ mm

$$K'_3 = 1.2 \cdot e^{-0.00473 (V/S)} \quad (2-67)$$

▪ Les coefficients K'_4, K'_5, K'_6, K'_7 :

Ces coefficients dépendent de la composition du béton :

$$K'_4 = 0.89 - 0.00161 \cdot S \quad (2-68)$$

Avec S = affaissement du béton frais (mm),

$$K'_5 = 0.3 + 0.014 \frac{A_f}{A} \quad \left(\frac{A_f}{A} \leq 50 \right) \quad (2-69- a)$$

$$K'_5 = 0.9 + 0.002 \frac{A_f}{A} \quad \left(\frac{A_f}{A} > 50 \right) \quad (2-69- b)$$

Avec : $\frac{A_f}{A} = \frac{\text{fines agregats}}{\text{Totale agregats}}$

$$K'_6 = 0.75 + 0.00061 \cdot \gamma \quad (2-70)$$

γ : Dosage du ciment (Kg/m³)

$$K'_7 = 0.95 + 0.008 \cdot A \quad (2-71)$$

A : pourcentage d'air

i- Les pertes dues au fluage du béton (CR):

$$CR = \phi_{cr} \cdot (E_s/E_c) \cdot f_c = E_s \cdot \varepsilon_{cr} \quad (2-72)$$

f_c : La contrainte de compression dans le béton.

ϕ_{cr} : Le coefficient de fluage.

la déformation du béton due au fluage sous une contrainte unitaire est donnée par l'équation suivante :

$$\varepsilon_{cr}(t, t_0) = \frac{\sigma}{E_c(t_0)} [\phi(t, t_0)] \quad (2-73)$$

σ : la contrainte appliquée à l'âge t_0

$E_c(t_0)$: est le module statique du béton à l'âge de changement (t_0)

Si la densité du béton variée entre 1500 et 2500 Kg/m³, le module statique est exprimé par :

$$E_c = 43 \rho^{1.5} \cdot (f_{cyl})^{0.5} \cdot 10^{-6} \quad (2-74)$$

avec ρ : est la densité du béton (Kg/m³)

$$f_{cyl} = \frac{t_0}{a + \beta \cdot t_0} f_{cyl28} \tag{2-75}$$

Les constantes a et b dépendent du type de ciment et du type de curé sont données dans le tableau 2-8.

Tableau 2-8 : Les valeurs de coefficient a et b :

Type de ciment	Condition de curé	Coefficient a	Coefficient b
Ciment Portland ordinaire (type I)	Humide	4,00	0,85
	Sec	1,00	0,95
Ciment portland de durcissement rapide (type II)	Humide	2,30	0,92
	Sec	0,7	0,98

$\phi(t, t_0)$: coefficient de fluage est exprimé par la formule suivante :

$$\phi(t, t_0) = \frac{(t - t_0)^{0.6}}{10 + (t - t_0)^{0.6}} \phi_{\infty}(t_0) \tag{2-76}$$

Avec :

$t - t_0$ l'âge du béton depuis le moment de l'application de la charge.

$\phi_{\infty}(t_0)$: coefficient de fluage ultime

$$\phi_{\infty}(t_0) = 2.35 \cdot K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 \tag{2-77}$$

- Coefficient K_1 :

Dans le cas d'une cure humide avec un âge de changement plus de 7 jours ou dans le cas d'une cure sèche avec un âge de changement de 1 à 3 jours, le coefficient K_1 peut être estimé comme suit :

- Cure sec : $K_1 = 1.25 \cdot t_0^{-0.118}$ (2-78- a)

- Cure humide : $K_1 = 1.13 \cdot t_0^{-0.095}$ (2-78- b)

- Coefficient K_2 : exprime l'effet de l'humidité sur le fluage

$$K_2 = 1,27 - 0,0067 h \quad \text{pour } h \geq 40\% \tag{2-79}$$

- Coefficient K_3 : dépend au rapport l'aire de la section transversale au périmètre exposé au séchage :

$$- \text{Si } V/S < 37.5 \text{ mm}$$

Tableau 2-9 : Coefficient K_3

V/S	12,75	19	26	31,75	37,5
K_3	1,3	1,17	1,11	1,04	1,00

$$- \text{Si } 37.5 < V/S < 95 \text{ mm } K_3 \text{ est donné par :}$$

$$- \text{Si } t-t_0 \leq 1 \text{ an } \quad K_3 = 1.14 - 0.00368 \frac{V}{S} \quad (2-80- a)$$

$$- \text{Si } t-t_0 > 1 \text{ an } \quad K_3 = 1.1 - 0.00268 \frac{V}{S} \quad (2-80- b)$$

$$- \text{Si } V/S \geq 95 \text{ mm } \quad K_3 = \frac{2}{3} [1 + 1.13 \cdot e^{-0.0213 (V/S)}] \quad (2-80- c)$$

- Coefficient K_4, K_5, K_6 : dépendent de la composition du béton :

$$K_4 = 0.82 + 0.00264 \cdot S \quad (2-81)$$

S = affaissement (mm) du béton frais

$$K_5 = 0.88 + 0.0024 \cdot \frac{A_f}{A} \quad (2-82)$$

$$\text{Avec : } \frac{A_f}{A} = \frac{\text{agregats fins}}{\text{Totale agregats}}$$

$$K_6 = 0.46 + 0.09 \cdot A_i \geq 1 \quad (2-83)$$

A_i : pourcentage d'air.

iii- Les pertes dues à la relaxation des armatures (RE):

Le code ACI ne néglige pas l'effet de retrait et de fluage ainsi que la déformation élastique du béton sur la relaxation. Pour ce code la relaxation des aciers varie en fonction des pertes par retrait , fluage et la déformation élastique. Il utilise dans le calcul des pertes par relaxation l'expression suivante :

$$RE = [Kre - J.(SH+CR+ES)].C$$

(2-84)

Kre et J et C des coefficient donnés par les tableaux suivants :

Tableau 2-10 : Les valeurs de Coefficients de relaxation Kre et J :

Type d'acier	Kre	J
Fils ou torons de relaxation normale de classe 270	20.000	0,15
Fils ou torons de relaxation normale de classe 250	18.500	0,14
Fils de relaxation normale de classe 240 ou 235	17.600	0,13
torons de basse relaxation de classe 270	5.000	0,040
Fils de basse relaxation de classe 250	6.630	0,037
Fils de basse relaxation de classe 240 ou 235	4.400	0,035
barres de relaxation normale de classe 145 ou 160	6.000	0,05

Tableau 2-11 : Les valeurs de Coefficient de la relaxation C :

f_{pi}/f_{pu}	Toron ou fils de Relaxation normale	Barre de relaxation normale ou toron ou fil de basse relaxation
0,80	---	1,28
0,79	---	1,22
0,78	---	1,16
0,77	---	1,11
0,76	---	1,05
0,75	1,45	1,00
0,74	1,36	0,95
0,73	1,27	0,90
0,72	1,18	0,85
0,71	1,09	0,80
0,70	1,00	0,75
0,69	0,94	0,70
0,68	0,89	0,66
0,67	0,83	0,61
0,66	0,78	0,57
0,65	0,73	0,53
0,64	0,68	0,49
0,63	0,63	0,45
0,62	0,58	0,41
0,61	0,53	0,37
0,60	0,49	0,33

2.5 LA METHODE DE PCI - 75 : [50, 51,52]

Le calcul des pertes de la précontrainte par cette méthode peut être fait sans un programme de l'ordinateur en faisant référence à plusieurs tableaux. La méthode PCI base sur le principe pas à pas pour déterminer les changements de la contrainte dans l'acier qui se produisent dans les intervalles du temps consécutif. Avec cette méthode il est recommandé qu'un minimum de quatre intervalles du temps été utilisé.

Tableau 2-12 : minimum des intervalles utilisés dans la méthode de PCI.

Le pas	Début de l'intervalle	Fin de l'intervalle
1	La mise en tension des armatures	La mise en précontrainte de l'élément
2	Fin de premier intervalle	Age de 30 jours ou le temps de chargement y compris sont poids propre
3	Fin de deuxième intervalle	Un an
4	Fin de troisième intervalle	La fin de la vie de service

Les Pertes totales (TL) :

- Cas de la précontrainte par pré-tension :

$$TL = ANC + ES + (CR + SH + RET) \quad (2-85- a)$$

- Cas de la précontrainte par post-tension :

$$TL = FR + ANC + ES + (CR + SH + RET) \quad (2-85- b)$$

Avec :

FR: pertes dues aux frottements

ANC : pertes dues aux reculs d'ancrages de l'acier

ES : pertes dues aux raccourcissements élastiques

CR : pertes de précontraintes dues au fluage de béton

SH : pertes de précontraintes dues au retrait de béton

RET : pertes de précontraintes dues à la relaxation des armatures

2.5.1 Les Pertes Instantanées :

i- Les pertes dues au raccourcissement élastique du béton (ES):

$$ES = K \cdot \frac{E_s}{E_c} \cdot f_{cr} \quad (2-86)$$

k : Coefficient dépend de la méthode de la précontrainte

$$\begin{cases} k = 1 & \text{dans le cas de la précontrainte par prétention.} \\ k = 0,5 & \text{dans le cas de la précontrainte par post tension.} \end{cases}$$

f_{cr} : la contrainte dans le béton au niveau du centre de gravité des armatures due à la force de la précontrainte plus la charge permanente (poids) calculé de la même manière que ECO2.

ii- Les pertes dues au frottement (FR):

$$FR = P_0 \cdot (1 - e^{-kx}) \quad (2-87- a)$$

Dans le cas ou, $kx \leq 0.2$ l'effet de frottement peut être estimé par :

$$FR = P_0 \cdot (kx) \quad (2-87- b)$$

k : constant dépend du type de tube utilisé, il ne doit pas inférieure à $33 \cdot 10^{-4}$

iii- Les pertes dues au glissement d'ancrage (ANC) :

Le calcul se fait de la même manière que la méthode de ECO2

2.5.2 Les Pertes Différées :

i- Les pertes dues au retrait du béton (SH):

Pour chaque intervalle du temps les pertes de la précontrainte dues au retrait de béton sont données par :

$$SH = (USH) \cdot (SSF) \cdot (PSH) \quad (2-88)$$

Avec : USH : perte ultime de la précontrainte due au retrait de béton

$$USH = 27.000 - 3.000 E_c / 10^6 > 12.000 \text{ Psi} \quad (2-88)$$

SSF : coefficient dépend de la dimension de l'élément donné par le tableau 2-13:

Tableau 2-13 : Coefficient de retrait SSF

V/S (pouces)	1	2	3	4	5	6
SSF	1,04	0,96	0,86	0,77	0,69	0,60

PSH : de retrait pendant l'intervalle du temps t_1 , t_0 , t , (t_0 = le temps de la mise en tension)

$$\text{PSH} = (\text{AUS})_t - (\text{AUS})_{t_1} \quad (2-89)$$

AUS : le retrait ultime après la fin de la cure

Tableau 2-14 : Retrait ultime AUS

Age depuis la fin de la cure en jours	1	3	5	7	10	20	30	60	90	180	365	fin de la vie (40 ans)
Coeff AUS	0,08	0,15	0,20	0,22	0,27	0,36	0,42	0,55	0,62	0,68	0,86	1,00

ii- Les pertes dues au fluage du béton (CR):

Les pertes dans un intervalle de temps sont données par :

$$\text{CR} = (\text{UCR}) (\text{SCF}) (\text{MCF}) (\text{PCR}) (f_c) \quad (2-89)$$

UCR : perte ultime de la précontrainte due au fluage pour une cure humide ne dépasse pas 7 jours et pour un poids normal du béton.

$$\text{UCR} = 95 - \frac{20E_c}{10^6} \geq 11 \text{ Ksi} \quad (2-90)$$

SCF : coefficient dépend de l'effet de la dimension de l'élément sur le fluage de béton

Tableau 2-15 : coefficient de fluage SCF

V/S (pouces)	1	2	3	4	5	6
SCF	1,05	0,96	0,87	0,77	0,68	0,68

MCF : coefficient dépend de l'âge de mise en charge et de la période de la curé de béton

Tableau 2-16 : coefficient de fluage MCF

V/S (pouces)	3	5	7	10	20	30	40
Période de la cure	3	5	7	7	7	7	7
SSF	1,14	1,07	1,00	0,96	0,84	0,72	0,60

PCR : fluage ultime dans un intervalle de temps $[t_i, t_j]$, il est donné par :

$$PCR = (AUC)_{t_i} - (AUC)_{t_j} \quad (2-91)$$

AUC : fluage ultime dans le temps après le transfert de la précontrainte donné par le tableau (2-17) :

Tableau 2-17 : Fluage ultime AUC :

Age depuis la mise en tension	1	2	5	7	10	20	30	60	90	180	365	40 ans
AUC	0,08	0,15	0,18	0,23	0,24	0,30	0,35	0,45	0,51	0,61	0,74	1,00

f_{cr} : la contrainte dans le béton aux niveaux du centre de gravité des armatures due à la force de la précontrainte (en prenant-on considération les pertes instantanées) plus la charge permanente (poids)

iii- Les pertes dues à la relaxation des armatures (RET):

$$RET = f_{st} \left[\frac{\log 24t - \log 24t_1}{45} \right] \cdot \left[\frac{f_{st}}{f_{py}} - 0.55 \right] \quad (2-92)$$

$$\text{où : } \frac{f_{st}}{f_{py}} - 0.55 \geq 0.05 \quad (2-93)$$

$f_{py} = 0,9 f_{pu}$ avec f_{pu} : contrainte garantie ultime de l'acier

f_{st} : contrainte dans les armatures dans le temps t_1

f_{py} : contrainte pour 1 % de l'éclatement des armatures

2.6 DISCUSSION GENERALE :

2.6.1 Les Pertes Instantanées :

A travers les étapes de calcul des pertes instantanées représentées dans chaque méthode, il paraît qu'il n'y a pas une différence entre les quatre méthodes dans le calcul des pertes dues au raccourcissement élastique et le glissement d'ancrage pour le cas des éléments post-tensionnés, tandis que pour le cas de la précontrainte par pré-tension, il y'a une petite différence dans le calcul des pertes dues au raccourcissement élastique du béton calculées par la méthode de BPEL-91 et les pertes dues au frottement selon la méthode de PCI-75.

i- Les pertes dues aux frottements des armatures :

Pour le calcul des pertes par frottement, on voit que les quatre méthodes utilisent une même équation (exponentielles), la différence réside dans les valeurs données aux coefficients de frottement, sachant que ces derniers sont obtenus expérimentalement, donc ils dépendent principalement du type d'armature (toron, barre, fil), de sa surface de contact (protégé, graissé) et de la technique de la mise en tension ainsi que le type de coulis d'injection (cire ou ciment) pour le cas des éléments post-tensionnés [15]

Les règles BPEL insistent sur la dispersion des valeurs de f et ϕ obtenues sur le chantier, les pertes pouvant s'écarter de 25 % et plus de leur valeur calculée. En parallèle, le code ACI exige que les valeurs numériques prises en compte dans les calculs doit être figurées sur les dessins d'exécution, ce qui constitue une excellente précaution. Par contre, l'ECO2 précise que les valeurs présentées dans le tableau 3-3 ne sont que des moyennes qui peuvent être augmentées ou diminuées en fonction du degré de contrôle, de la qualification de la main d'œuvre ou de précautions spéciales, à condition que les valeurs choisies soient dûment justifiées.

La méthode de PCI ne prend pas en considération les pertes de frottement dues à la déviation angulaire totale du câble. Ce qui fait les pertes par frottement calculées par cette méthode sont inférieures par une valeur de $\sigma_{p0} (1 - e^{-\phi x})$ par rapport aux autres méthodes.

ii- Les Pertes d'ancrage :

A travers les quatre méthodes, on constate que les pertes dues au glissement d'ancrage dépendent des coefficients de frottement dans le cas de la précontrainte par post-tension, donc les coefficients de frottement doivent être déterminés avec précaution, car ils conduisent non seulement à la mauvaise évaluation des pertes par frottement, mais aussi à une mauvaise estimation des pertes par glissement d'ancrage.

2.6.2 Les Pertes Différées :

Pour les pertes dues au retrait et au fluage du béton il y'a une large différence de calcul entre les méthodes qui due au principe de la prédiction et la méthode de calcul.

- concernant la méthode de calcul, chaque méthode utilise des équations qui expriment l'intensité ou la cinétique des pertes différentes par rapport aux autres méthodes.

- concernant le principe de la prédiction ; chaque code base sur des paramètres qui expriment l'effet de quelques facteurs sur les pertes comme il est représenté dans le tableau 2-18.

Concernant les pertes par relaxation il y'a aussi une différence dans la méthode de calcul, chaque méthode propose une équation différente aux autres méthodes, sachant que ces méthodes basent sur les mêmes facteurs qui influent sur les pertes par relaxation tels que : le type de la relaxation, les aciers de la précontrainte, la tension initiale, la contrainte ultime garantie (ou la contrainte de rupture garantie).

Tableau 2-18 : Facteurs d'estimation des pertes différées (retrait et fluage du béton) de différents codes

Les pertes différées	Retrait				Fluage			
	BPEL	ACI	ECO2	PCI	BPEL	ACI	ECO2	PCI
Les codes								
Humidité	X	X	X		X	X	X	
Température			X					
L'âge de chargement					X	X	X	X
Période de la cure		X		X				X
Dimension de l'élément	X	X	X	X	X	X	X	X
Eau/Ciment								
Dosage de ciment		X						
Type de ciment						X		
Granulats/Sable		X				X		
Quantité d'air		X				X		
Densité						X		
Affaissement		X				X		
Résistance à 28 jours			X				X	
Résistance au moment de chargement						X	X	
Module élastique				X		X	X	X
Pourcentage des armatures	X		X		X		X	

Chapitre III

Etude comparative
des déformations
et des pertes
de la précontrainte

ETUDE COMPARATIVE DES DEFORMATIONS ET DES PERTES DE PRECONTRAINTE

3.1. INTRODUCTION :

Les déformations et les pertes de la précontrainte sont influencées par plusieurs facteurs, les plus importants sont ceux liées à la qualité du béton, au retrait et au fluage du béton.

La qualité du béton (résistance à la compression et à la traction, module d'élasticité...) dépend essentiellement de :

- La nature minéralogique et caractéristiques des granulats.
- La composition du béton.
- La condition de conservation du béton (température, humidité).

Le fluage et le retrait sont influencés principalement par :

- La grandeur de la charge appliquées.
- L'âge de béton au moment de la mise en charge.
- La période de cure du béton.
- L'Humidité relative de l'environnement.

Dans ce chapitre nous avons basé notre comparaison sur deux exemples. Dans le premier nous avons analysé l'effet de trois paramètres (l'âge du béton au moment de la mise en charge, l'humidité et la période de cure) sur un seul béton sur la base des résultats expérimentaux réalisés par Brooks et AL-Quarra [13]. Dans le deuxième exemple, trois autres paramètres ont été utilisés (nature des granulats, rapports G/S et E/C).

3.2. PREMIERE EXEMPLE :

(Les résultats expérimentaux sont ceux de Al-Quarra [13].)

Les essais ont été effectués sur des cylindres de diamètre $D=76$ mm et de hauteur $h=152$ mm où le rapport volume/surface =19 mm, les résistances du béton à l'âge de 28 jours pour des éprouvettes conservées à : 100% ; 80%; 68% d'humidité sont respectivement 65,6 MPa, 60,4 MPa et 55,28 MPa. La contrainte appliquée dans chaque âge de chargement est 15 MPa. Pour faire une distinction entre les résultats de retrait et de fluage, deux types de tests ont été effectués, l'un pour déterminer le fluage propre d'un béton conservé dans l'eau, et l'autre pour déterminer le retrait et le fluage totale d'un béton conservé dans l'air.

Le tableau ci-dessous comporte le dosage des composantes du béton en Kg par mètre cube de béton et en Kg par mètre cube de ciment. La composition du béton est donnée dans le tableau 3-1.

Tableau 3-1 : Composition du béton

Constituant du béton	Dosage en Kg par m ³ du béton	Dosage en Kg par m ³ de ciment
Ciment portland ordinaire	315	1
Gravier	170	0,54
Sable	691	2,193
l'eau	180	0,571
calcaires ($\phi=10$ mm)	630	1,333
calcaires ($\phi=20$ mm)	420	2
plastifiant	1,85	0,006

Les résultats expérimentaux des déformations élastiques, et du fluage sont données par les figures 3-1 et 3-2.

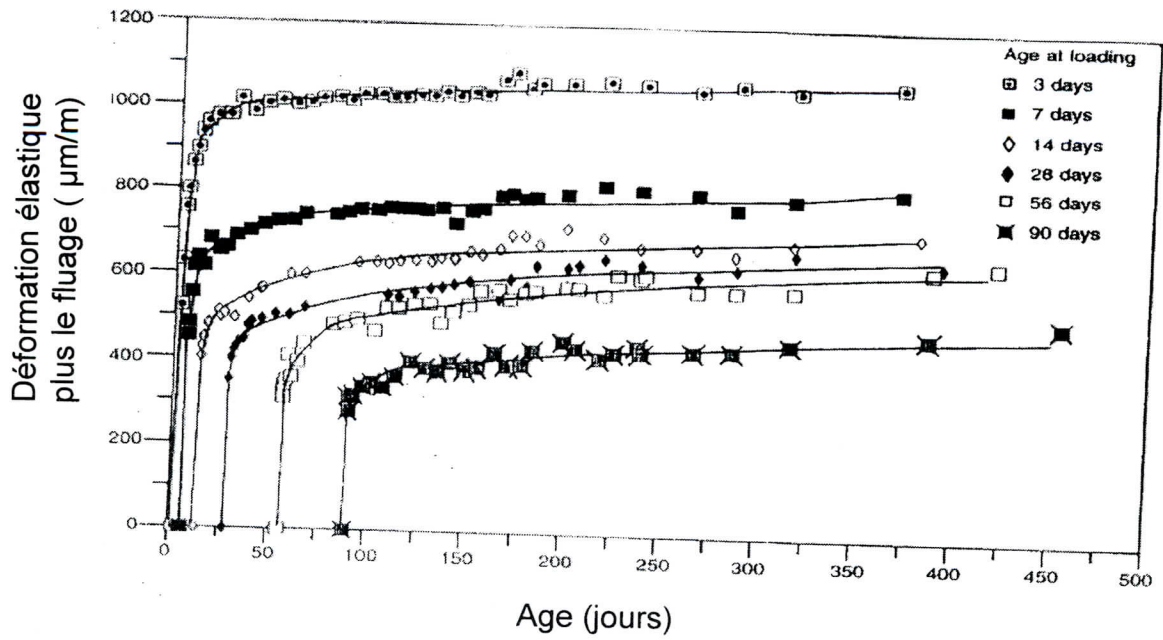


Figure 3-1 : Les résultats expérimentaux des déformations élastiques plus les fluages d'un béton conservé dans l'eau et soumis à une contrainte de 15 MPa dans les six âges de chargement [13]

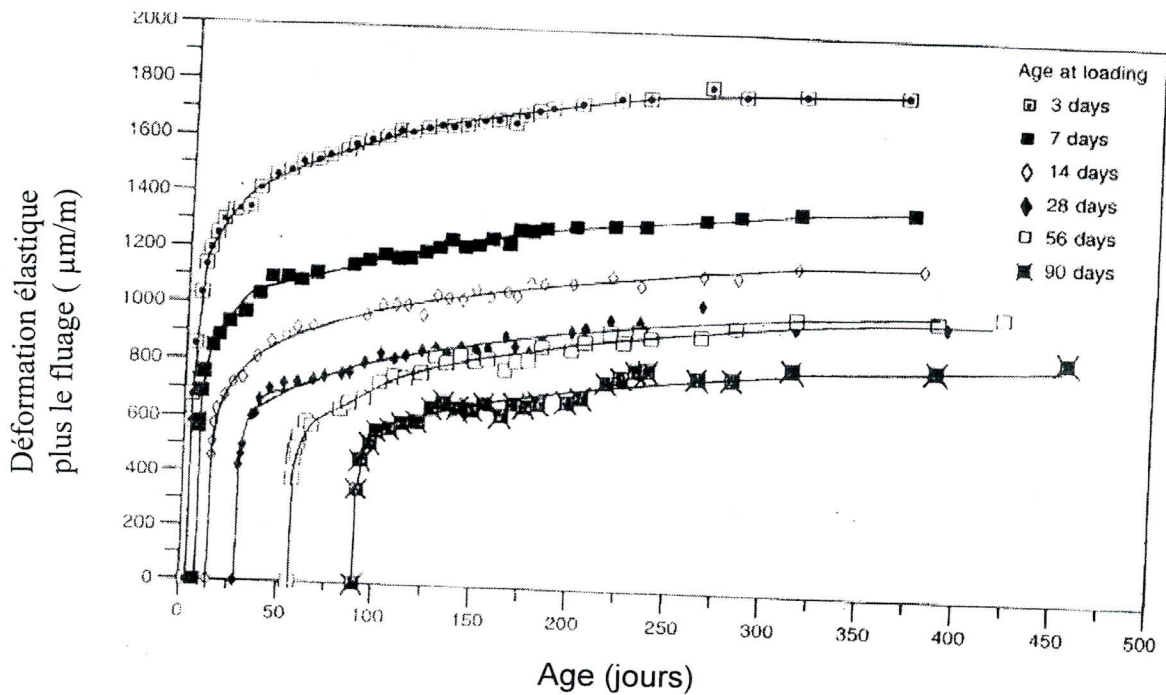


Figure 3-2 : Les résultats expérimentaux des déformations élastiques plus les fluages d'un béton conservé dans l'air où HR=68% et soumis à une contrainte de 15 MPa dans les six âges de chargement [13]

3.1.1 L'effet de L'âge du Béton au Moment de la Mise en charge:

Le but principal de cette étude est de comparer le fluage après une année de la préparation du béton entre les résultats des codes et les résultats expérimentaux sous l'effet de l'âge du béton au moment de la mise en charge. Pour éviter l'effet de l'humidité et l'effet de la composition du béton, les essais ont été effectués sur le même béton, les éprouvettes ont été conservées dans l'eau pour éviter le fluage de séchage. Les essais ont été réalisés à une contrainte de compression égale 15 MPa pour les six âges de chargement ; 3, 7, 14, 28, 56, 90 jours.

i. La résistance :

La figure ci-dessous (3-3) montre le développement de la résistance du béton calculée par les codes de celle déterminée expérimentalement durant une année depuis le coulage du béton.

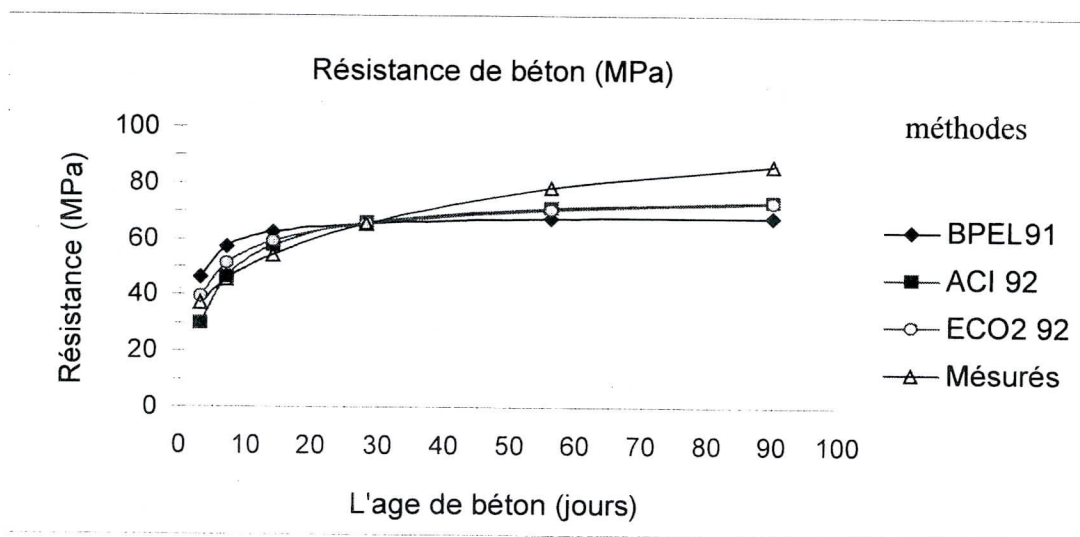


Figure 3-3 : Comparaison de développement de la résistance du béton dans le temps entre les résultats expérimentaux et les résultats des codes

A travers les résultats de la figure (3-3), il est clair qu'avant 28 jours la résistance calculée par les codes est plus grande que celle obtenue par les essais, mais après 28 jours on trouve le cas contraire. (l'évolution de la résistance en fonction du temps représenté par les différentes méthodes sont indiqué dans le tableau 3-2).



- Les deux règlements ECO2 et BPEL donnent les même résistances après 28 jours malgré que les paramètres cinétiques basent sur deux principes différents. Le code ECO2 utilise la fonction exponentielle et prend l'effet de type du ciment.

- Le modèle de ACI se base sur le type de ciment et la période de la cure.

Tableau 3-2 : le développement de la résistance relative à la résistance à 28 jours

Méthodes d'estimation	L'âge du béton au moment de chargement					
	3 jours	7 jours	14 jours	28 jours	56 jours	90 jours
Mesures	0,567	0,693	0,823	1	1,193	1,314
BPEL 91	0,706	0,869	0,952	1	1,026	1,036
ACI 92	0,455	0,698	0,874	1	1,077	1,11
ECO2 92	0,598	0,779	0,902	1	1,076	1,117

Les résultats du tableau ci-dessus montrent la cinétique de la résistance estimée par chaque code. Selon le code ACI - 92 le développement de la contrainte dans le premier mois est rapide, la résistance à 3 jours est plus petite devant la résistance mesurée alors que dans le reste des âges, le code ACI donne une bonne estimation par rapport aux autres codes comme il est représenté dans la figure (3-4).

Le règlement français BPEL sous-estime toujours la résistance soit avant ou après 28 jours.

Le code européen de béton ECO2 donne les mêmes résultats que ceux du code ACI aux âges 56 et 90 jours.

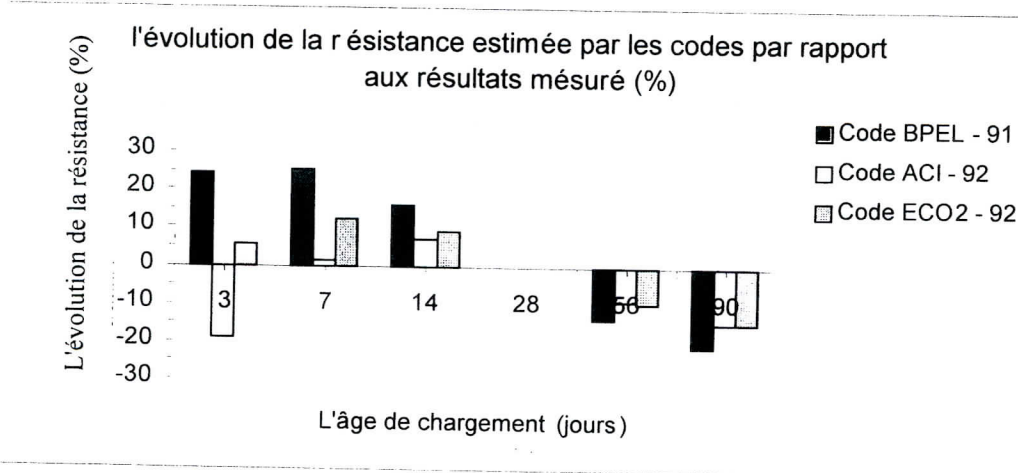


Figure 3- 4 : Comparaison du pourcentage d'estimation de la résistance du béton calculée par les différents codes par rapport aux résultats mesurés.

ii. Module élastique :

Le module élastique dépend de la composition du béton, de sa densité, et surtout de la résistance du béton [18]. D'après le tableau 3-3 et la figure 3-5 qui donnent l'estimation du module élastique par les différents codes et les résultats expérimentaux, nous remarquons que les codes ECO2 et ACI sont raisonnables à court terme. Alors que le modèle BPEL sur estime beaucoup le module élastique, et à long terme on remarque le cas contraire.

Tableau 3-3 : Comparaison du module élastique entre les différents codes et les résultats expérimentaux :

Méthodes	Modules d'élasticité (GPa)					
	3 jours	7 jours	14 jours	28 jours	56 jours	90 jours
Mesuré	28,84	33,33	37,5	42,85	48,38	51,7
BPEL- 91	39,5	42,34	43,65	44,36	44,74	44,89
ACI- 92	26,34	32,64	36,52	39,06	40,54	41,15
ECO2-92	31,13	35,52	38,22	40,25	41,75	42,54

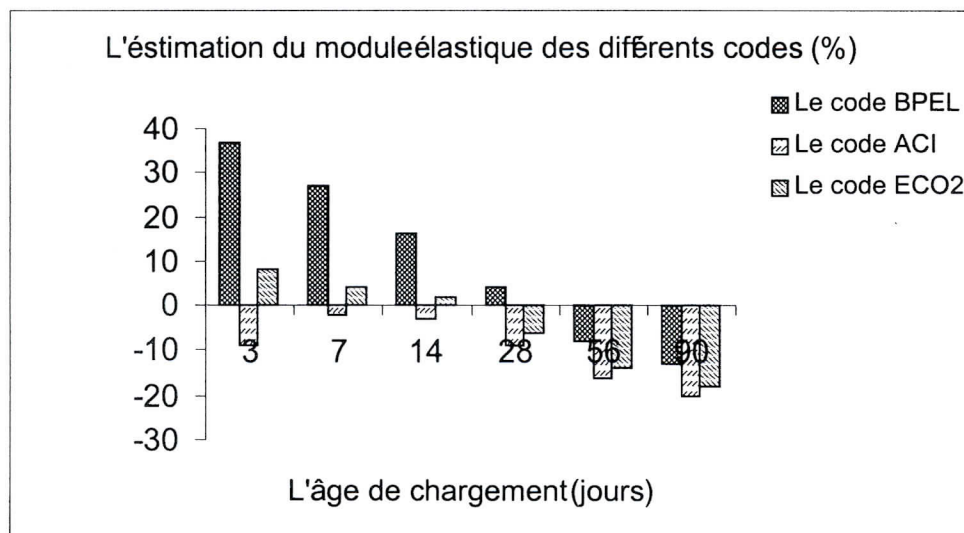


Figure 3- 5 : comparaison du pourcentage d'estimation du module élastique de différents codes.

D'après les résultats représentés par la figure 3-5 on remarque que selon les trois codes ACI, BPEL et ECO2 , le module élastique est proportionnel à la résistance du béton, ce dernier est

sous estimé lorsque l'âge du béton augmente. La meilleure estimation au de la de 28 jours est donnée par le BPEL.

iii. La déformation élastique :

La déformation élastique est inversement proportionnelle au module élastique, par conséquent son estimation a tendance d'être similaire à celle du module d'élasticité (voir tableau 3-4 et 3-6)

Tableau 3-4 : les déformations élastiques en ($\mu\text{m}/\text{m}$) :

Méthodes	3 jours	7 jours	14 jours	28 jours	56 jours	90 jours
Mesurés	520	450	400	350	310	290
BPEL -91	380	354	344	338	335	334
ACI -92	570	460	411	384	370	365
ECO2- 90	482	422	393	373	359	353

A travers la figure 3-9, on constate qu'il y'a une convergence entre les déformations élastiques calculées par les trois codes lorsque l'âge de béton au moment de la mise en charge augmente.

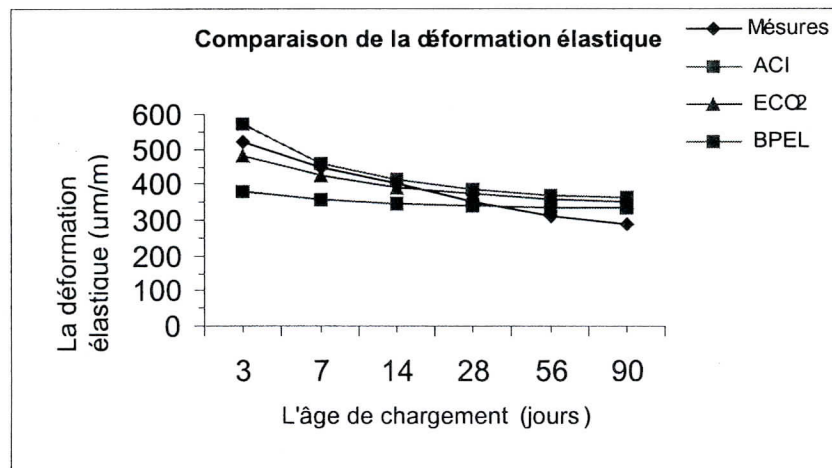


Figure 3- 6 : Comparaison des déformations élastiques expérimentales avec les résultats des codes.

iv. Fluage:

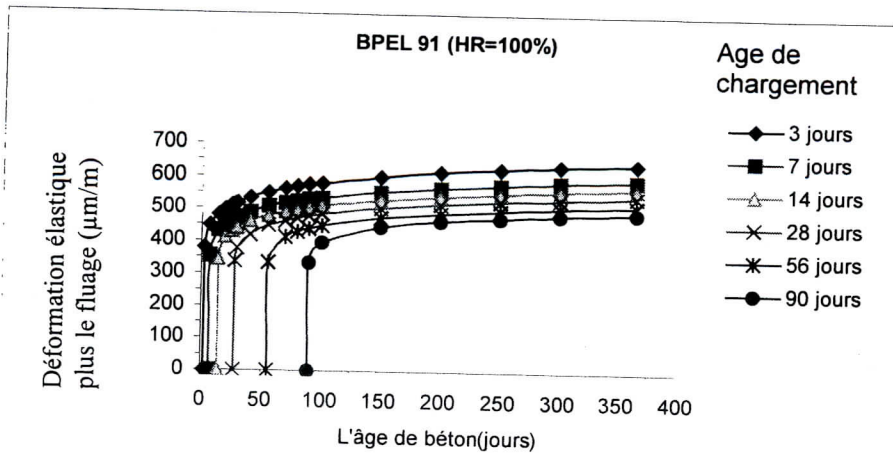
Les déformations élastiques plus les fluage à différentes âges de chargement calculés par les trois codes ;ACI, BPEL et ECO2 sont données dans les figures (3-7 :a,b,c),

Une examination rapide de ces graphes montre clairement que le développement du fluage est plus rapide dans les premiers jours après la mise en charge du béton, car de 70% à 80% du fluage totale se développe au cours des premiers mois. Le fluage est inversement proportionnel à la résistance du béton, lorsque le béton chargé à jeune âge la grandeur de fluage est très élevée, ça implique que la résistance du béton à jeune âge est faible alors que lorsque le béton est vieux sa résistance est élevée, par conséquent le fluage diminue.

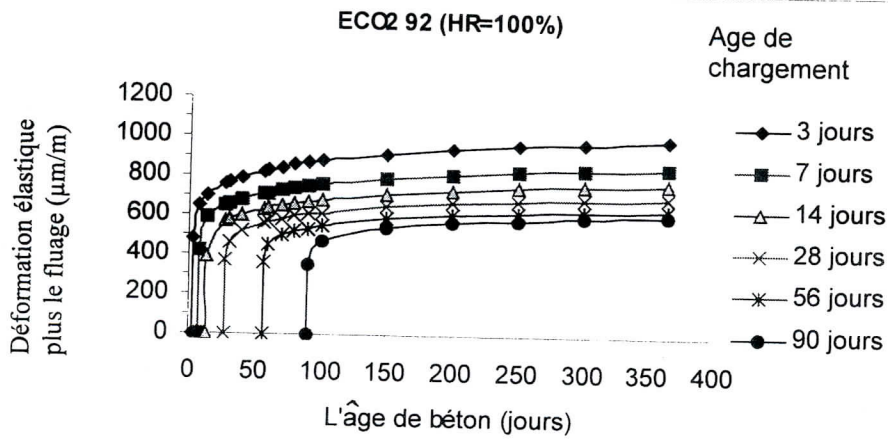
A partir des résultats obtenus (figure 3-7 ; a,b,c) on constate que Le développement du fluage est rapide dans les premiers jours après la mise en chargement du béton, de 80% du fluage totale se développe au cours des premiers mois. L'influence de l'âge du béton sur la grandeur du fluage est considérable, non pas seulement sur la valeur finale du fluage mais aussi sur la cinétique du fluage aux temps différés.

Il semble d'après les graphes qu'il y'a une différence dans l'estimation de fluage, cette différence varié lorsque l'âge de chargement varie, c'est à dire qu'on ne trouve pas la même différence de fluage entre les codes dans les six âges de chargement.

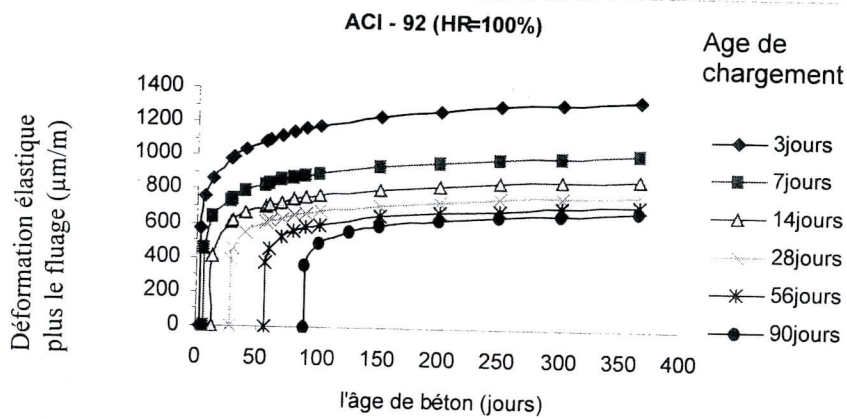
Comparativement avec les résultats expérimentaux représentés dans la figure (3-8) on constate que les deux codes BPEL et ECO2 sous estiment le fluage quelque soit l'âge de chargement. Tandis que le ACI sur estime le fluage. La meilleure estimation est celle donnée par l'ECO2 dans les six âges de chargement.



(a)



(b)



(c)

Figure 3-7 : Les déformations élastiques plus le fluage Calculés par :

(a) - ECO-92 ; (b) - BPEL-91 ; (c) - ACI-92

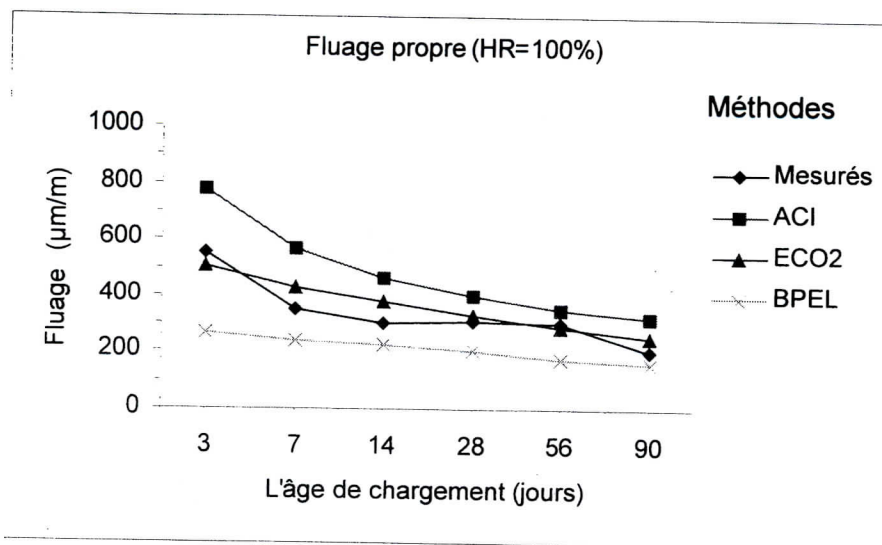


Figure 3-8 : Comparaison de fluage propre entre les différentes méthodes sous l'influence de l'âge de béton au moment de la mise en charge.

La différence de déformation peut être expliquée par le fait que la résistance du béton augmente avec l'âge du béton et puisque le fluage est inversement proportionnel à la résistance du béton, donc le fluage diminue à cause de l'augmentation de l'âge.

Si on consulte les formules de chaque code on trouve qu'il y'a une distinction dans les paramètres qui influent sur le fluage pour chaque code. Il y'a des facteurs communs entre les différents codes tels que les dimensions de l'élément, l'humidité, l'âge de chargement. Et il y'a d'autres facteurs qu'on ne trouve pas dans tous les codes comme il est représenté dans le tableau 2-18 du chapitre II. Donc la différence d'estimation remarquée est liée aux facteurs pris en compte par chaque règlement.

- Si on prend le modèle ECO2 d'après ces formules il semble qu'il se base sur la valeur de la résistance de béton à 28 jours.

- Le règlement français BPEL donne une importance au pourcentage des armatures.

- Le code ACI prend en considération l'effet de la composition du béton.

Concernent l'évolution de la déformation dans le temps il y'a une différence entre les codes dans les paramètres cinétique qui exprime le développement de fluage dans le temps.

V. Les pertes dues aux fluages et la déformation élastique:

En l'absence des résultats expérimentaux, les pertes par fluage et par la déformation élastique ont été calculées par la formule utilisée par les trois codes :

$$\text{Les pertes} = \text{la déformation} * E_s$$

En supposant que la mise en tension a été faite par des armatures de module élastique égal 200000 MPa. Le tableau 3-5 et la figure 3-8 résument les valeurs estimées par les différentes méthodes.

Tableau 3-5 : les pertes de la précontrainte dues au fluage et la déformation élastique sous l'effet de l'âge de chargement (MPa).

Méthode	L'âge de la mise en charge					
	3 jours	7 jours	14 jours	28 jours	56 jours	90 jours
Mesurés	214	160	140	132	122	98
ACI -92	269	205	175	156,4	143,8	136,8
ECO2- 92	197,2	170,4	153,8	140,2	128,6	121,4
BPEL 91	128,6	118,6	113,2	108,4	102,8	98,4
PCI - 75	260,8	220	197,5	167,6	146,8	143,7

La méthode de PCI sur estime les pertes différées dans les six âges de chargement. La meilleure estimation est celles données par l'ECO2 par rapport aux résultats expérimentaux ($\pm 10\%$).

Il faut noter que les deux codes ECO2 et BPEL prennent en considération le pourcentage des armatures qui a été négligé dans le calcul et qu'il n'est pas pris en compte par l'ACI et le PCI.

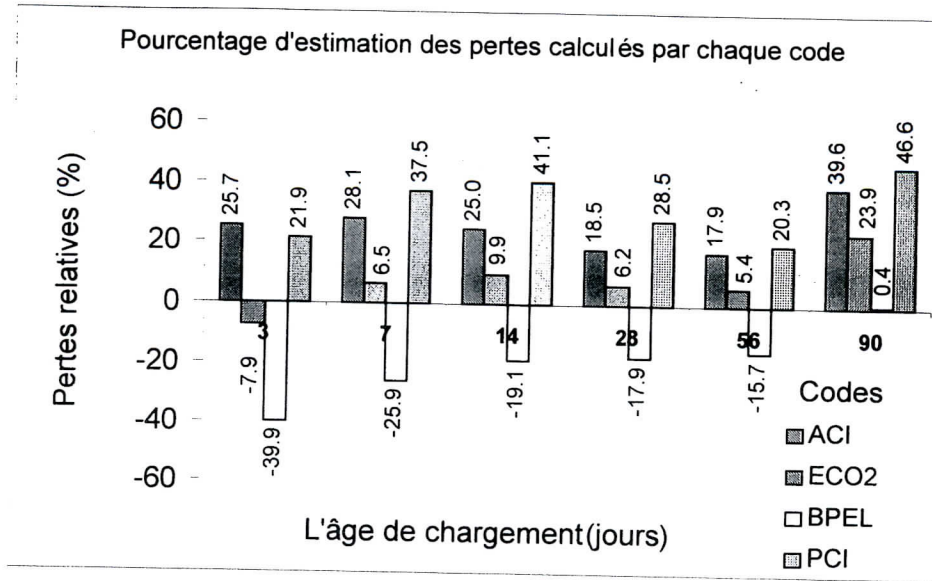


Figure 3-9 : Comparaison des pertes dues au fluage propre plus la déformation élastique estimés par les différents codes sous l'effet de l'âge de chargement.

3.9.2 L'effet de l'humidité sur le fluage:

Dans cette partie on veut étudier l'influence de l'humidité sur le fluage en comparant entre les résultats expérimentaux et ceux donnés par les codes pour les trois âges de chargement 7 ;28 et 56 jours.

Afin d'étudier l'effet de l'humidité sur le fluage, des essais ont été effectués sur trois groupes d'échantillons conservés dans l'eau et exposés à des environnements de 68%, 80%, 100% d'humidité respectivement. La résistance caractéristique du béton, pour chaque valeur de l'humidité relative était 55,28 MPa ; 60,4 MPa, et 65,6 MPa respectivement.

i. Le Fluage:

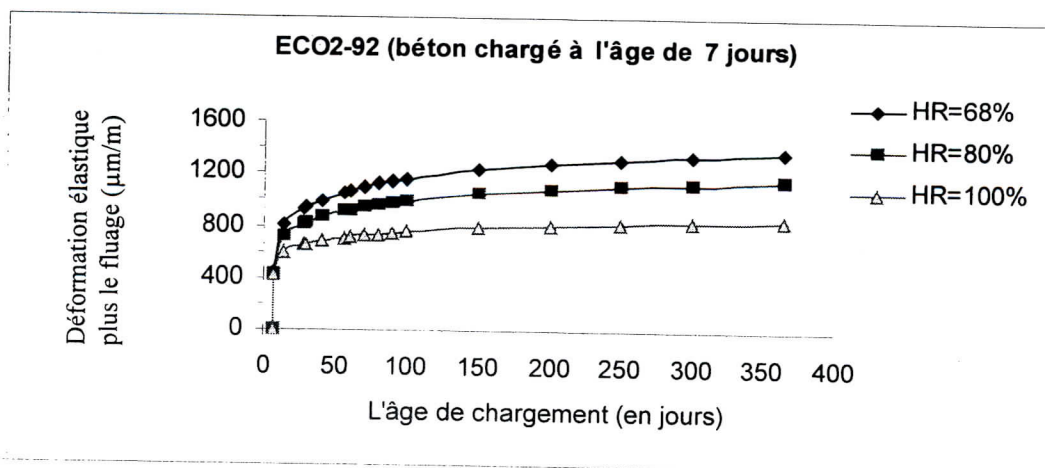
L'humidité est un paramètre essentiel qui provoque le fluage de dessiccation, Lorsque HR=100% nous avons que le fluage propre, et ce dernier n'est pas affecté par l'humidité relative, tandis que le fluage de dessiccation est très influencé, car il est inversement proportionnel avec l'humidité.

Les figures 3-10 à 3-12 représentent les déformations élastiques plus le fluage par les trois codes ACI-92, ECO2-92, BPEL-91 pour les trois âges de chargement 7, 28 et 56 jours, et la figure 3-15 tente de présenter une comparaison du fluage totale estimé par les rois codes.

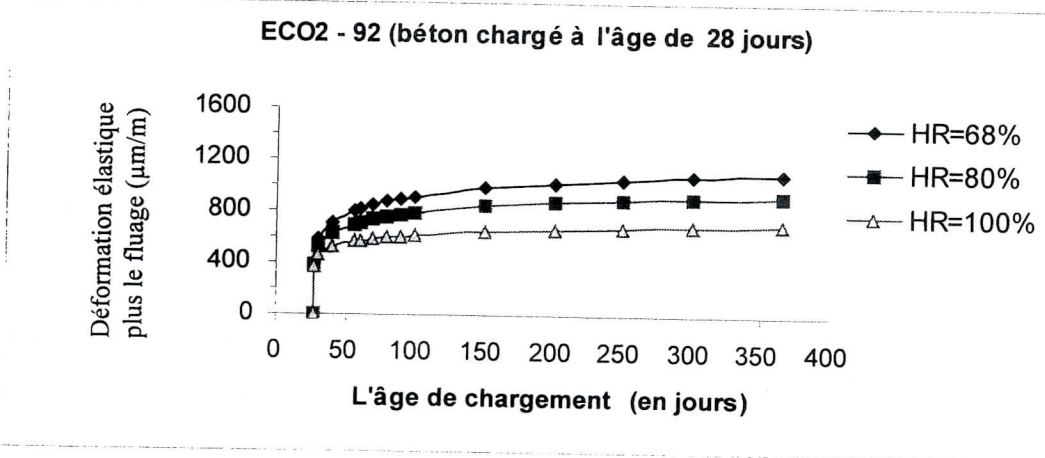
D'après ces résultats il est clair que l'âge de chargement a un effet intéressant sur le fluage de dessiccation. Lorsque le béton est chargé long terme le fluage de dessiccation diminue, alors que ce dernier devient important lorsque le béton est chargé à jeune âge.

Lorsque $HR=80$ et $HR=68$, le code BPEL sous-estime le fluage d'un béton jeune alors que pour un béton vieux il sur-estime le fluage.

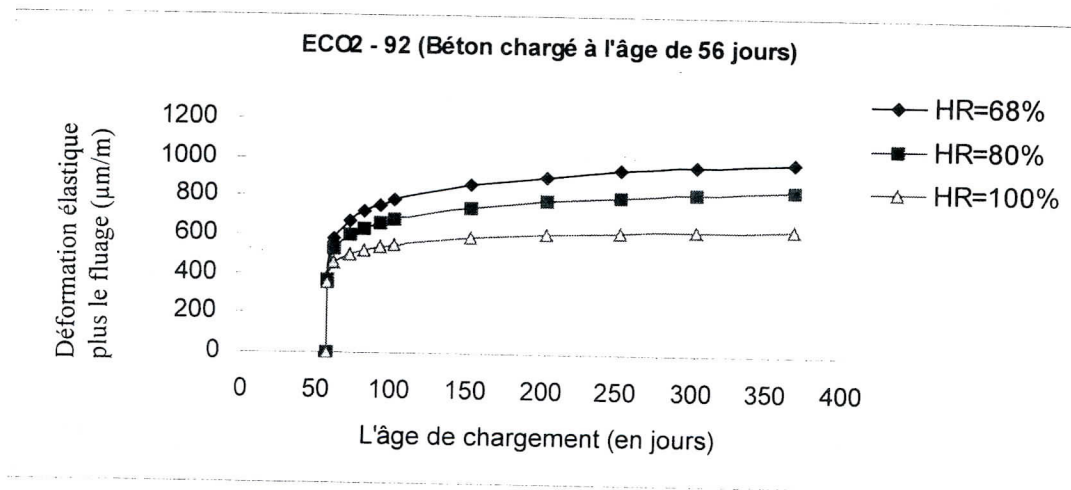
- le code ECO2 sur-estime le fluage de dessiccation contrairement au fluage propre.
- Lorsque le béton est chargé à l'âge de 7 jours (figure 3-15 (a)), les fluages calculés par l'ECO2 et BPEL ont la même allure que le fluage mesuré et la différence reste la même lorsque l'humidité varie, malgré que les deux codes utilisent des coefficients de l'humidité différents. Tandis que les valeurs estimées par le ACI tendent vers les résultats expérimentaux lorsque l'humidité diminue.



(a)

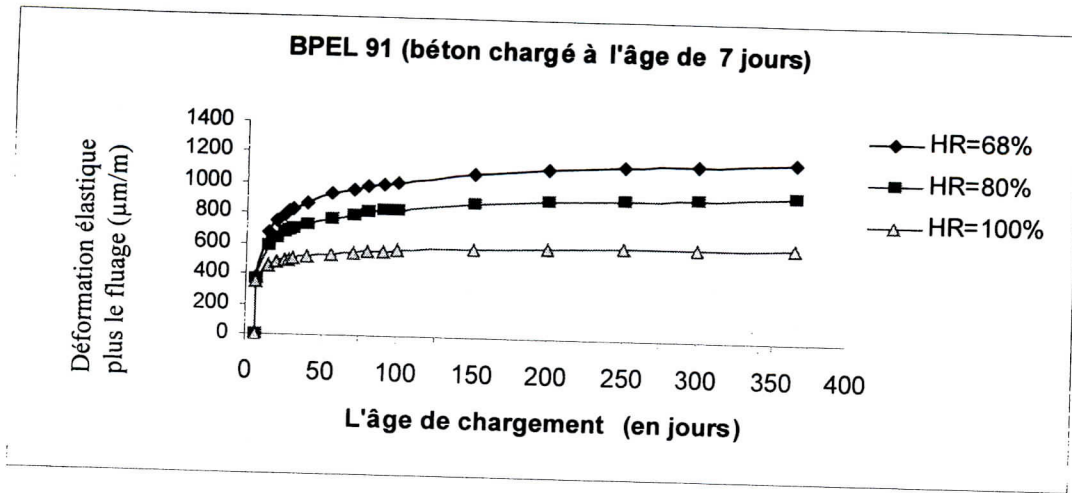


(b)

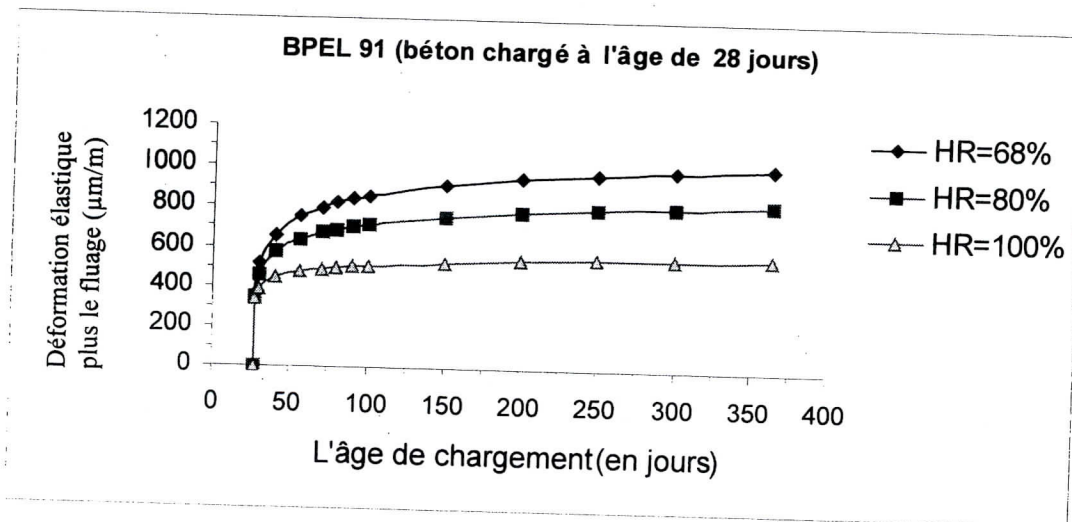


(c)

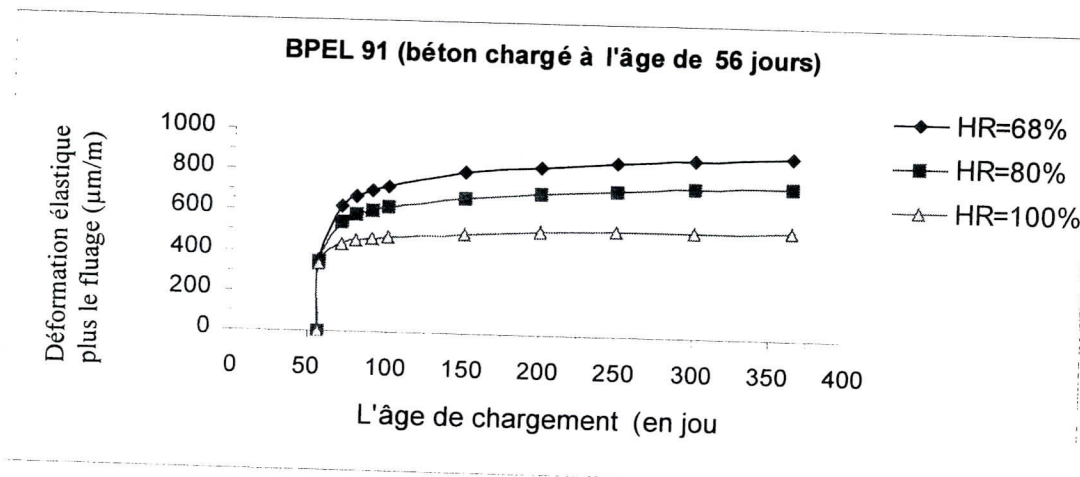
Figure 3-10 : les déformations élastiques plus les fluages calculés par le code ECO2-92, sous l'influence de l'humidité pour des bétons chargés à :
(a) :- 7 jours ; (b) :- 28 jours ; (c) :- 56 jours



(a)



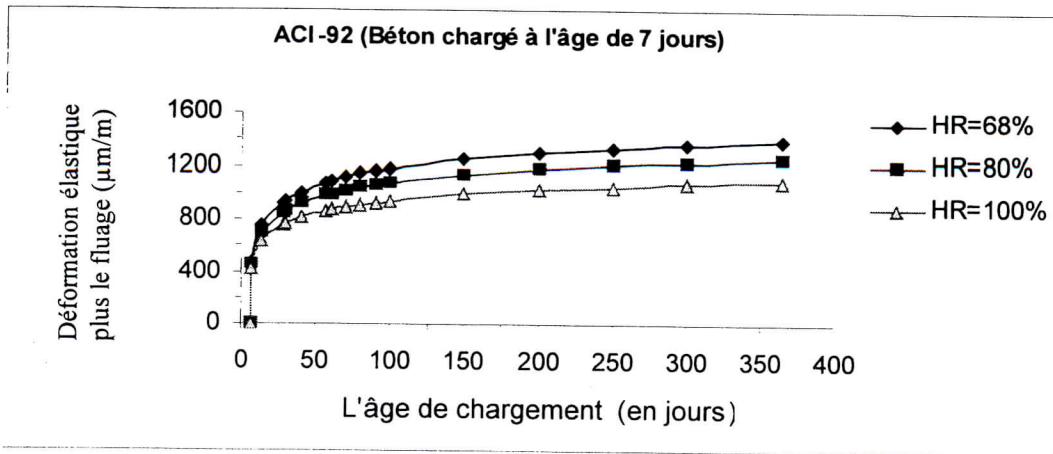
(b)



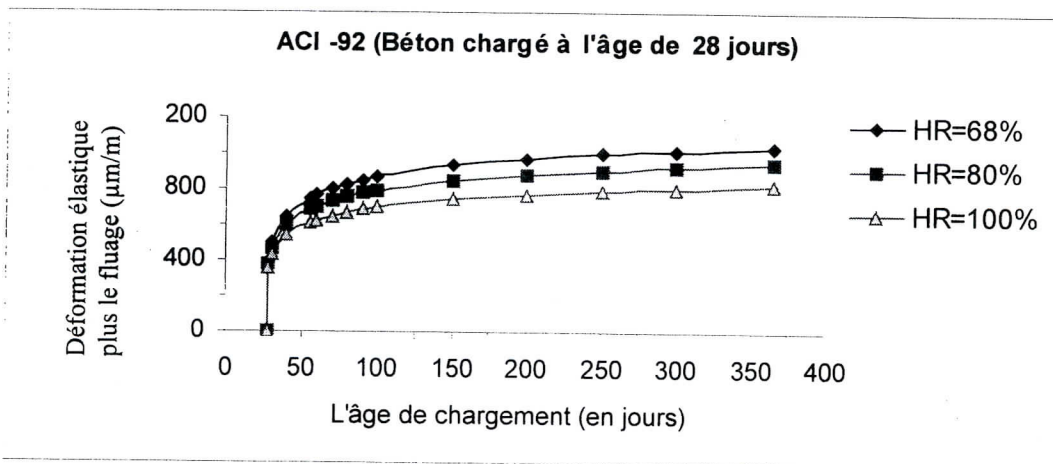
(c)

Figure 3- 11 : les déformations élastiques plus les fluages calculés par le code BPEL-91, sous l'influence de l'humidité pour un béton chargé à :

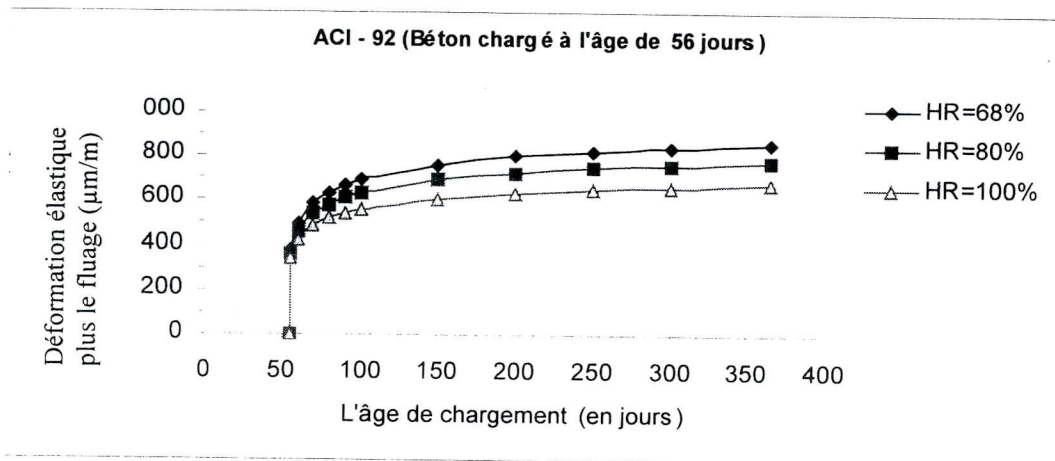
(a) :- 7 jours ; (b) :- 28 jours ; (c) :- 56 jours



(a)

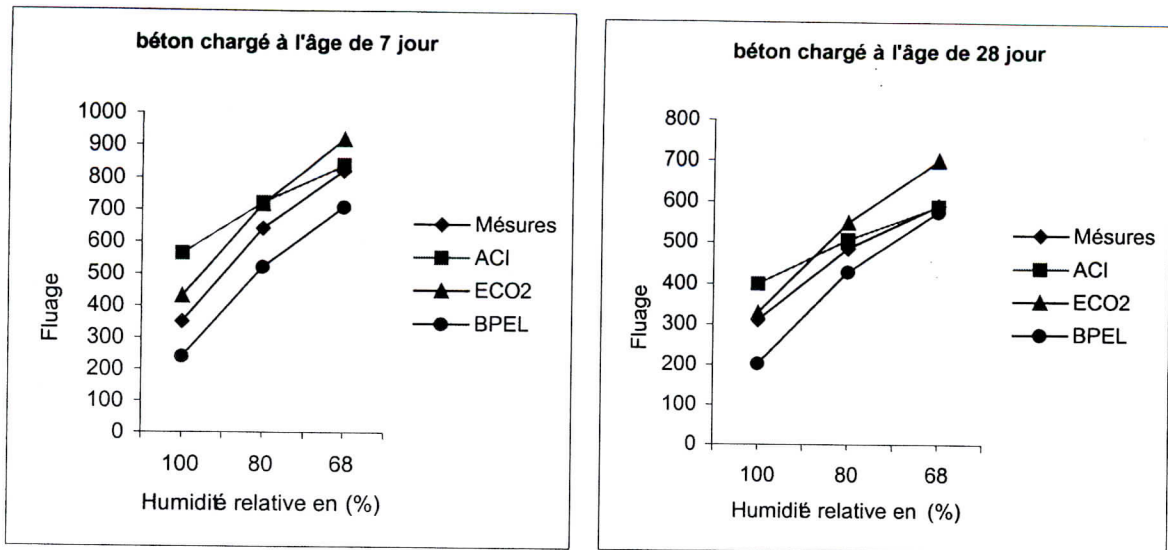


(b)



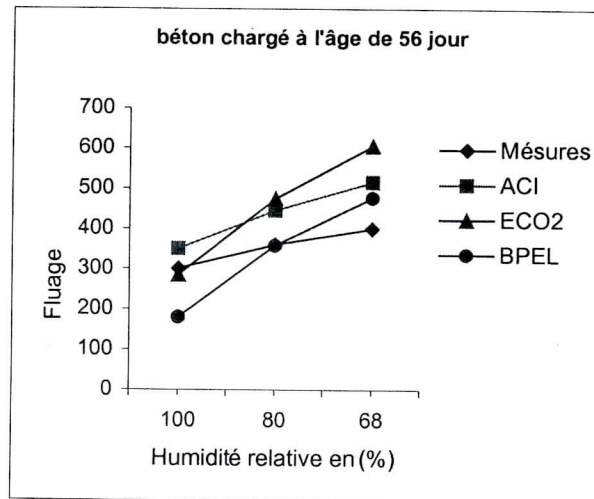
(c)

Figure 3- 12 : les déformations élastiques plus les fluages calculés par le code ACI-92, sous l'influence de l'humidité pour un béton chargé à :
(a) :- 7 jours ; (b) :- 28 jours ; (c) :- 56 jours



(a)

(b)



(c)

Figure 3-13 : comparaison de fluage total sous l'effet de l'humidité relative

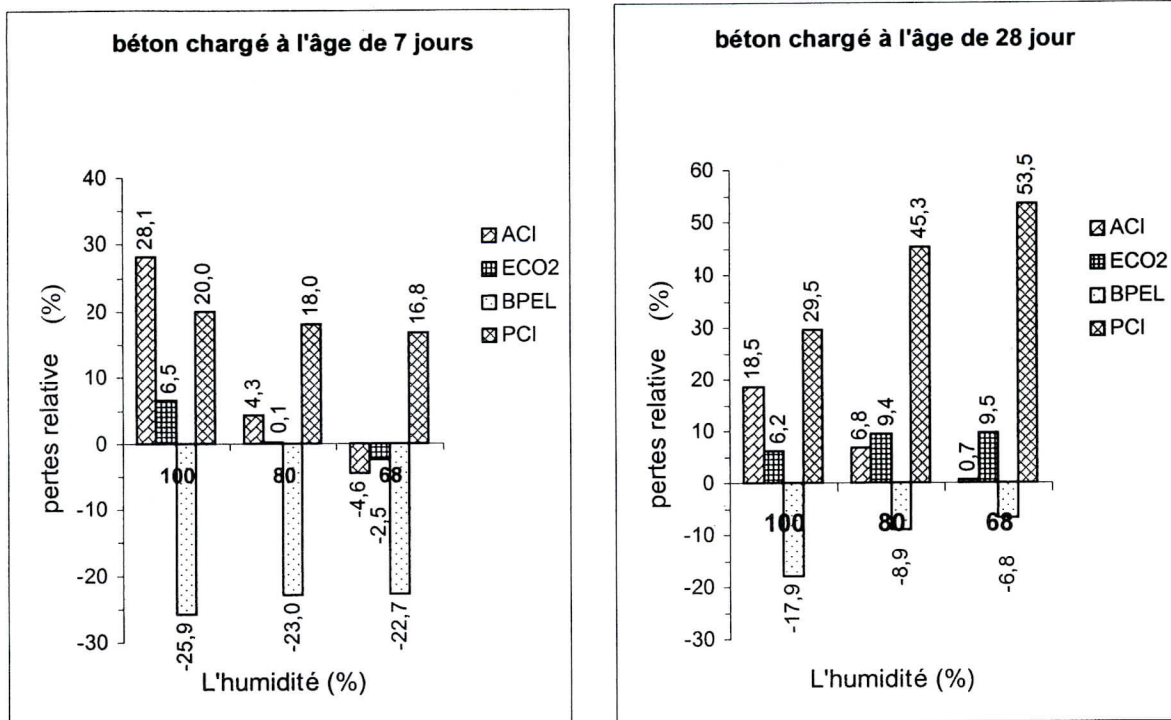
(a)- Béton chargé à 7 jours ; (b)- Béton chargé à 28 jours ; (c)- Béton chargé à 56 jours ;

- lorsque le béton est chargé à l'âge de 56 jours (figure 3-12 (c)), les fluages calculés par les trois codes sont plus élevés par rapport au fluage mesuré lorsque l'humidité diminue. Alors que lorsque cette dernière augmente ; une meilleure estimation est donnée par le BPEL à HR=80% et pour l'ECO2 à HR=100%.

ii. Les pertes dues au fluage:

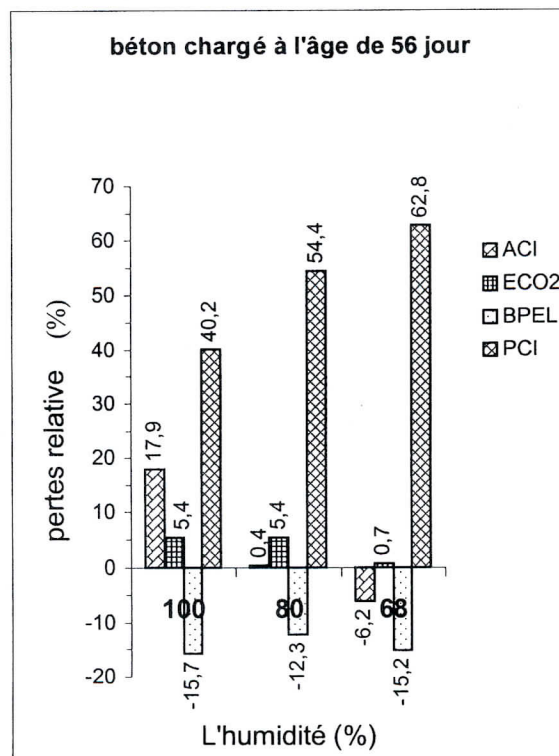
Les résultats des différents codes sont représentés sur la figure (3-14). Sur cette figure nous observons ce qui suit :

- le code BPEL donne des pertes de fluage inférieures à celles trouvées par les autres méthodes quel que soit l'âge de chargement et quelle que soit l'humidité de l'environnement.
- le code ACI sur-estime les pertes dues au fluage propre (28%) et sous estime le fluage total lorsque $HR=68\%$ (-5%). La meilleure estimation est donnée à l'âge de 28 jours lorsque $HR=68\%$ et à l'âge de 56 jours lorsque $HR=80\%$.
- le code ECO2 sur -estime les pertes lorsque $HR \geq 80\%$ et l'âge de chargement dépasse 7 jours (5% à 10%), et sous estime le fluage total lorsque $HR=68\%$ (-2,5%) pour un âge de chargement égal 7 jours. La meilleure estimation est donnée à l'âge de 7 jours pour $HR=80\%$, et à l'âge de 56 jours pour $HR \leq 80\%$.
- le code PCI sur -estime les pertes dans les trois âges de chargement, et dans les trois cas d'humidité, car que ce dernier ne prend pas en considération l'effet de l'humidité sur le fluage.



(a)

(b)



(c)

Figure 3-14 : comparaison des pertes dues au fluage et la déformation élastique sous l'effet de l'humidité relative pour un béton chargé :

(a) – à l'âge de 7 jours ; (b) – à l'âge de 28 jours ; (c) – à l'âge de 56 jours

3.1.3 L'effet de la période de la cure et de l'humidité sur le retrait:

L'effet de la période de la cure est considérable sur l'évolution de la contrainte dans le temps et sur le durcissement du béton. Le durcissement du béton dans l'eau diminue beaucoup les effets de retrait, et il convient de tenir le béton humide en l'arrosant pendant son durcissement. Le béton très jeune, n'a encore qu'une faible résistance en traction, et se fissurerait facilement sous l'effet de retrait. Lorsque la durée de la conservation augmente le retrait diminue, alors que c'est le béton est exposé à un environnement sec diminue donc le retrait augmente.

Afin d'étudier l'effet de la cure sur le retrait, des essais ont été réalisés sur des éprouvettes conservées à 68% d'humidité après une période de cure humide variant de 3 à 90 jours.

Le développement de retrait déterminé par les essais de laboratoire est donné sur la figure 3-15.

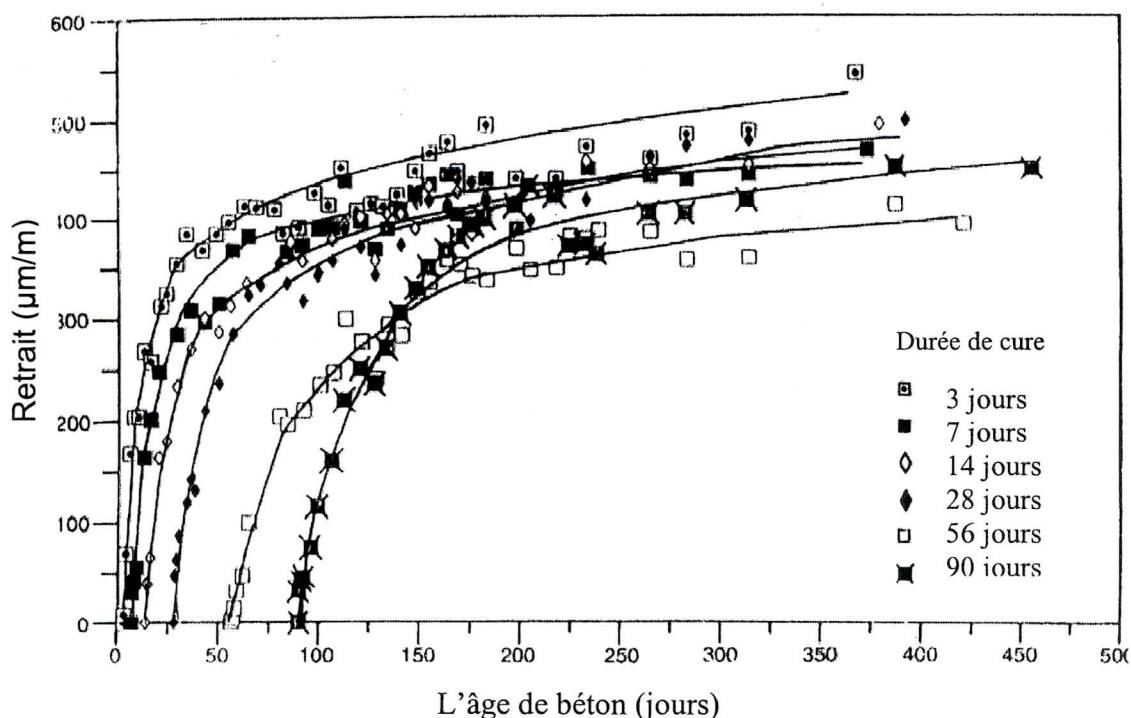
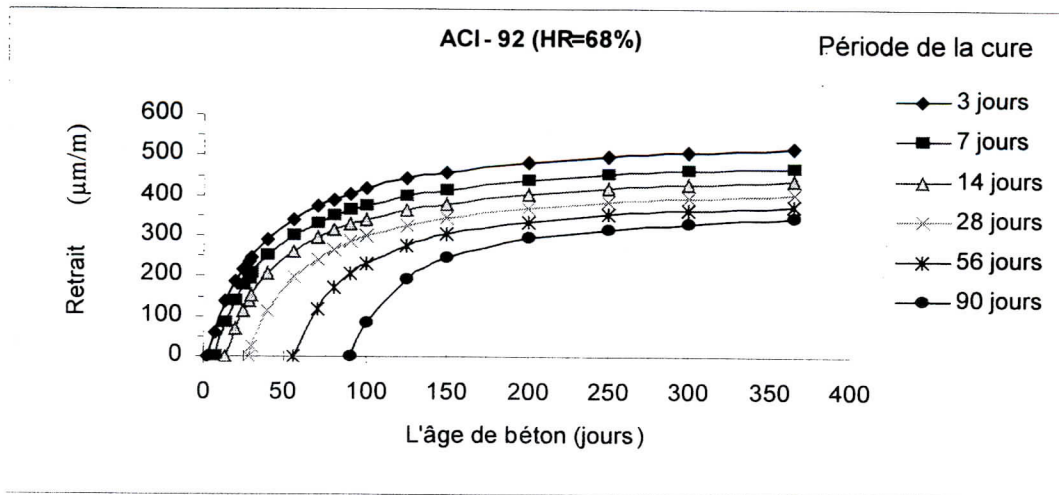


Figure 3-15 : résultats expérimentaux de retrait pour les six périodes de la cure [13]

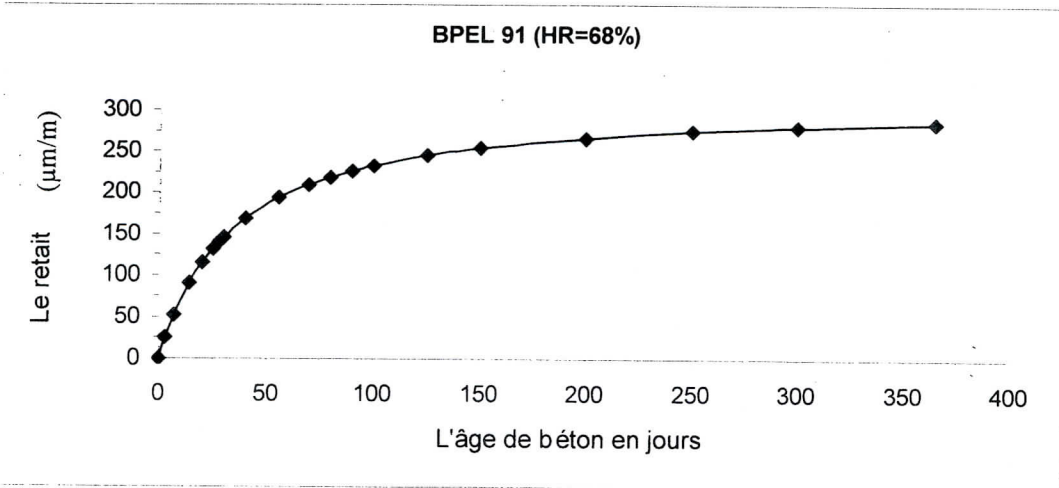
i. L'effet de la période de cure:

L'estimation de retrait selon la période de cure par les différentes méthodes est résumé sur les figures (3-16 ; a, b, c).

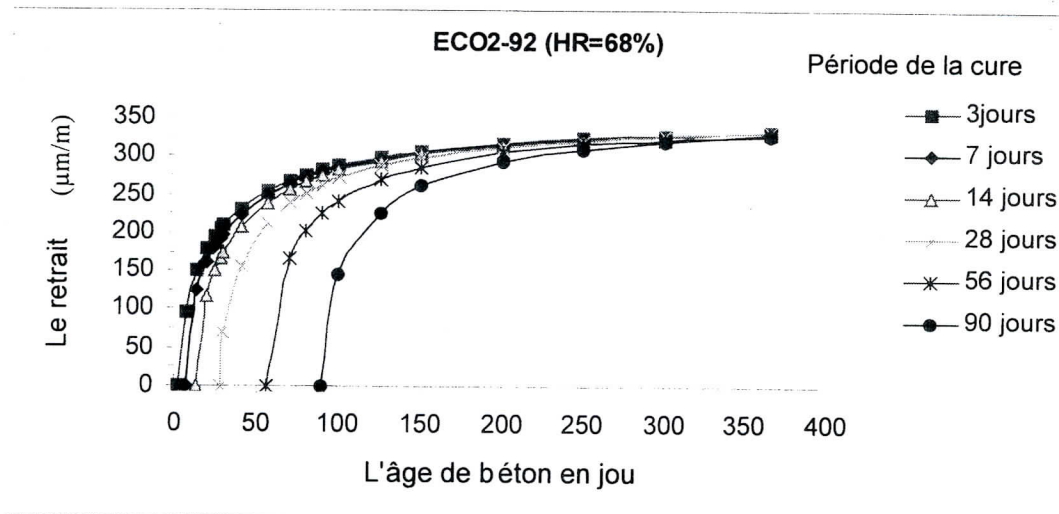
- Selon le BPEL ; l'effet de la période de cure n'est pas pris en compte, par conséquence, quelque soit l'âge de la mise en charge le retrait est sous estimé de 33%.
- L'ACI donne une importance particulière à l'effet de la période de cure et au type de cure employé, il sur estime le retrait pour les périodes de cure différentes à 90 jours. La meilleur estimation donné pour une période de 90 jours (0%).
- le retrait estimé par L'ECO2 montre l'influence de la période de retrait dans les premiers mois et lorsque l'âge du béton augmente les retraits tendent vers une seule valeur qui représente (-33%) de la valeur mesurée.



(a)



(b)



(c)

Figure 3-16 : retraits estimés par les codes sous l'influence de la période de la cure
(a) – BPEL-91 ; ECO-92 ; (c) ACI-92.

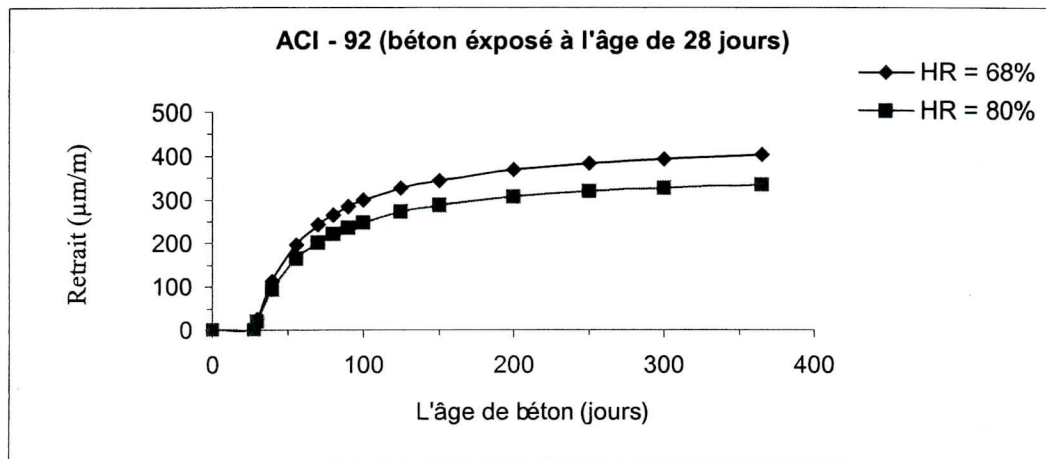
ii. L'effet de l'humidité sur le retrait:

A travers les figures (3-17 ; a ,b, c) qui regroupes les résultats des retrait estimés par les trois codes (ACI, BPEL, ECO2) sous l'effet de l'humidité on constate que 'évolution de retrait dans le temps est très affectés par l'humidité, car le retrait est inversement proportionnel à l'humidité relative de l'environnement.

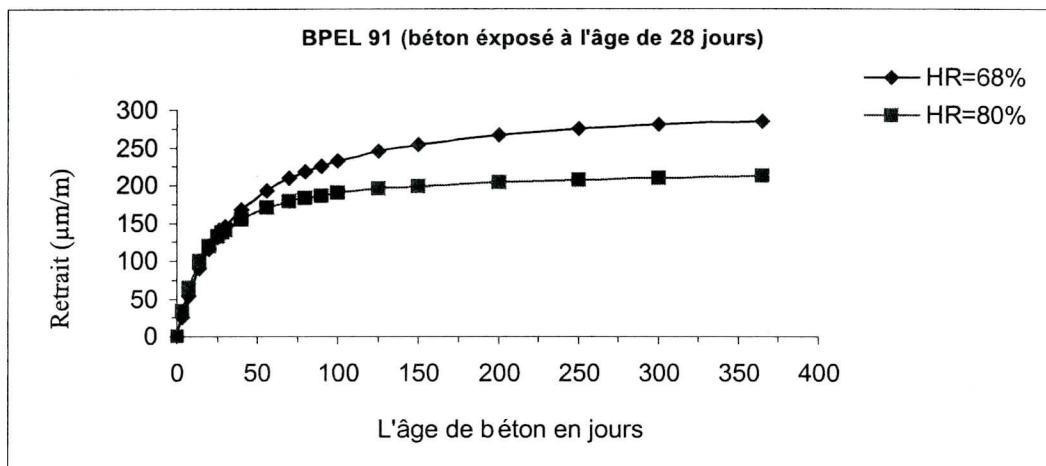
Entre les résultats des codes ECO2 et le BPEL il y'a une différence négligeable dans la variation de retrait en fonction de la variation de l'humidité, mais toujours ils sous estiment le retrait en comparant avec les résultats expérimentaux.

Avec le code ACI on trouve le cas contraire, il sur estime le retrait quelque soit la valeur de l'humidité sauf dans le cas ou $HR = 100\%$ où le retrait calculé par cette méthode est nul, c'est à dire que le ACI néglige le retrait d'un béton dans un environnement parfaitement humide.

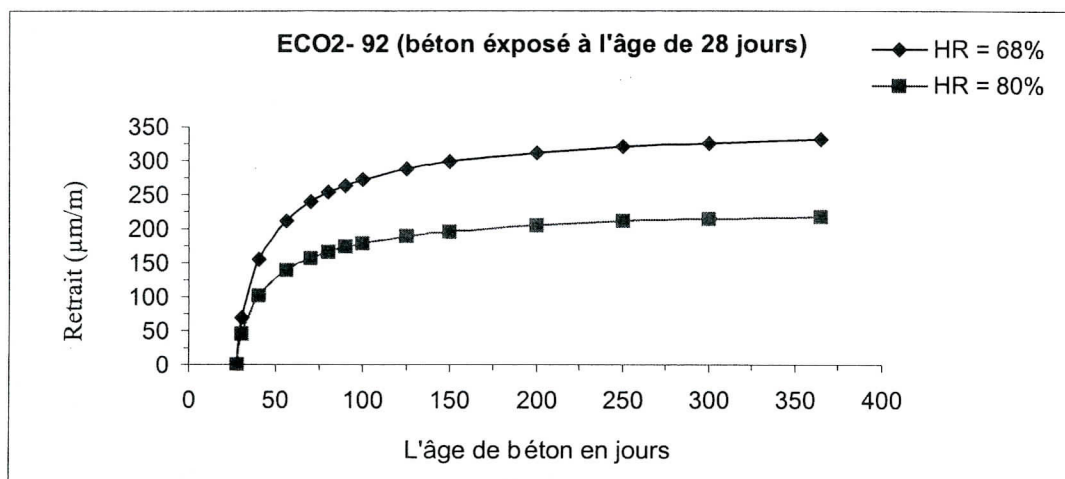
On peut conclure que le ACI est plus avantageux que les autres codes dans l'estimation de retrait malgré qu'il sur estime le retrait, mais il ne néglige pas l'effet de la période de la cure. En plus c'est le seul code parmi les quatre codes qui base sur la composition du béton pour l'estimation des déformations du béton et on sait que le retrait dépend essentiellement des conditions hygrométriques et des caractéristiques du béton.



(a)



(b)



(c)

Figure 3-17 : l'effet de l'humidité sur le retrait estimé par :
(b) - ACI-92 ; BPEL-91 ; (c) - ECO-92.

iii. Les pertes dues au retrait:

Les pertes dues au retrait sont calculées par la formule :

$$\text{Pertes} = \text{Déformation} * \text{Es}$$

Les deux paramètres ; la période de la cure et l'humidité de l'environnement lors du durcissement du béton ont une grande influence sur les pertes de la précontrainte. Dans cette étude on a travaillé sur des échantillons en béton sans armatures et ça ne représente pas le cas réel, car les ouvrages contiennent un certain pourcentage d'armatures, ces derniers empêchent la dispersion des pertes dues au retrait s'il s'agit d'une bonne adhérence entre l'acier et le béton.

Tableau 3-6 : Les pertes dues au fluage et la déformation élastique déterminées par les différentes méthodes sous l'effet de l'humidité (période de cure est 28 jours).

	expérimentale	ACI	ECO2	BPEL	PCI
HR=68%	96	80,2	66,4	57	68,4
HR=80%	60	66,8	43,6	42,4	60,5

Ce qu'on peut tirer par la figure (3-18) est que : Touts les codes donnent les pertes inférieures à celles calculées par les déformations réelles lorsque HR=68%, à cette humidité on peut adopter que la plus proche évaluation est celle donnée par le code ACI. Lorsque HR=80% l'intensité des pertes des deux codes ACI et PCI devient moins valu.

A cette humidité, la bonne évaluation est donnée par le code PCI (+1%).

Les pertes calculées par le code ACI sont supérieures aux pertes réelles de 12%.

Ces résultats signifient que l'intensité des facteurs (qui exprime l'effet de l'humidité) dans les deux codes ACI et PCI est très influencée par l'humidité,

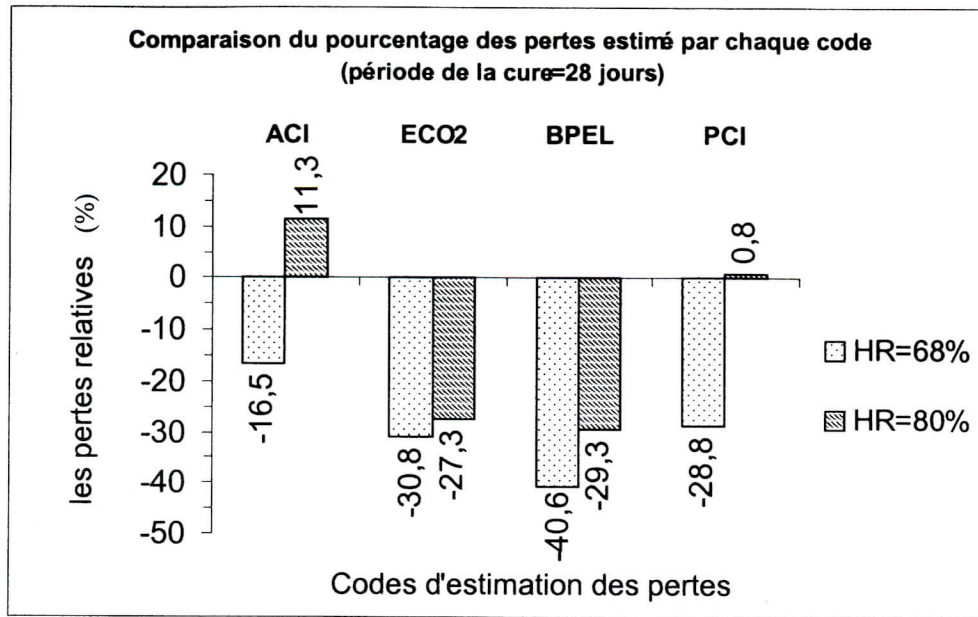


Figure 3-18 : Comparaison du pourcentage d'estimation des pertes entre les différents codes pour une période de cure =28 jours.

3.3. DEUXIEME ETUDE:

3.3.1. Présentation de L'étude :

Dans cette étude on compare entre les déformations différées calculées par les codes est celle obtenues dans laboratoire par les essais qui ont été effectués par RENUE-MARIE BERTHIER [15]. Concernant la comparaison des pertes, et dans l'absence des résultats réels des pertes différées, les pertes expérimentales sont calculées à partir des déformations mesurées en appliquant les formules représentées précédemment (paragraphe 3-2).

L'étude de BERTHIER [15] à analyser l'effet de deux granulats l'un concassés et l'autre roulés, l'influence du rapport G/S et du rapport E/C.

i. Caractéristiques du béton :

Le ciment était un CPA 400, et le dosage à été fixé à 400kg/m^3 . Les paramètres hygrométries et de température ont été éliminés en conduisant les essais à température et hygrométrie constante (température sera régulière à 20°C et les éprouvettes protégées de l'évaporation par application d'une peinture protectrice). La charge appliquée été de 10 MPa, re présente une moyenne en précontrainte.

L'âge du béton au moment de l'application de la charge à été fixé à 14 jours, ce qui représente un âge relativement jeune pour l'application totale de la charge. Cet âge de 14 jours sera l'origine des temps pour les mesures de retrait et de fluage.

Les éprouvettes de béton destinées aux mesures de fluage et de retrait sont de forme cylindrique, de diamètre 104 mm et de hauteur 104 mm elles ont été placées dans une enceinte à température de 20°C et hygrométrie de 100% jusqu'à 14 jours (début des essais).

ii. Compositions des bétons :

Quatre composition différentes de béton ont été étudiés a fin d'analyse l'effet de trois paramètres principaux : nature des granulats, rapport gravier/sable et rapport eau/ciment. Les compositions granulométriques des différents bétons sont données dans le tableau (3-7) :

Tableau 3-7 : Les compositions granulométriques des différents bétons [15].

Type	G/S	E/C	Nature de granulats		Composition granulométrique			a %	Affaissement mm
			Sable	Gravier	Composants	%	Kg/m ³		
B1	1	0,53	Concassé	Concassé	Gravier 10/12	23,5	630	4	120
					Gravier 4/10	9,4	252		
					Sable 2/4	5,1	137		
					Sable 0/2	27,8	745		
					Ciment	12,9	400		
					Eau	21,3	213		
					total	100,00	2377		
B2	1,7	0,45	Concassé	Concassé	Gravier 10/12	31	831	2	100
					Gravier 4/10	12,5	335		
					Sable 2/4	4	107		
					Sable 0/2	21,6	579		
					Ciment	12,9	400		
					Eau	18	180		
					total	100,00	2432		
B3	1	0,45	Concassé	Concassé	Gravier 10/12	24,6	659	2	110
					Gravier 4/10	9,9	265		
					Sable 2/4	5,4	145		
					Sable 0/2	29,2	783		
					Ciment	12,9	400		
					Eau	18	180		
					total	100,00	2432		
B4	1	0,53	Roulé	Roulé	Gravier 10/12	20,9	560	4	130
					Gravier 4/10	12	321		
					Sable 0/4	32,9	882		
					Ciment	12,9	400		
					Eau	21,3	213		
					Total	100,00	2376		

a : Quantité d'air dans le béton en pourcentage de volume

Le tableau qui suit représente les valeurs des trois paramètres et les bétons à comparer

Tableau 3-8 : Les paramètres et les bétons à comparer.

Les bétons	Type des granulats		Le rapport G/S		Le rapport E/C	
	Roulés	Concassés	G/S=1	G/S=1,7	E/C=0,45	E/C=0,53
Béton 1		X			X	
Béton 2				X		
Béton 3			X			X
Béton 4	X					

iii- Les résultats des essais de l'étude expérimentale :

L'enregistrement de la courbe de charge en compression, effectué sur des éprouvettes de béton pour chaque catégorie, permet de déduire les valeurs :

- du module élastique en compression E
- la résistance en compression R

Les résultats de ces essais sont consignés dans le tableau suivant :

Tableau 3-9: Les caractéristiques des bétons [15].

N° béton	G/S	E/C	Résistance À 28 jours (MPa)	Eprouvette témoins 14 jours
				E(MPa)
1	1	0,53	29,2	23500
2	1,7	0,45	41	25300
3	1,7	0,45	47,5	24800
4	1	0,53	29,5	28000

Les mesures effectuées sur les éprouvettes donnent les déformations totales y compris la déformation initiale à la mise en charge sont représentés dans la figure (3-19). Parallèlement aux mesures des déformations totales, des mesures du retrait du béton ont été effectuées dans chaque cas, (figure 3-20).

Le fluage est obtenu en soustrayant des déformations totales, la déformation initiale due à la mise en charge et la valeur correspondante du retrait (figure 3-21).

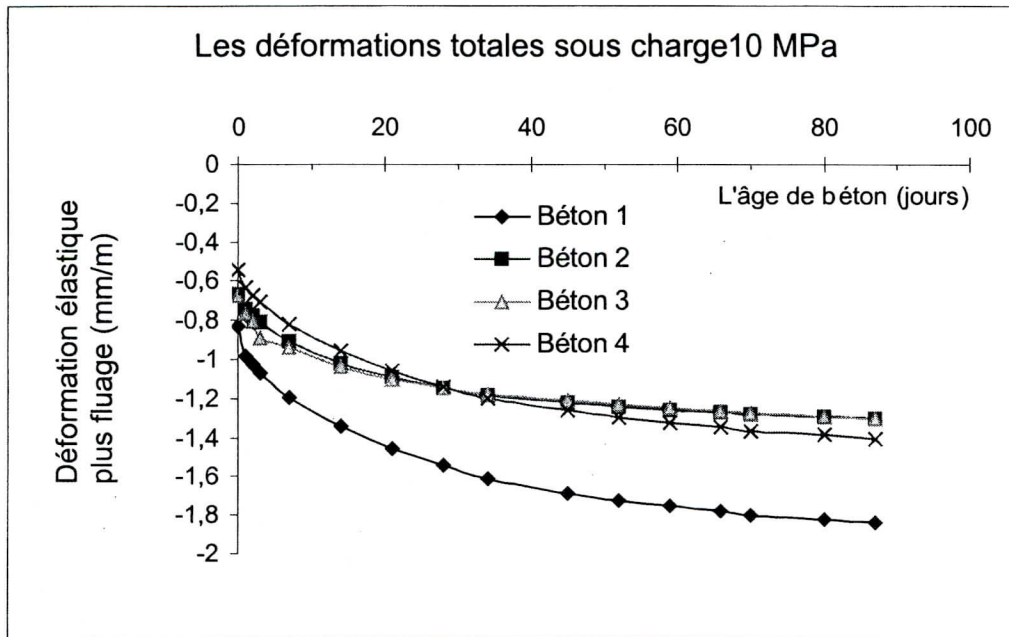


Figure 3-19 : Les déformations totales mesurées sous charge de 10 MPa [15].

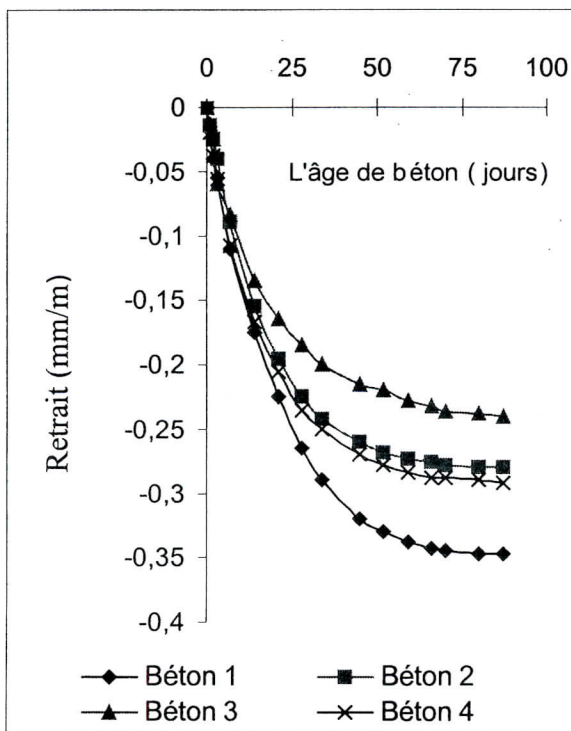


Figure 3-20 : Retraits mesurés [15]

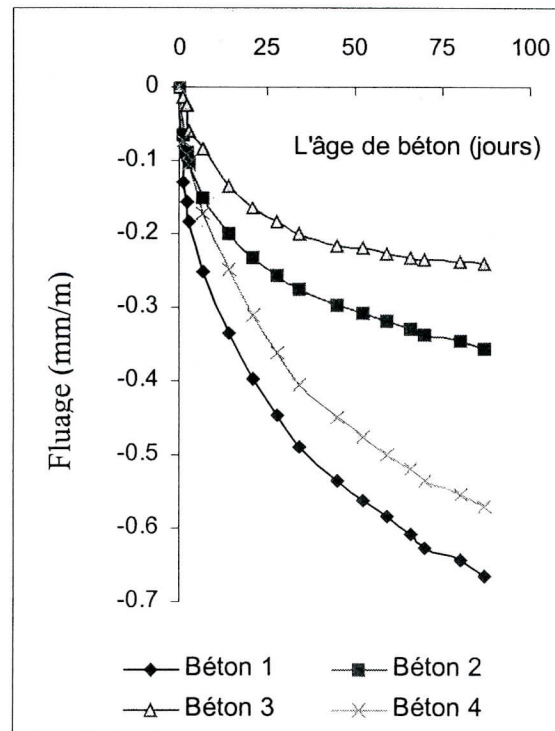


Figure 3-21 : Fluages mesurés
Sous charge de 10 MPa [15].

D'après les résultats expérimentaux représentés dans les figures (3-23 (a), 3-24(a)) et qui montrent l'effet de la nature des granulats sur le retrait et le fluage qu'il y'a une certaine influence de la nature des granulats sur le retrait, tandis que pour le fluage cette influence est considérable. Actuellement certaines propriétés physiques (porosité, module d'élasticité, minéralogie) sont considérées comme ayant une certaine influence sur la cinétique et la valeur final du fluage, les résultats expérimentaux obtenus nous permet de constater que la différence remarqué sur les retrait et les fluage est due à la faiblesse du module élastique des granulats concassés qui liée à la nature des granulats.

3.3.2. Comparaison des Résultats Expérimentaux avec Ceux des Codes :

On tente dans ce qui suit à comparer les résultats expérimentaux du retrait et le fluage ainsi les pertes produisent avec ceux des résultats des essais de laboratoire.

3.3.2.1. Analyse de l'influence de la nature des granulats :

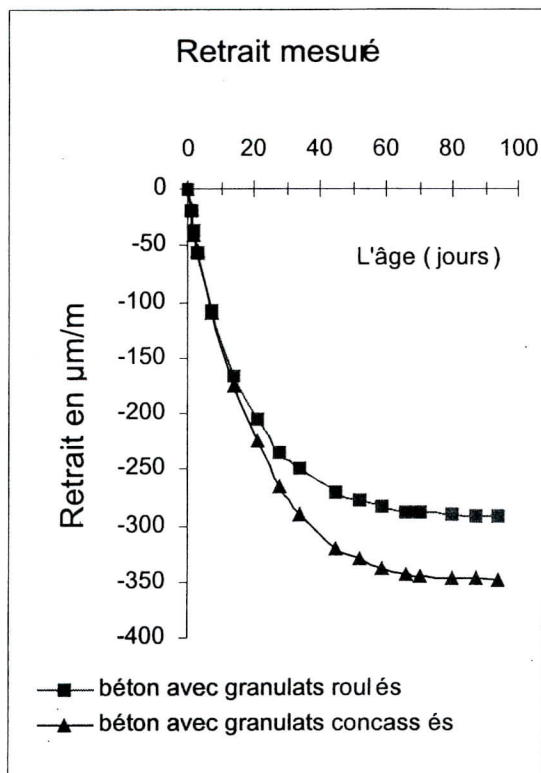
i. Retrait :

On remarque l'effet de type des granulats n'apparaît qu' après 20 jours, cette influence devient importante à long terme, elle atteinte une valeur de $150 \cdot 10^{-6}$ à l'âge de 90 jours. Le béton confectionné avec des granulats roulés a un retrait plus grand que celui d'un béton confectionné avec des granulats concassés.

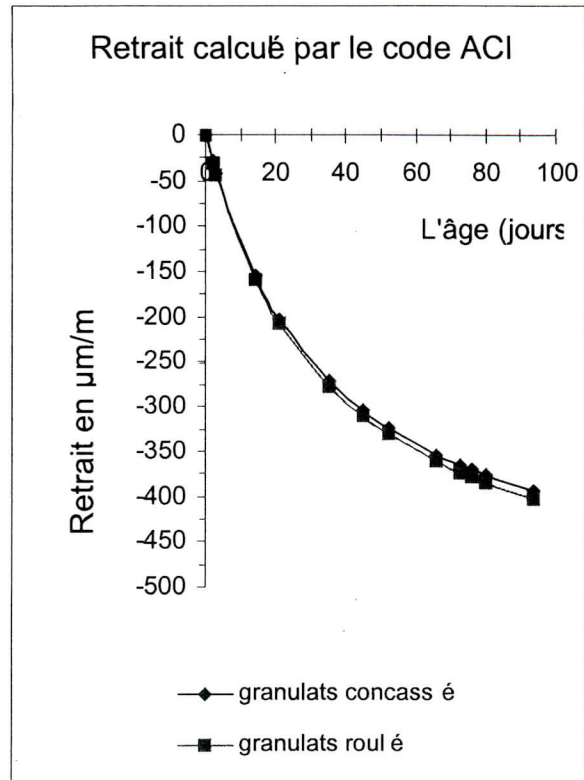
Comparativement avec les résultats des codes on constate que :

Les deux codes BPEL et ECO2 ne donnent aucune différence entre les deux béton 1 et 3, car ces deux codes ne prennent pas l'effet de la composition de béton dans l'estimation de retrait. Par conséquent, le BPEL sous estime beaucoup le retrait de (-48%) pour le béton de granulats concassés et de (-34%) dans le cas des granulats roulés, et le'ECO2 sur estime le retrait des granulats concassés de +14%, et sous estime le retrait des granulats roulés (-32%).

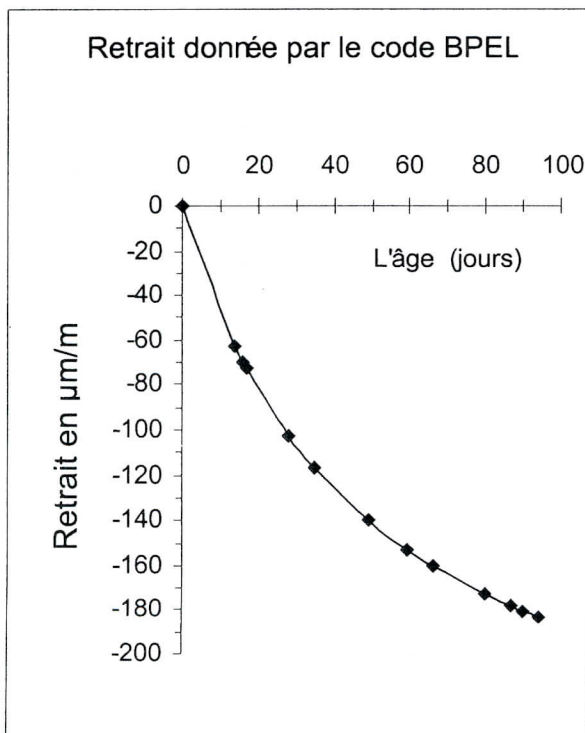
A travers les résultats de code ACI (figure (3-22 (b))), le retrait de deux bétons ayant deux types de granulats roulés et concassés est presque le même.



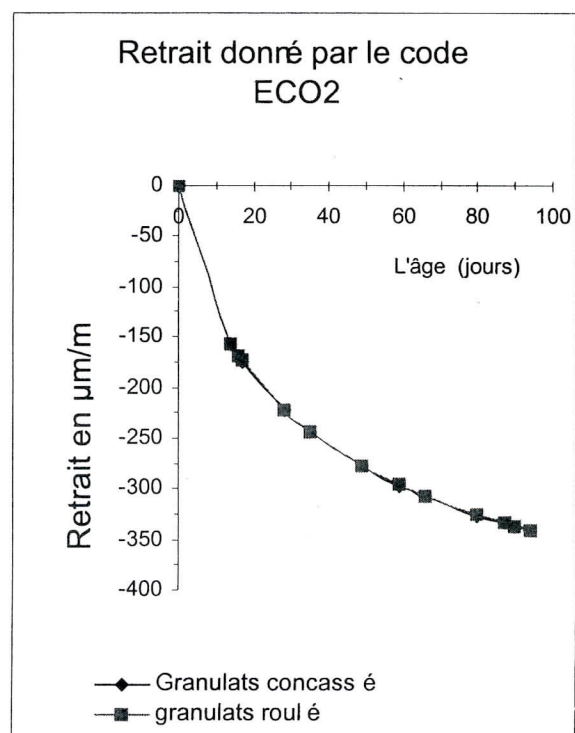
(a)



(b)



(b)



(d)

Figure 3-22: Résultats des retraits mesurés et calculés sous l'effet des granulats
 (a): Expérimentaux, (b) : Code ACI, (c) : Code BPEL, (d) : Code ECO2.

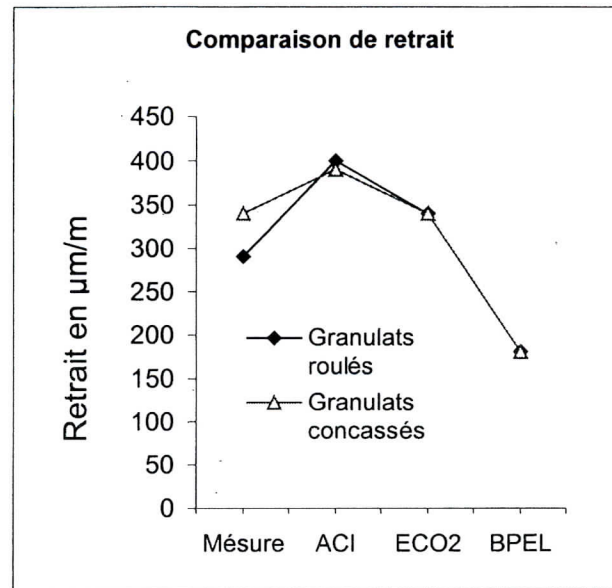


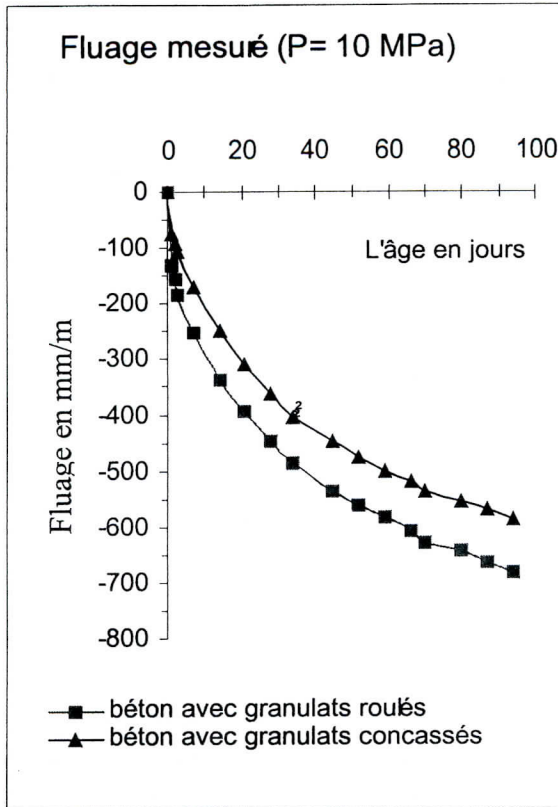
Figure 3-23 : Comparaison de retrait sous l'effet de type des granulats.

ii. Fluage :

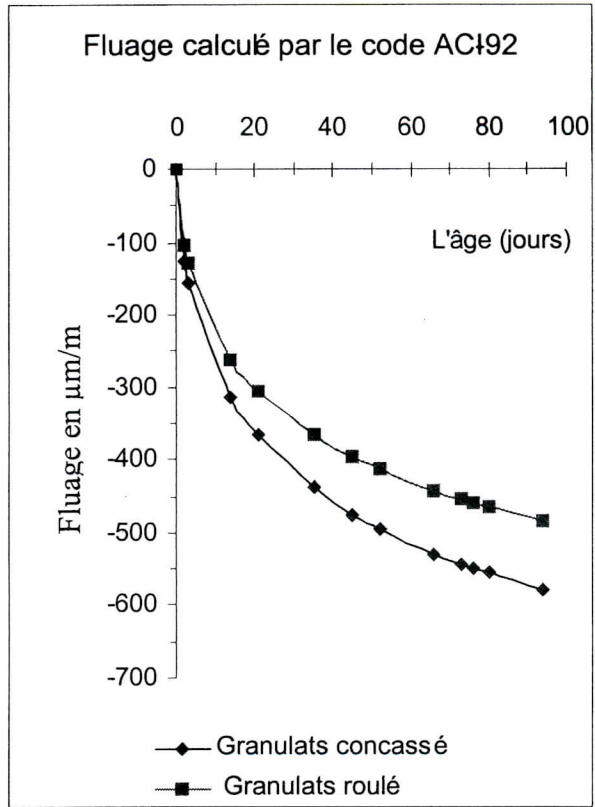
D'après les figures (3-24) qui donne les résultats des essais ainsi que ceux calculés par les codes, il semble que le fluage d'un béton confectionné avec des granulats concassés est légèrement plus élevé que celui de même béton confectionnée avec des granulats roulés (figure 3-24 (a)).

Il semble que le code ACI présente une estimation médiane par rapport aux autres codes. Cependant, et comparativement aux résultats expérimentaux, le code ACI sur estime le fluage de 16% à 32% pour les deux types de granulats.

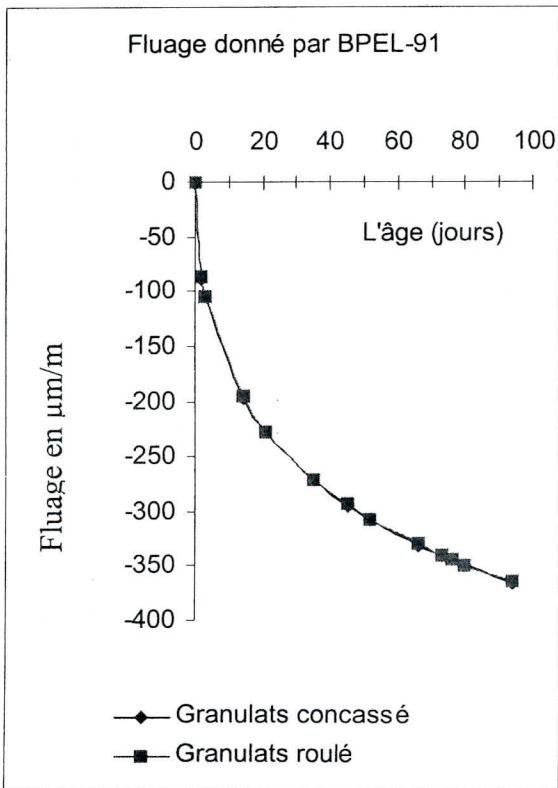
Le BPEL donne un fluage qui coïncide au fluage expérimental quand le béton est composé des granulats roulés ce qui permet de dire que ce code estime mieux le fluage d'un béton confectionné avec des granulats roulés, par contre l' ECO2 donne une évaluation moins proche pour les deux bétons, il sur estime le fluage de béton à granulats roulés de (+38 %) et sous estime le fluage de béton à granulats concassés de (- 26%).



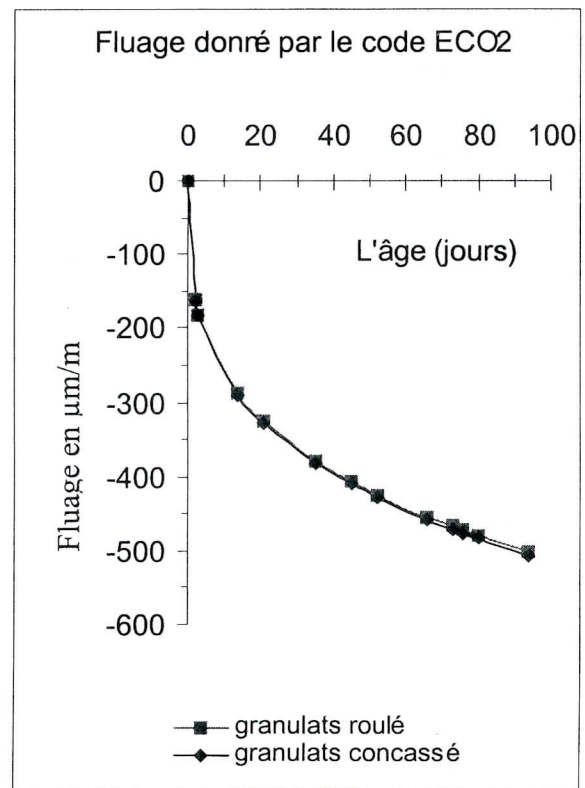
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 3-24: Résultats des fluages mesurés et calculés sous l'effet des granulats
(a) - : Expérimentaux, (b) : Code ACI, (c) : Code BPEL, (d) : Code ECO2.

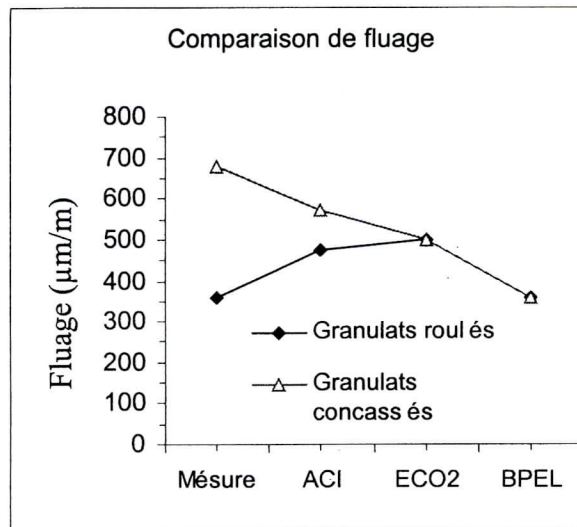


Figure 3-25 : Comparaison de fluage sous l'effet de type des granulats

iii. Les pertes dues au retrait et au fluage:

Les pertes dues aux déformations expérimentales sont calculées par la formule suivante :

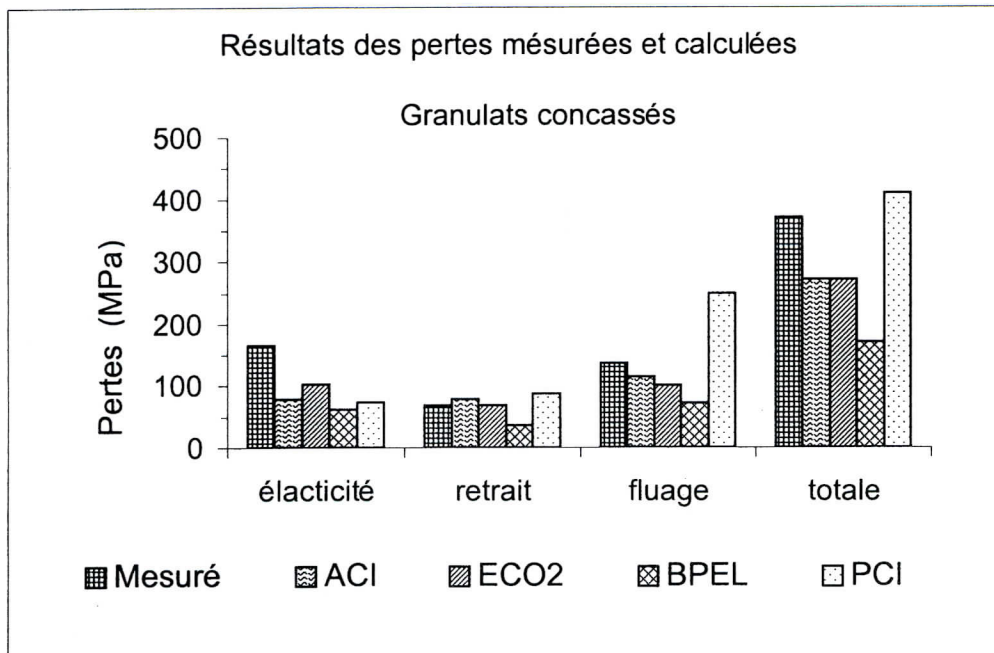
$$\text{Pertes} = \text{Déformation } E_s$$

Où E_s : Module élastique = $2 \cdot 10^5$ MPa

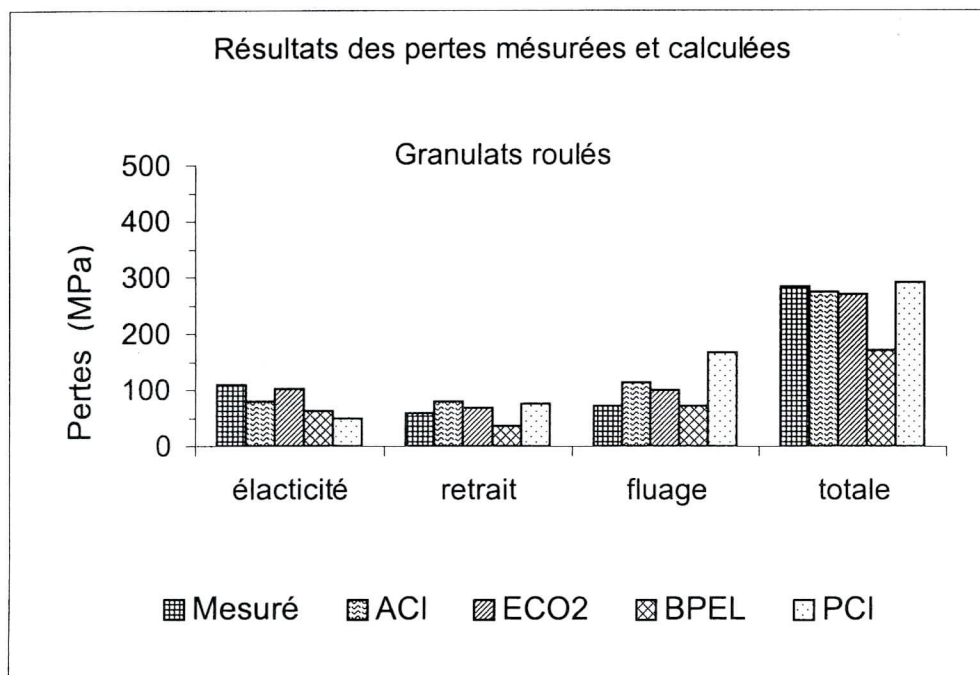
Les résultats de calcul sont représentés dans les figures (3- 26(a), (b)) . Les pertes dues au raccourcissement élastique mesurées sont très élevées par rapport aux pertes calculées, ce résultat provoque la sous estimation des pertes totales calculées. Mais avec la méthode PCI on trouve le cas contraire elle sur estime les pertes totales est ça dû à la sur évaluation des pertes dues au retrait et au fluage. Les deux codes ACI et ECO2 donne les mêmes pertes dans les deux bétons. La meilleure estimation des pertes par ces deux codes est obtenue lorsque le béton est confectionné avec des granulats concassés (figure 3-27)

Les pertes calculées par le code BPEL sont plus loin par rapport aux pertes calculées par les déformations mesurées à cause de la mauvaise évaluation des trois pertes (déformation élastique , retrait , fluage). Contrairement aux trois autres codes, la méthode PCI donne des pertes plus élevées pour les deux types de granulats. Les pertes dues au retrait, fluage et le raccourcissement élastique sont inversement proportionnelles au module élastique du béton. Lorsque le module élastique est supérieur à 29000 MPa les pertes de fluage ne dépassent pas 50 MPa, alors que lorsque ce module est inférieur à la valeur indiquée, on

remarque que l'augmentation des pertes devient très est rapide. D'après l'histogramme ci-dessous (figure 3- 27) on peut conclure que les trois codes ACI, ECO2 et PCI estiment mieux les pertes d'un béton confectionné avec des granulats concassés.



(a)



(b)

Figure 3-26 : Comparaison des pertes calculées par les codes et par les déformations élastiques sous l'effet de type des granulats

(a) - Granulats concassés; (b) - Granulats roulés

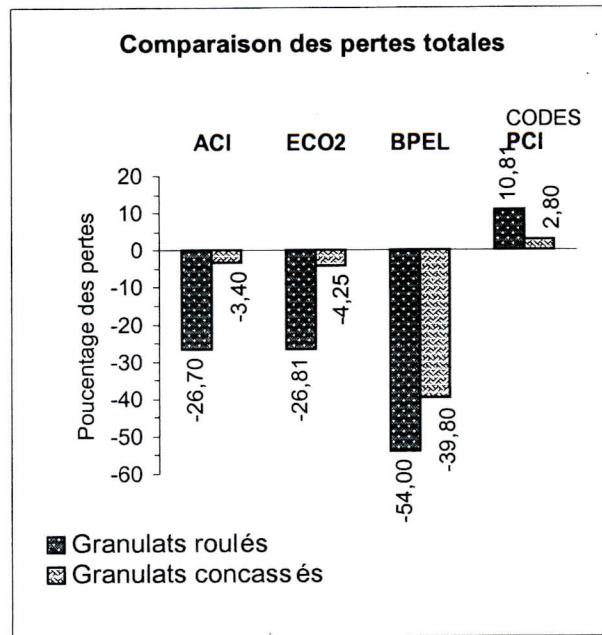


Figure 3-27 : comparaison de pourcentage d'estimation des pertes totales entre les différents codes sous l'effet de type de granulats.

3.3.2.2. Analyse de l'influence du rapport G/S :

Deux types de béton ayant un même rapport Eau/Ciment ($E/C=0,45$) et un même type de granulats (granulats concassés granitiques) ont été analysés.

Béton 2 : Gravier/Sable (G/S) = 1,7

Béton 3 : Gravier/Sable (G/S) = 1

Les résultats mesurés et calculés de retrait et de fluage sont représentés par les figures (3-28 (a); 3-29 (a))

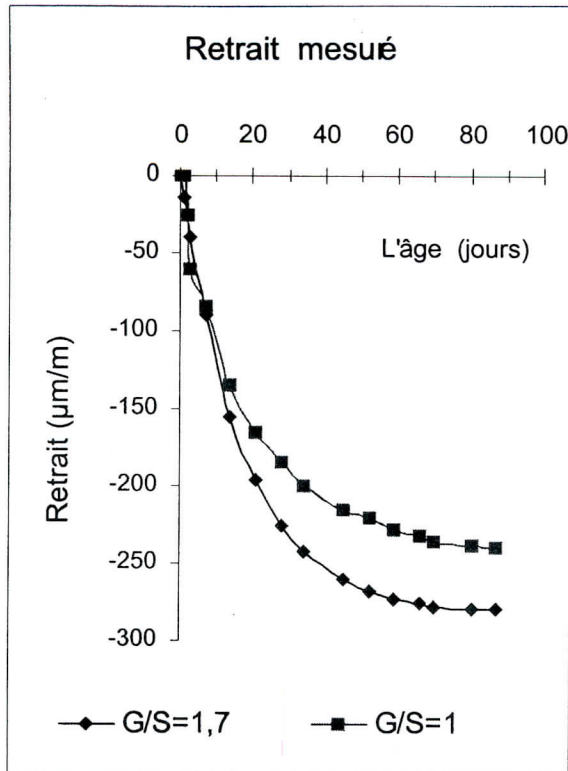
i. Retrait :

A travers les résultats expérimentaux (figure 3-28 (a)), on constate que le retrait a tendance d'augmenter, quand le rapport G/S augmente, c'est à dire quand la quantité du sable augmente. Cela pouvait s'expliquer par le fait que quand le rapport G/S augmente le dosage en ciment diminue, donc le retrait diminue.

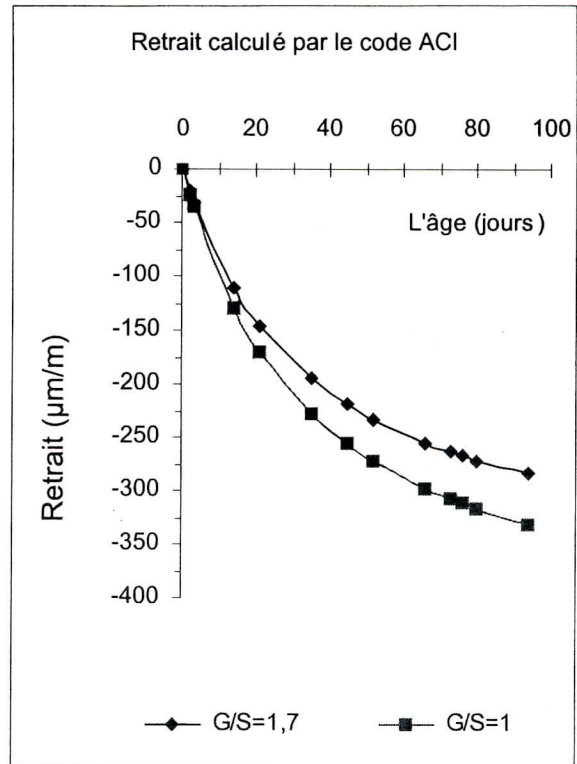
Selon l'ECO2, le retrait dépend de la résistance de béton à l'âge de 28 jours et cette dernière est influencée par le pourcentage des granulats fins, la différence calculée par ce code est inférieure à celle trouvée expérimentalement ($40. \mu\text{m/m}$). elle présente la moitié de la différence de retrait mesuré entre les deux bétons

Le code ACI donne une différence légèrement plus grande (50 $\mu\text{m}/\text{m}$), tandis que le code BPEL ne prend pas en considération l'effet de rapport G/S. Lorsque ce rapport G/S augmente le retrait calculé par le code ACI diminue et c'est contrairement aux résultats expérimentaux.

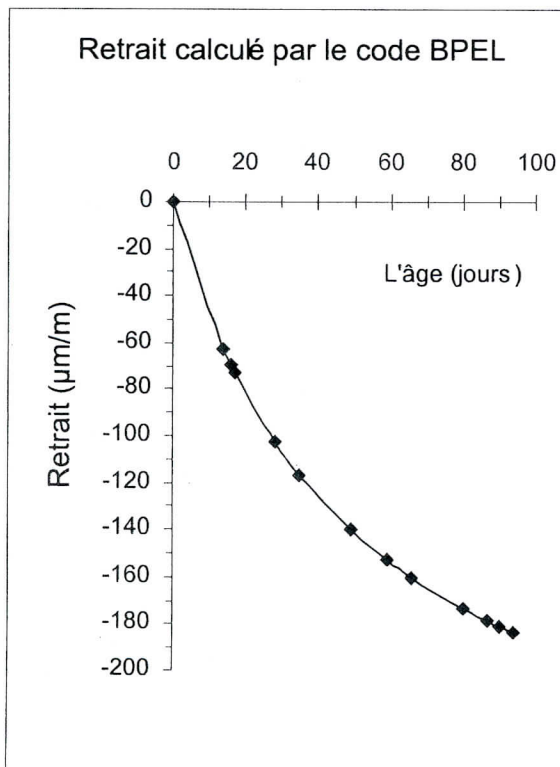
La comparaison des déformations à l'âge de 90 jours montre que pour un rapport G/S=1,7 ; le retrait estimé par le ACI est égale à celui trouvé expérimentalement. Par contre, pour un rapport G/S=1, l'EC02 et ACI sur estiment le retrait de (16%) et de (+36%) respectivement et le code BPEL sous estime le retrait de deux bétons.



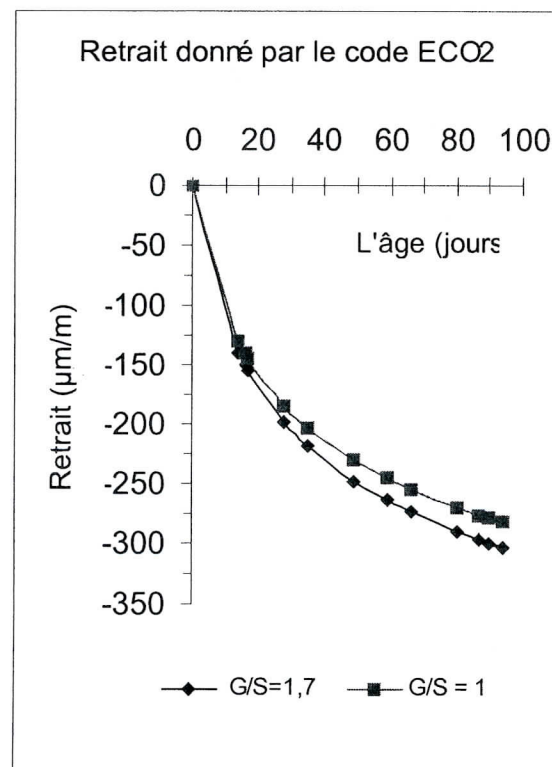
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 3-28 : Résultats de retrait mesurés et calculés sous l'effet de rapport G/S

(a)-: Expérimentaux, (b) :Code ACI, (c) : Code BPEL, (d) : Code ECO2.

La figure (3-29) montre l'estimation de retrait par les différentes méthodes.

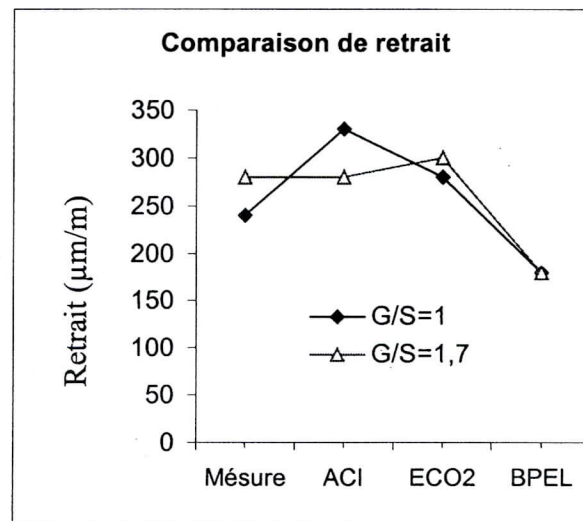


Figure 3-29: Comparaison de retrait sous l'effet de rapport G/S.

ii. Fluage :

Les résultats de fluage sont donnés par les figures (3-30 ; 3-31). Expérimentalement le rapport G/S provoque une différence de fluage de (127 µm/m) lorsque le rapport G/S varie de 1 à 1,7 c'est à dire, lorsque le rapport G/S augmente de 70%, le fluage augmente de 60%, selon l'estimation de fluage par les différents codes, cette variation de rapport G/S provoque une variation de fluage de 40 µm/m pour les deux codes ACI et ECO2 et de 15 µm/m pour le code BPEL.

D'après les résultats représentés dans la figure (3-30) il semble que le code ACI donne une meilleure estimation de fluage (0%) lorsque le rapport G/S est élevé (G/S=1,7), les deux codes européens donnent un même pourcentage d'évaluation ; l'un (BPEL) moins valu (-9%) et l'autre (ECO2) plus valu (+9%). Tandis que pour un rapport G/S =1 les codes donnent un fluage plus élevé que celui obtenu expérimentalement.

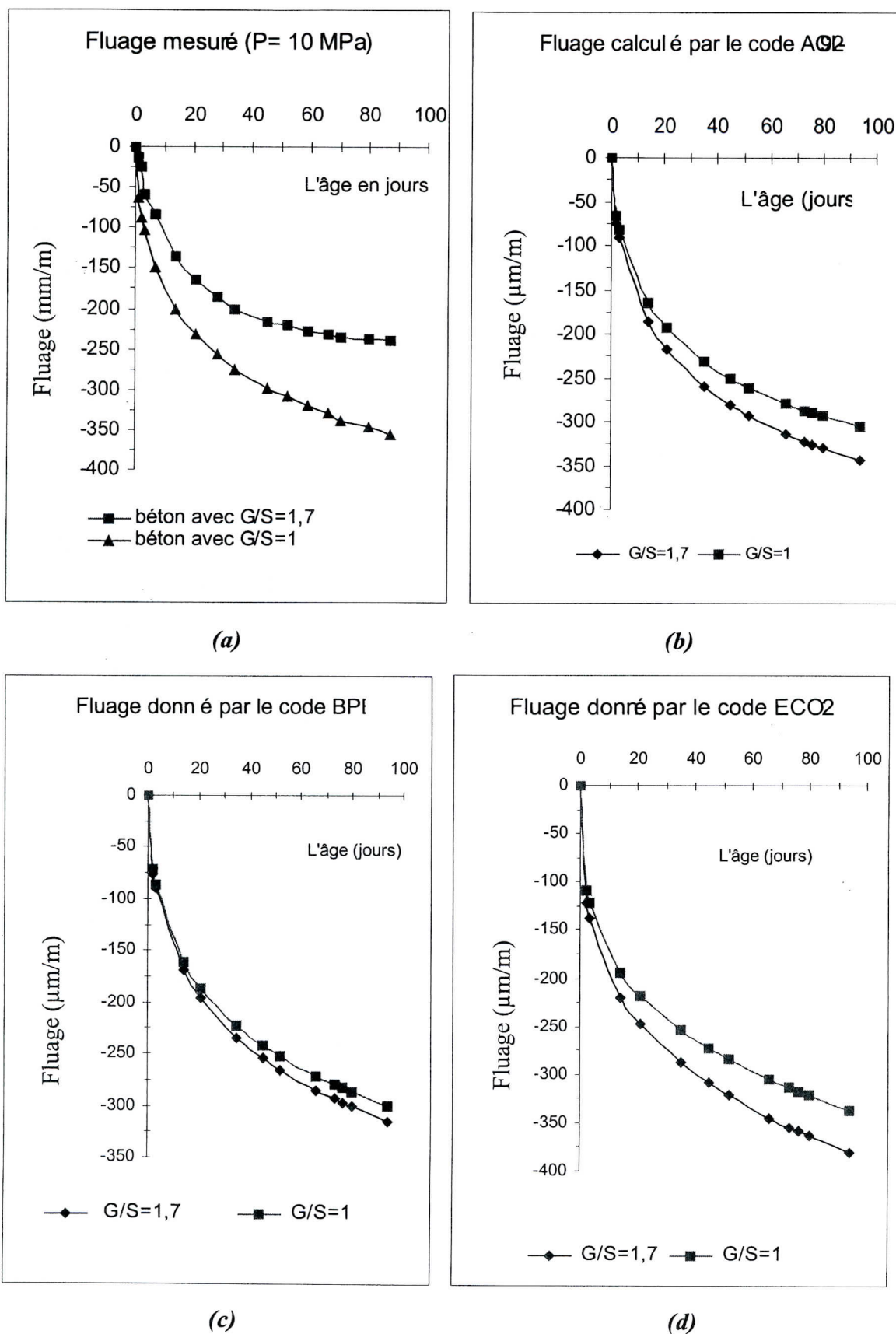


Figure 3-30 : Résultats de fluage mesurés et calculés sous l'effet de rapport G/S

(a) : Expérimentaux, (b) : Code ACI, (c) : Code BPEL, (d) : Code ECO2.

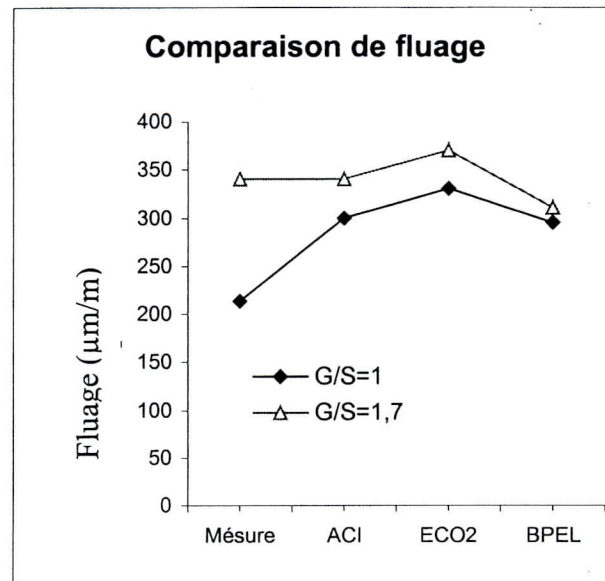


Figure 3-31 : Comparaison de fluage sous l'effet de rapport G/S.

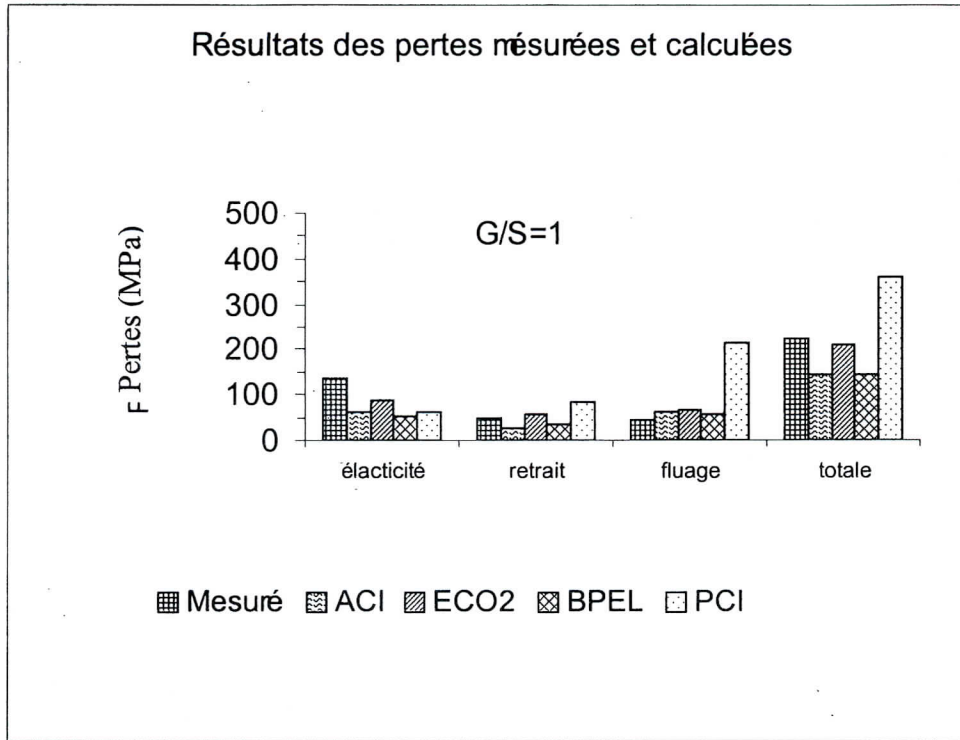
iii. Les pertes dues au retrait et au fluage :

A travers les deux histogrammes (figure (3-32 (a) et (b)) qui présentent les pertes dues au raccourcissement élastique, au retrait et au fluage du béton ainsi les pertes totales dues à ces trois déformations calculées par les différentes méthodes, on constate que Les quatre méthodes donnent des pertes inférieures à celles calculées par les déformations mesurées. Cette sous estimation est due à :

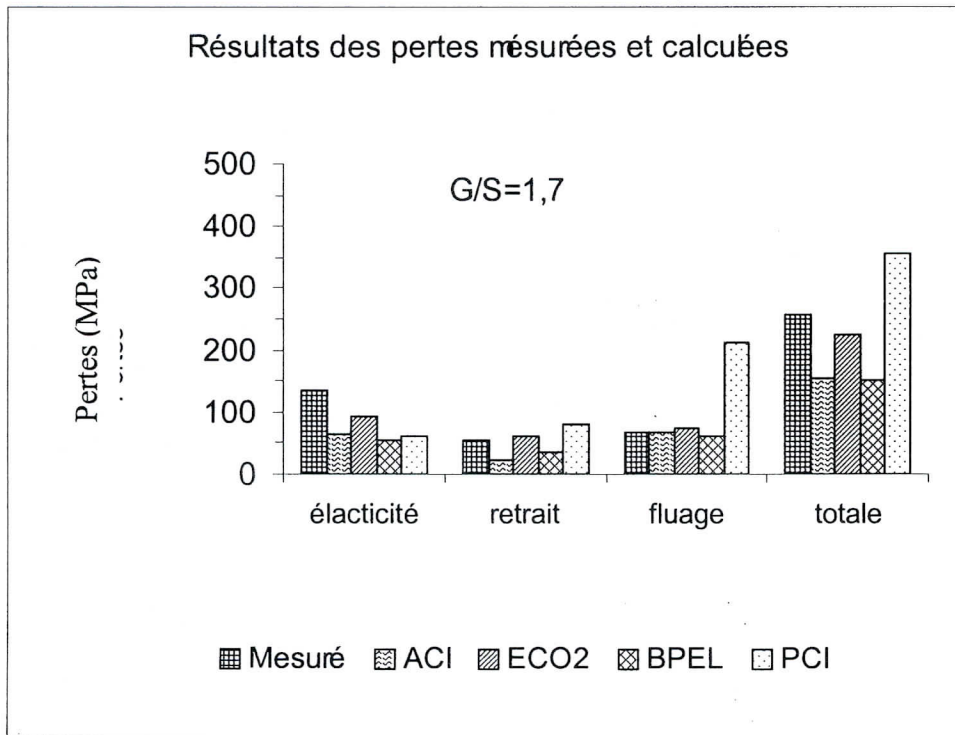
- Une sous estimation des pertes dues à la déformation élastique.
- Une sous estimation de retrait calculé par les codes ACI et BPEL.

Les pertes dues au retrait ou fluage ou la déformation élastique calculées par les deux codes ACI et ECO2 sont différentes, mais la somme de ces trois pertes sont égales. Le code ECO2 donne une meilleure estimation des pertes dues au retrait, au fluage ou la déformation élastique, et par conséquent une meilleure estimation des pertes totales.

Selon la méthode de PCI, la seule différence entre les deux bétons se trouve dans le module élastique, si ce dernier est petit les pertes sont très importantes. Et puisque la différence de module élastique entre les deux bétons est très petite, on n'a pas trouvé une grande différence des pertes entre les deux bétons.



(a)



(b)

Figure 3-32 : Comparaison des pertes calculées par les codes et par les déformations élastiques sous l'effet de rapport G/S.

(a) – Gravier/Sable=1 ; (b) – Gravier/Sable=1,7 ;

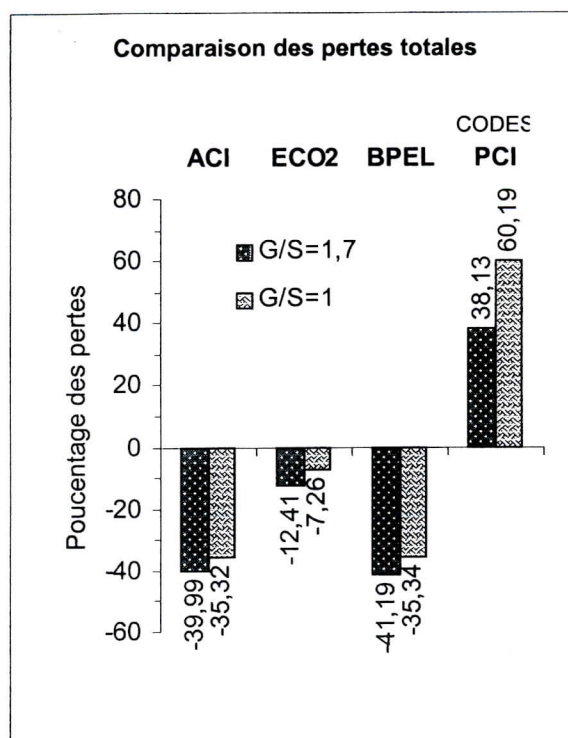


Figure 3-33: Comparaison de pourcentage d'estimation des pertes entre les différents codes sous l'effet de rapport G/S

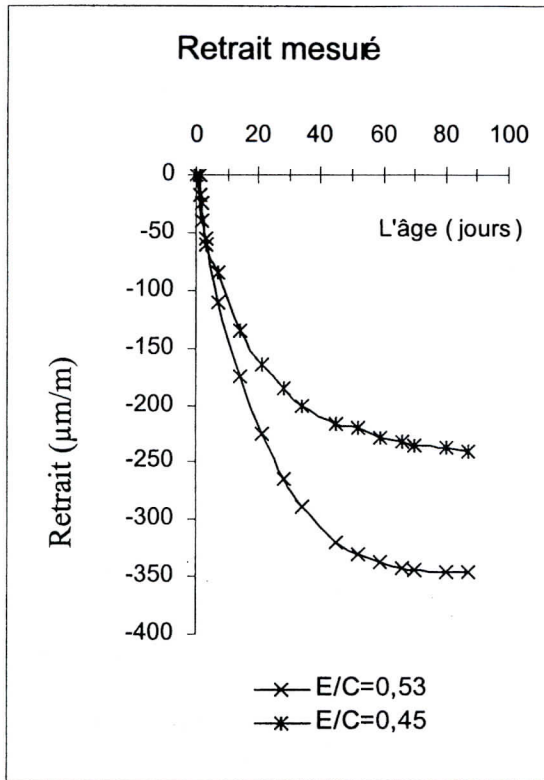
3.3.2.3. Analyse de l'influence de rapport E/C :

L'examen des courbes de fluage (figure 3-34 (a)) montre que pour un même type de granulats et le même rapport G/S, le fluage et le retrait sont beaucoup plus important quand la valeur du rapport E/C est élevée.

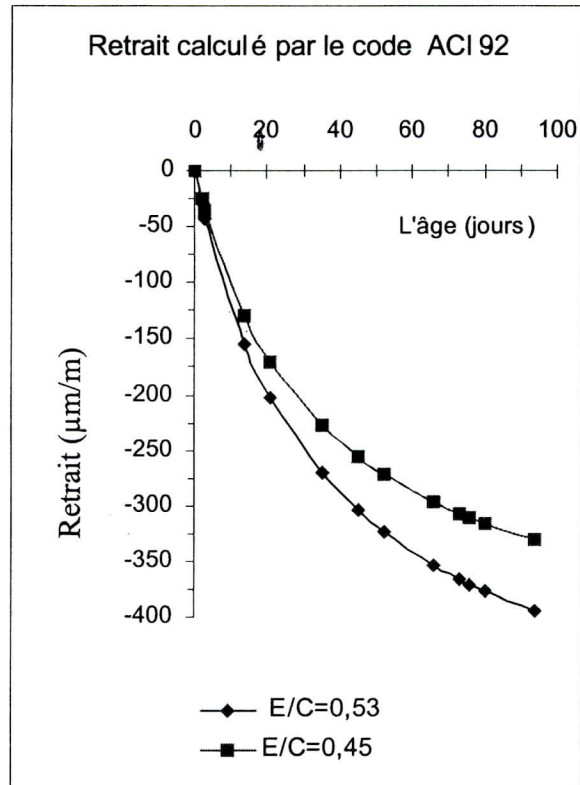
i. Retrait :

D'après les figures (3-34 ; 3-35) on constate que lorsque le rapport E/C varie de 0,45 à 0,53 le retrait calculé par les deux codes ACI et ECO2 varié de 330 $\mu\text{m/m}$ à 390 $\mu\text{m/m}$ et de 280 $\mu\text{m/m}$ à 340 $\mu\text{m/m}$ respectivement. Expérimentalement la variation de rapport E/C fait varier le retrait de 240 $\mu\text{m/m}$ à 350 $\mu\text{m/m}$

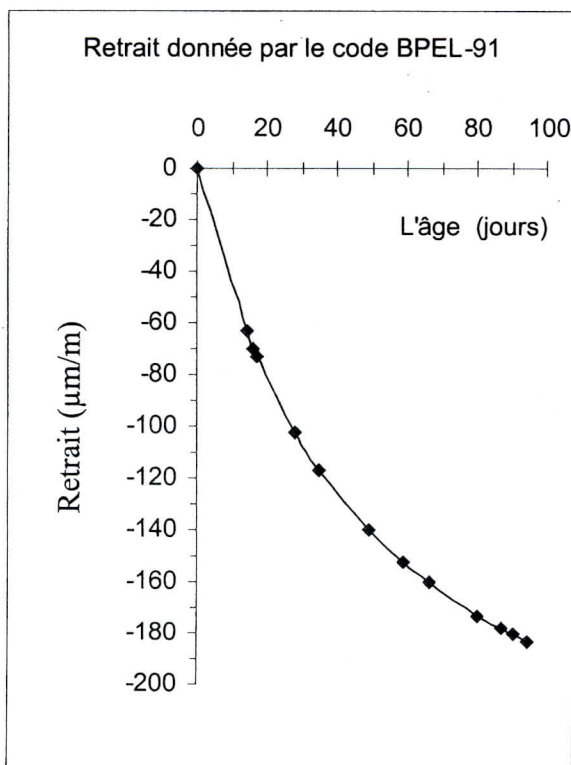
Les valeurs des retraits mesurés et calculés à l'âge de 90 jours sous l'influence de rapport E/C sont représentés par la figure 3-34. On remarque que pour un rapport E/C élevé (0,53), le code ECO2 donne le même retrait trouvé expérimentalement et le code ACI sur estime le retrait de (14%). Par contre, pour un rapport E/C moyen (0,45%), les deux codes ECO2 et ACI sur estimes le retrait



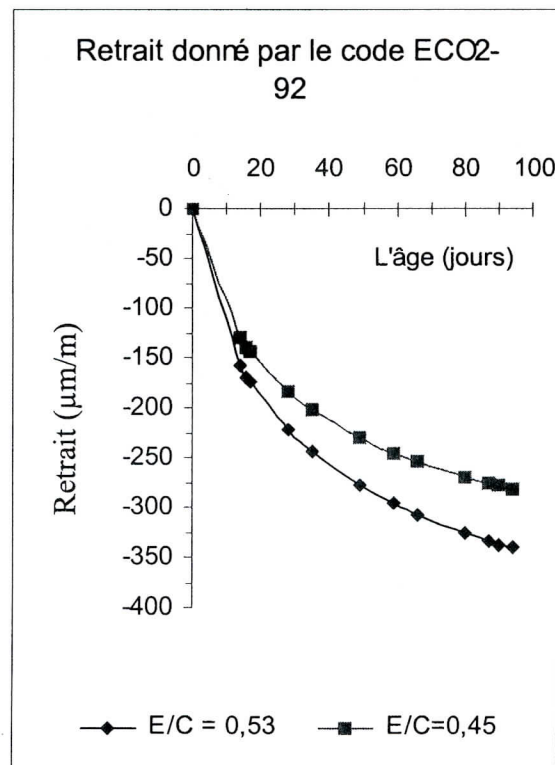
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 3-34 : Résultats des retraits mesurés et calculés sous l'effet de rapport E/C
(a) -: Expérimentaux, (b) : Code ACI, (c) : Code BPEL, (d) : Code ECO2.

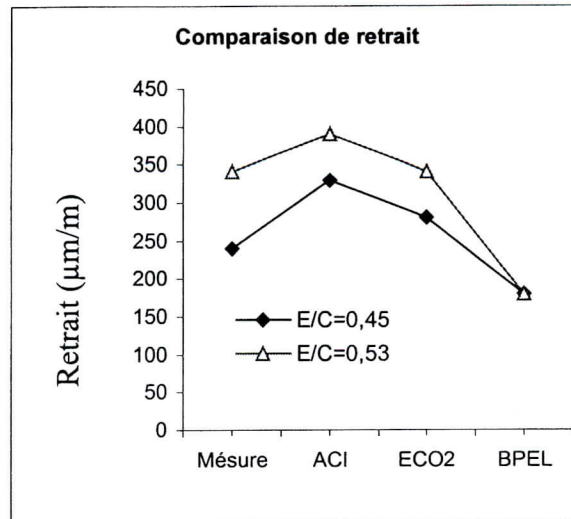


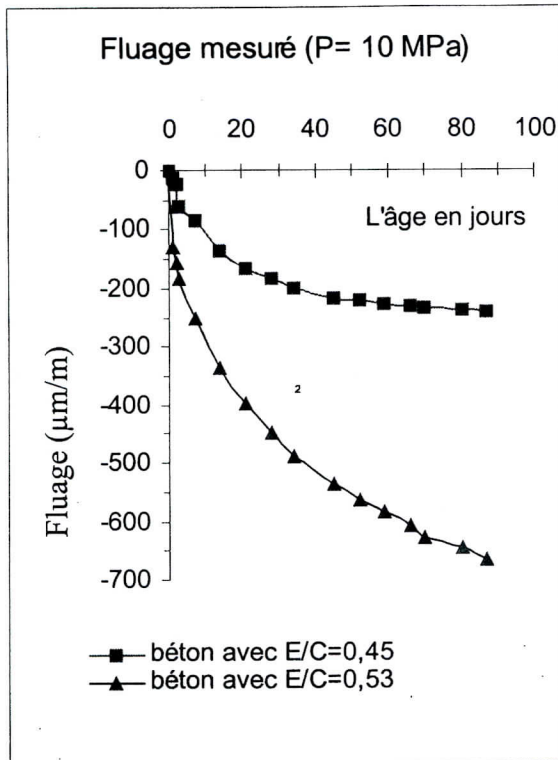
Figure 3-35: Comparaison de retrait sous l'effet de rapport E/C

On peut conclure que pour réduire les déformations différées il faut améliorer les caractéristiques du béton. La solution de ce problème est d'utiliser des bétons qui contiennent un rapport E/C minimale ou on utilisant des adjuvants réducteurs d'eau.

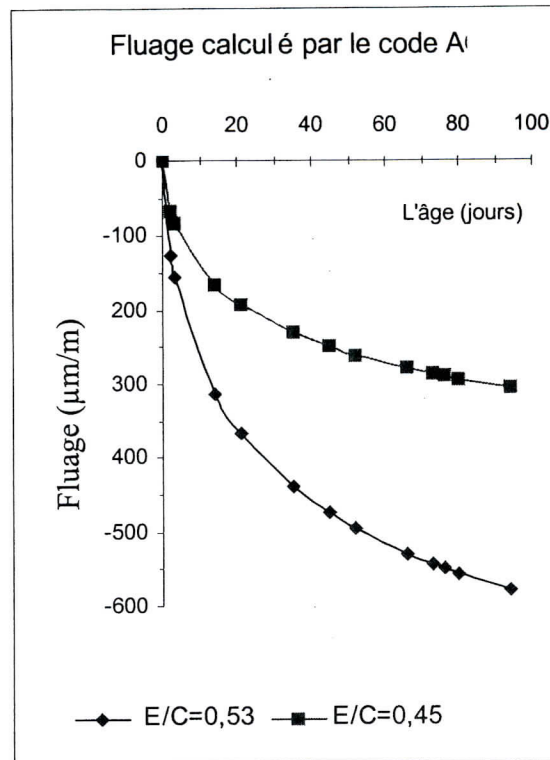
ii. Fluage :

L'examen des courbes de fluage (figure 3-36 a) qui représentent le développement de fluage dans le temps montre que pour un même type de granulats et le même rapport G/S, le fluage est beaucoup plus important quand le rapport Eau/Ciment est élevé. Le fluage varie inversement avec les caractéristiques mécaniques (R, E). Donc pour avoir la qualité maximale, il faudrait avoir un rapport E/C minimal.

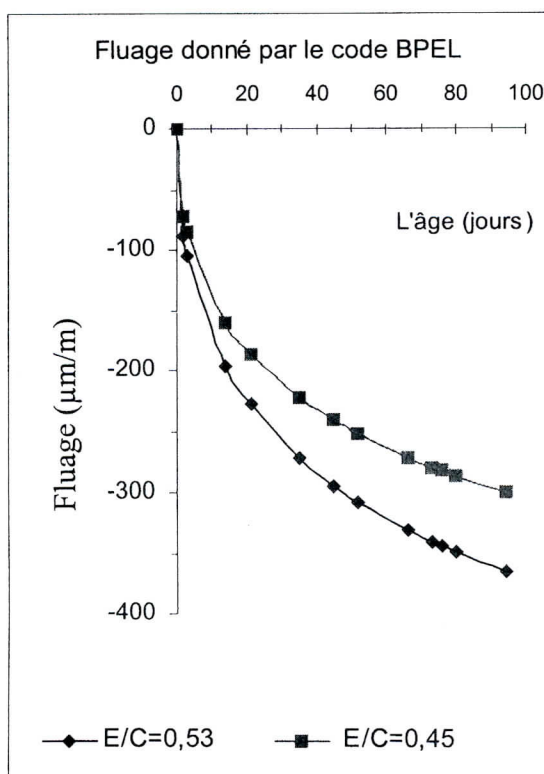
Les trois codes ACI et BPEL et ECO2 donnent comparable aux résultats expérimentaux. D'après les figures (4-36) on constate que le ACI donne une importance au rapport E/C, car la différence de fluage égale 270 $\mu\text{m/m}$ lorsque le rapport E/C vari de 0,45 à 0,53 ce qui présente la plus proche différence de fluage entre les deux bétons par rapport au différence mesurée.



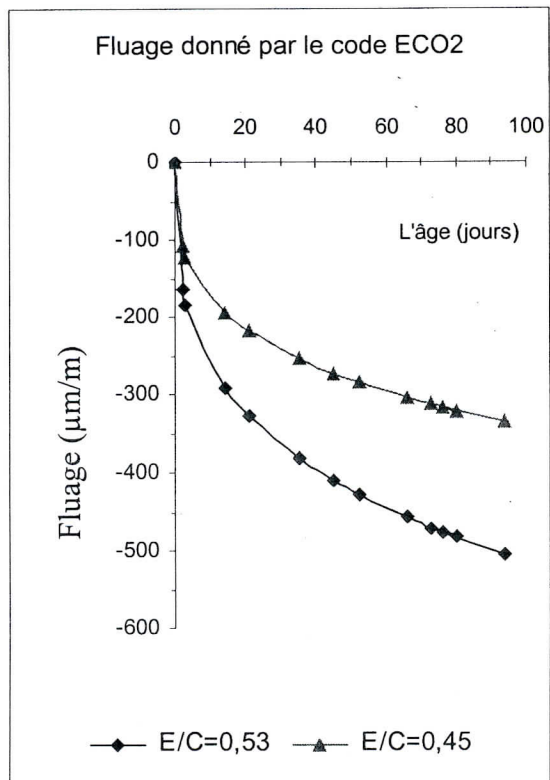
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 3-36: Résultats des fluages mesurés et calculés sous l'effet de rapport G/S

(a) : Expérimentaux, (b) : Code ACI, (c) : Code BPEL, (d) : Code ECO2.

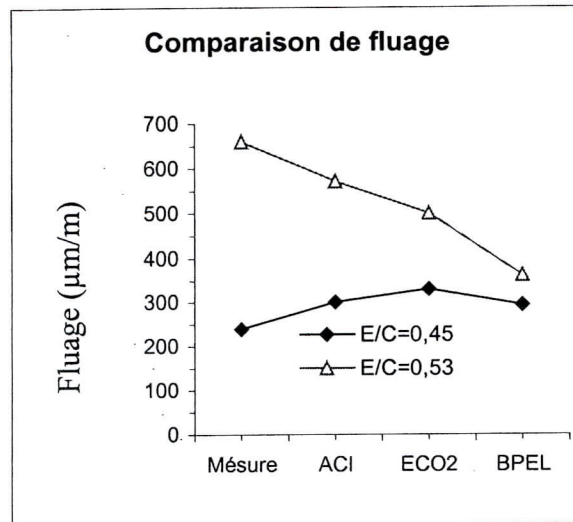


Figure 3-37: Comparaison de fluage sous l'effet de rapport E/C

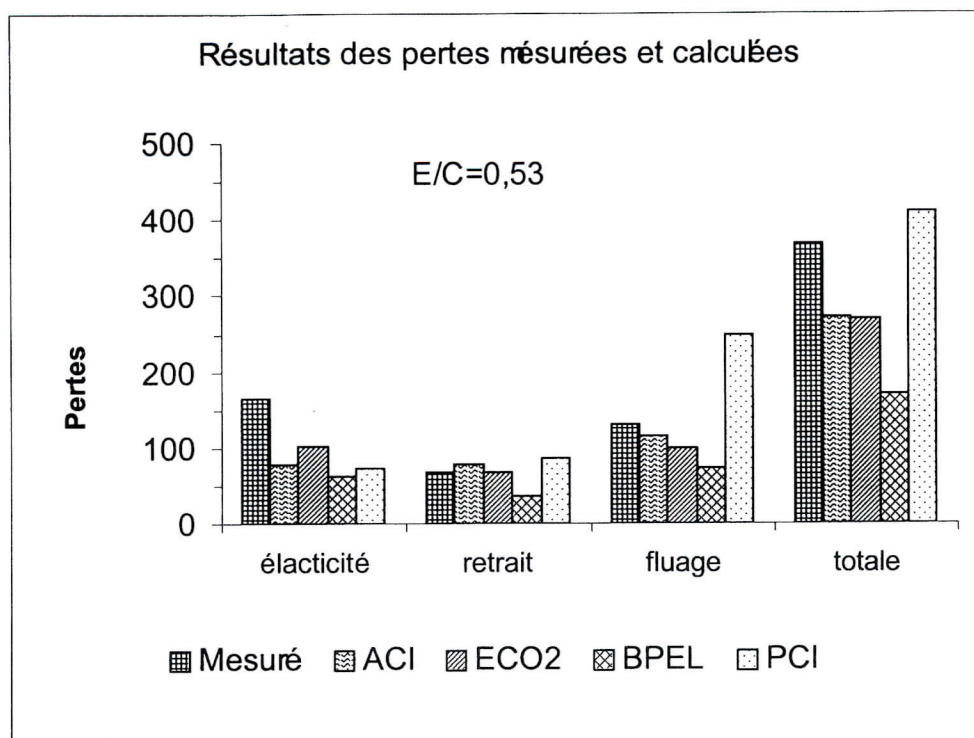
Lorsque $E/C=0,45$ le fluage calculé est supérieur au fluage mesuré par 60 $\mu\text{m/m}$ (25%), alors que le fluage calculé est inférieur au fluage mesuré par 90 $\mu\text{m/m}$ (13,6%) pour un $E/C=0,53$. La bonne estimation du fluage par le code ACI est probablement due à la prise en compte de ce code de l'affaissement de béton qui dépend du rapport E/C.

La différence de fluage calculée par le code ECO2 est d'environ 60% de la différence mesurée expérimentalement. Le code ECO2 sur estime le fluage par 25% pour $E/C=0,45$ et le sous estimé de 24% lorsque $E/C=0,53$.

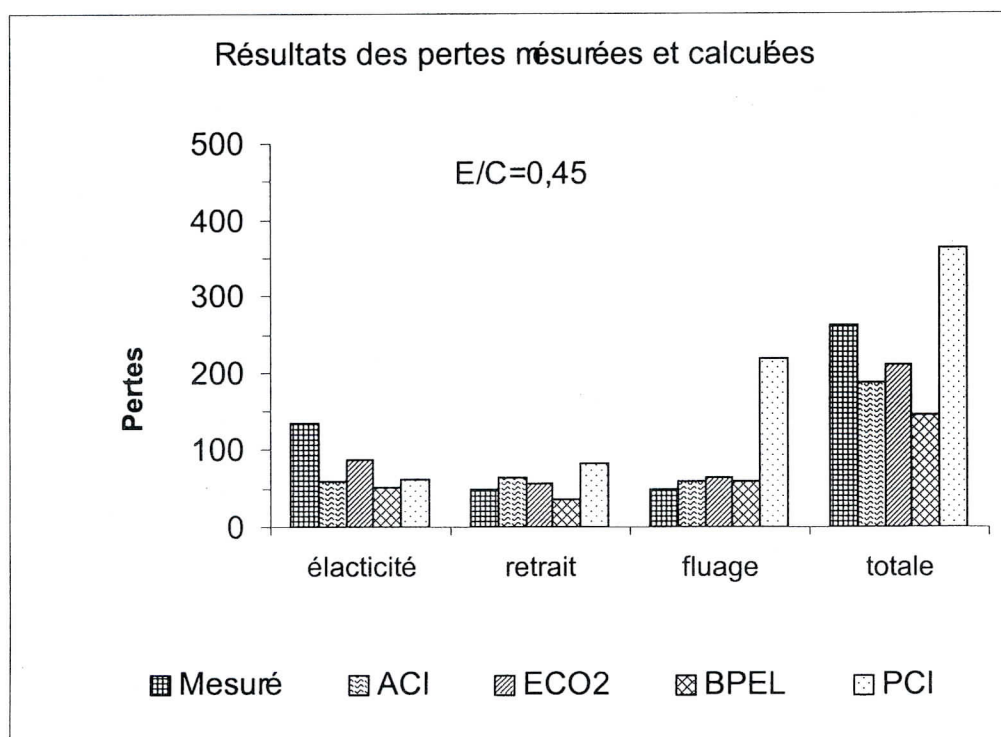
La différence de fluage calculée par le code BPEL est très petite (22%) devant la différence mesurée.

iii. Les pertes dues au retrait et au fluage:

Le rapport Eau/Ciment représente un coefficient très important dans la composition du béton, car il influe directement sur les différentes caractéristiques du béton. Les résultats des pertes (figures 3-38 ; 3-39) montre que le rapport E/C joue un rôle très important sur la grandeur des pertes par fluage calculée par les codes ECO2 et ACI. Les pertes de fluage mesurées augmentent de 70 MPa à 130 MPa lorsque le rapport E/C aligné de 0,45 à 0,53.



(a)



(b)

Figure 3-38 : Les pertes calculées par les codes et par les déformations élastiques sous l'effet du rapport E/C

(a) - E/C=0,53 ; (b) - E/C=0,45

la comparaison entre les différents codes montre que, le ACI donne une meilleure estimation des pertes dues au fluage, et que le ECO2 estime mieux les pertes dues au retrait.

Selon la méthode de PCI le rapport E/C influe sur les pertes dues au raccourcissement élastique, retrait et fluage puisque ces trois déformations basent dans les calculs sur la valeur de module élastique. Cette méthode différencie entre les pertes des deux bétons, sachant que le code ne base pas sur les facteurs qui dépendent de la composition du béton dans l'estimation des pertes, donc la différence des pertes est causée par la différence de module élastique du béton. Cette influence de rapport E/C est claire sur les pertes par fluage de béton. La méthode de PCI estime mieux les pertes totales dues aux raccourcissements élastiques, retrait et le fluage du béton lorsque le rapport E/C est élevé.

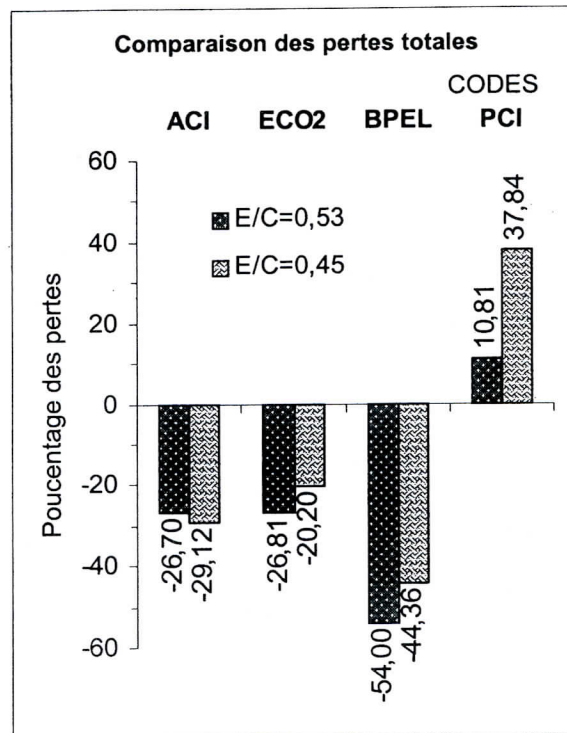


Figure 3-39: Comparaison de pourcentage d'estimation des pertes entre les différents codes sous l'effet de rapport E/C

3.4. DISCUSSION :

A travers les résultats des méthodes dans les deux études on peut conclure que :

- Le code BPEL sous estime les déformations ainsi que les pertes des échantillons de béton testé dans le laboratoire, à cause de l'absence des armatures, il base beaucoup sur l'effet des armatures dans le calcul des pertes, donc d'après ce code les pertes diminuent lorsque le béton contient des armatures. SHOGA, SUGITA, KRENCHER, SWANY [19, 24, 25] sont en concordance avec le code BPEL que l'addition des fibres d'armatures diminue les pertes par retrait, alors que Bissonnette et Pigeon [31] ont constaté que le pourcentage d'armatures augmente les pertes par fluage si le pourcentage des armatures dépasse 1% .

L'ECO2 donne aussi une importance à l'effet des armatures, mais il base sur l'effet des armatures de la précontrainte soit pour les éléments précontraints par post-tension ou par pré-tension, selon l'ECO2 les armatures de la précontrainte influent sur la somme des pertes différées totale au contraire, le BPEL sépare entre les deux types d'armatures (passive et active),

D'après les résultats de l'ECO2 ; et à travers les analyses de deux exemples on peut constater que ce code:

- Estime mieux le fluage surtout lorsque le béton est chargé à jeune âge.
- Estime mieux le fluage et le retrait des bétons confectionnés avec des granulats concassés.
- Estime mieux les pertes dues au retrait et au fluage et la déformation élastique lorsque l'âge de béton au moment de la mise en tension augmente.

La méthode de PCI comme les deux codes européens ne prend pas en considération de l'effet des paramètres liés à la composition du béton, mais elle donne une importance au module élastique du béton au moment de la mise en tension ainsi la période de cure sur les pertes dues au retrait et au fluage, elle estime mieux les pertes dues au raccourcissement élastique, et au retrait et au fluage du béton lorsque le module élastique du béton dépasse 29000 MPa.

D'après le ACI, les paramètres liés à la composition du béton jouent un rôle important sur la grandeur des pertes dues au retrait et au fluage, tel que l'affaissement qui exprime l'effet du rapport E/C, la quantité d'air, le dosage en ciment et le pourcentage des fins granulats. Le code ACI :

- Estime mieux le retrait et le fluage lorsque le rapport G/S est élevé.

- Estime mieux le retrait quelle que soit la forme des granulats (roulés ou concassés),
- Estime mieux le retrait quelle que soit le rapport E/C.

D'après quelque Plusieurs chercheur, le retrait de béton dépend de retrait de la pâte de ciment [53, 54], l'hydratation du ciment [53, 54, 55] et les propriétés d'élasticité de la pâte de ciment et les granulats [56], de l'humidité relative, de rapport E/C [57], le degré d'hydratation [57], et les adjuvants [58], la prise en compte de tous ces facteurs dans les calculs est difficile, c'est a cause de ça qu'on ne trouve pas des méthodes qui tient compte de tous ces facteurs.

Chapitre IV

Analyse des pertes
de la précontrainte
d'un pont

ANALYSE DES PERTES DE LA PRECONTRAINTE D'UN PONT

4.1. GENERALITES:

Une étude a été entreprise dans le Nord du Nevada pour déterminer les pertes de la précontrainte réelle dans un pont sur 30 mois, ils ont trouvé que les pertes dues au retrait et au fluage observées sur le pont était au moins 30% que celles estimées par la méthode du pas du temps, et plus de 60% plus grandes que les pertes prédites par L'ASHTO-1992 (Association Américaine des fonctionnaires du transport de l'autoroute du l'état), a cause de cette grande différence entre les pertes réelles et mesurées, il à été décidé [63] d'entreprendre une étude semblable dans le sud de Nevada en juin 1992.

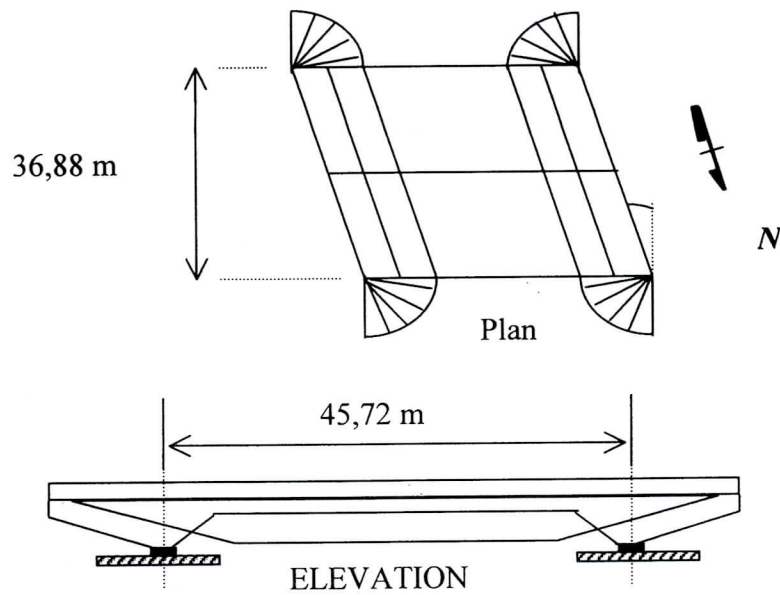
Il semble que la grandeur des pertes est liées à l'humidité relative faible, les résultats des pertes réalisées sur le pont sont composés.

On s'intéresse dans cette étude aux pertes mesurées expérimentalement afin de les comparer aux pertes estimées par les quatre codes (ACI-92, PCI-75, BPEL-91, ECO2-92).

4.2. DESCRIPTION DU PONT:

Il s'agit d'un pont « Greenway » simplement appuyé, post tensionné, assemble de plusieurs poutres (en caissons) biais de 18° (la figure 4-1). L'épaisseur entre les cellules est 200,5 cm à mi-travée. Chaque poutre contient deux gaines de 100 mm de diamètre qui contiennent 19 torons, et une autre de 113 mm contient 26 ou 27 torons selon la position de la poutre. Une autre gaine contient deux torons installés spécialement pour ce projet, le total des torons est 906.

Figure 4- 1 : plan
et élévation du
pont [63]



Les armatures sont placées dans un profil parabolique avec une excentricité à mi-travée égale à 87 cm, comme il est schématisé sur la figure (4-2).

Les armatures utilisées sont de 15 mm de diamètre de basse relaxation (2,7%), et de module élastique de 193000 MPa. Chaque toron est composé de 7 fils tréfilés à froid. La contrainte ultime des aciers est 1933 MPa, et la contrainte appliquée au moment de la mise en charge est de 1362 MPa. Un trou d'accès a été fourni au fond de la poutre à la fin du sud Est du pont et un autre a été placé dans le bloc du sommet près du centre du pont pour tenir compte d'accès dans les cellules extérieures.

Trois jauges électriques ont été liées à trois fils différents sur chaque câble, pour un total de 12 jauges. Et un système d'acquisition des données type « Optime Mégadac 2210C » a été utilisé, ce système rassemble et développe les données de la tension.

Quatre jauges mécaniques avec une sensibilité de 0,0025 mm ont été posées à l'intérieur de la cellule sur les tissus de la poutre sur une longueur de 762 mm.

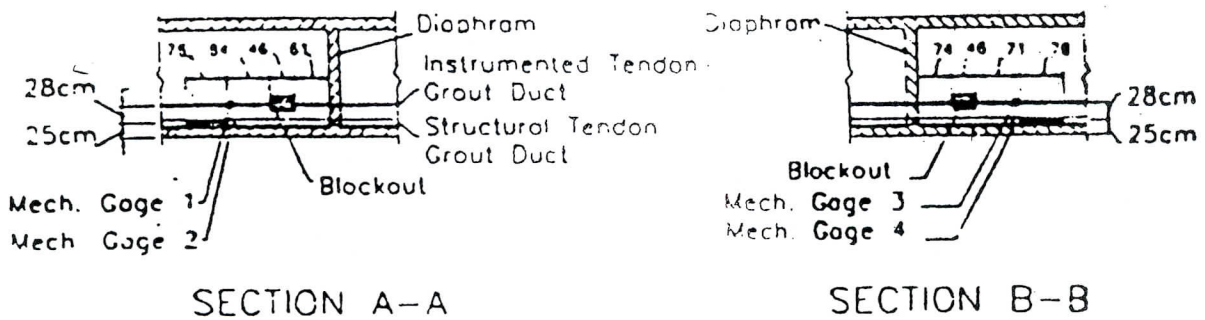
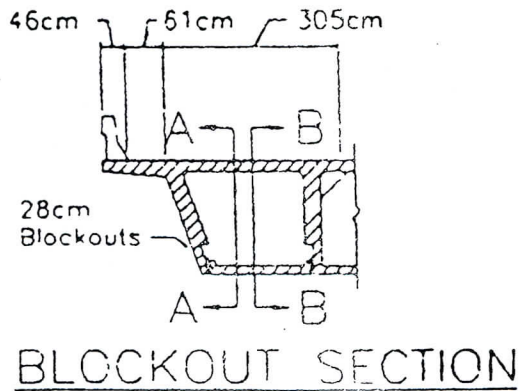
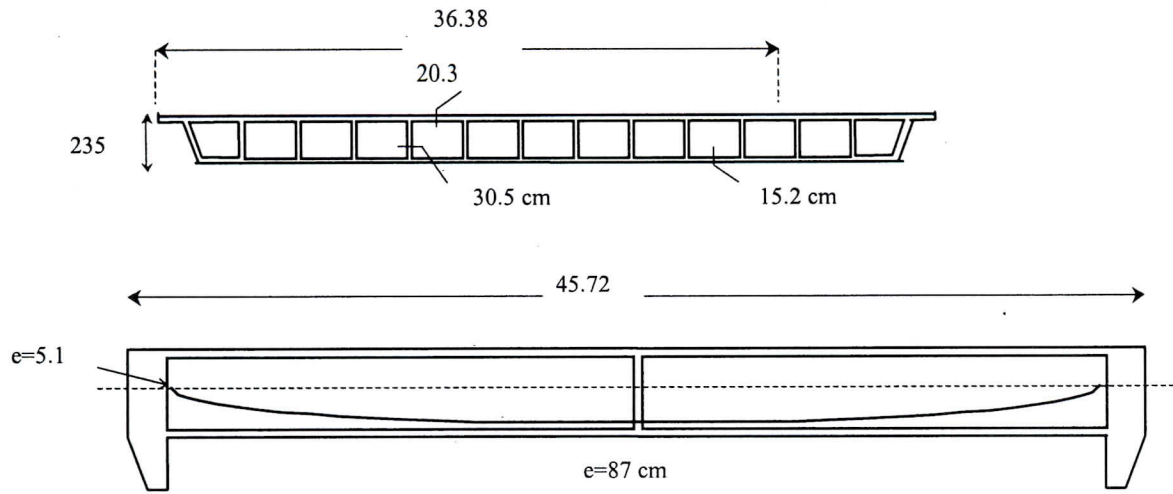


Figure 4- 2: les détails de la section transversale du pont et des emplacements de la jauge de tension mécanique.

• **les Caractéristiques du pont:**

Les caractéristiques du pont sont :

Affaissement = 89 mm.

Agrégats fins /total des agrégats = 36,6%

Dosage en ciment =335 kg/m³

Quantité d'air =6,25%

$\rho=2500$ Kg/m³

HR=25%

T₀=43 jours (cure humide)

Volume/surface = 121,64 mm

$f_{c28}=28,3$ Mpa Résistance de compression du béton à l'age de 28 jours

$f_{c43}=37,4$ M Résistance de compression du béton à l'age de 43 jours

$A_c= 16752,5$ cm²

$I_c = 3,7523368. 10^8$ (moment d'inertie de la poutre)

$A_p= 114.885$ cm².

$e = 87$ cm (l'excentricité à mi-travée)

$\sigma_0 = 1362$ MPa (la contrainte initiale)

$\sigma_i = 1288$ MPa (la contrainte après la soustraction des pertes instantanées, elle représente la contrainte initiale pour les pertes différées)

4.3. PROGRAMME DE MESURE:

Les mesures ont été prises en petits intervals de temps immédiatement après la mise en précontrainte. Le programme des mesures était comme suit :-

- Chaque jour pour la première semaine.
- A la fin de deux semaines.
- A la fin d'un mois.
- Sur des intervalles d'un mois à travers les premiers 6 mois.
- Sur des intervalles de deux mois à travers les premiers 18 mois.

Pour chaque jour de la collection des données, les mesures ont été prises par des jauges pour une période de 24 heures afin de faire la moyenne pendant les jours comptés (les jours d'observation).

Les données de la jauge électrique indiquent les pertes totales dues au retrait et au fluage, mais n'incluent pas l'effet de la relaxation, parce que les pertes par relaxation sont des changements dans la contrainte sous une tension constante [63].

Les jauges ont été attachées aux fils, la direction de chaque fil est approximativement 10° relatif à l'axe de l'acier. Les moyennes des tensions mesurées ont été amplifiées par un facteur de 1,04. Ce facteur a été déterminé dans le laboratoire sur la base que les aciers qui ont été instrumentés dans le pont de la même façon que ceux testés dans le laboratoire.

Les données des mesures moyennes sont groupées dans la figure 4-3 :

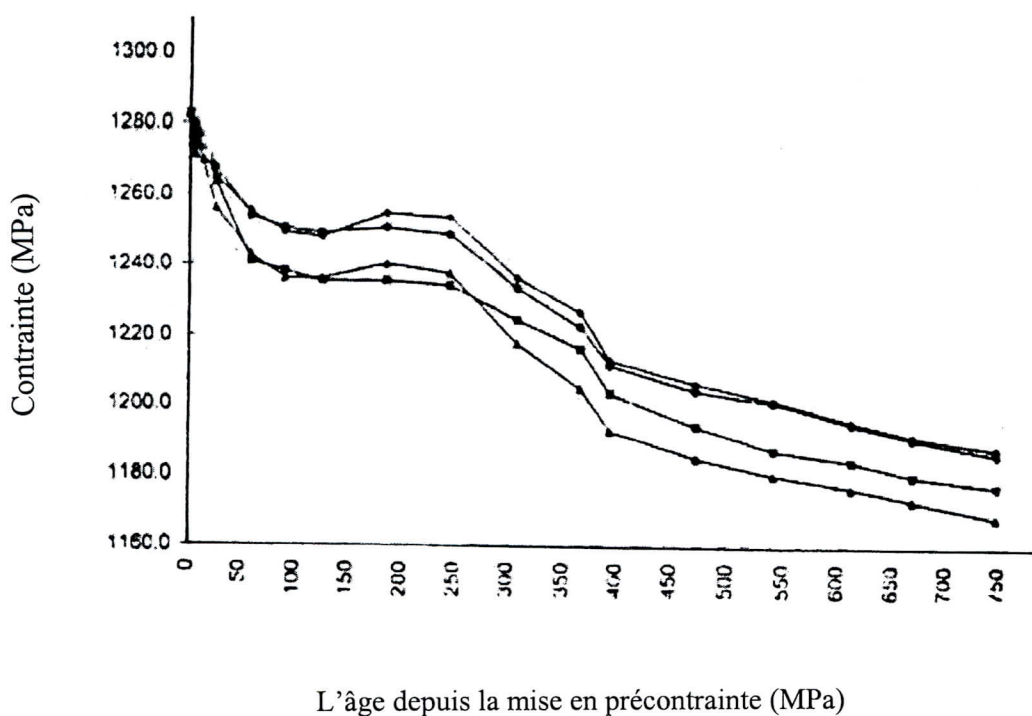


Figure 4- 3 : La variation de la contrainte dans les armatures de la précontrainte mesurée par des jauges Mécaniques [63]

D'après les résultats on constate que :

Le taux de la perte de la précontrainte était relativement haut pendant le premier mois, de 100 jours à 250 jours (novembre – avril) , aucune perte additionnelle considérable n'est produite. Pendant cet intervalle l'humidité relative variée de 31 à 55%. Pendant les six mois subséquents, l'humidité a diminué jusqu'à 16 – 23%, cette diminution d'humidité mène au rétrécissement de béton et des pertes de la précontrainte plus visibles (figure 4- 3). Pour le reste du projet, où l'humidité relative alignée de 30 à 35%, aucune perte considérable n'a été mesurée.

4.4. ETUDE ANALYTIQUE DES PERTES:

A cause de l'absence des détails des armatures, on n'a pas pu calculer les pertes instantanées (frottement et glissement d'ancrage). les pertes dues à la relaxation des armatures ainsi le retrait et le fluage estimées par les quatre méthodes sont données dans les tableau (4-2 ; 4-4 ; 4-5 ; 4-6). Les pertes mesurées et calculées dues au retrait et au fluage sont données par la figure (4-4).

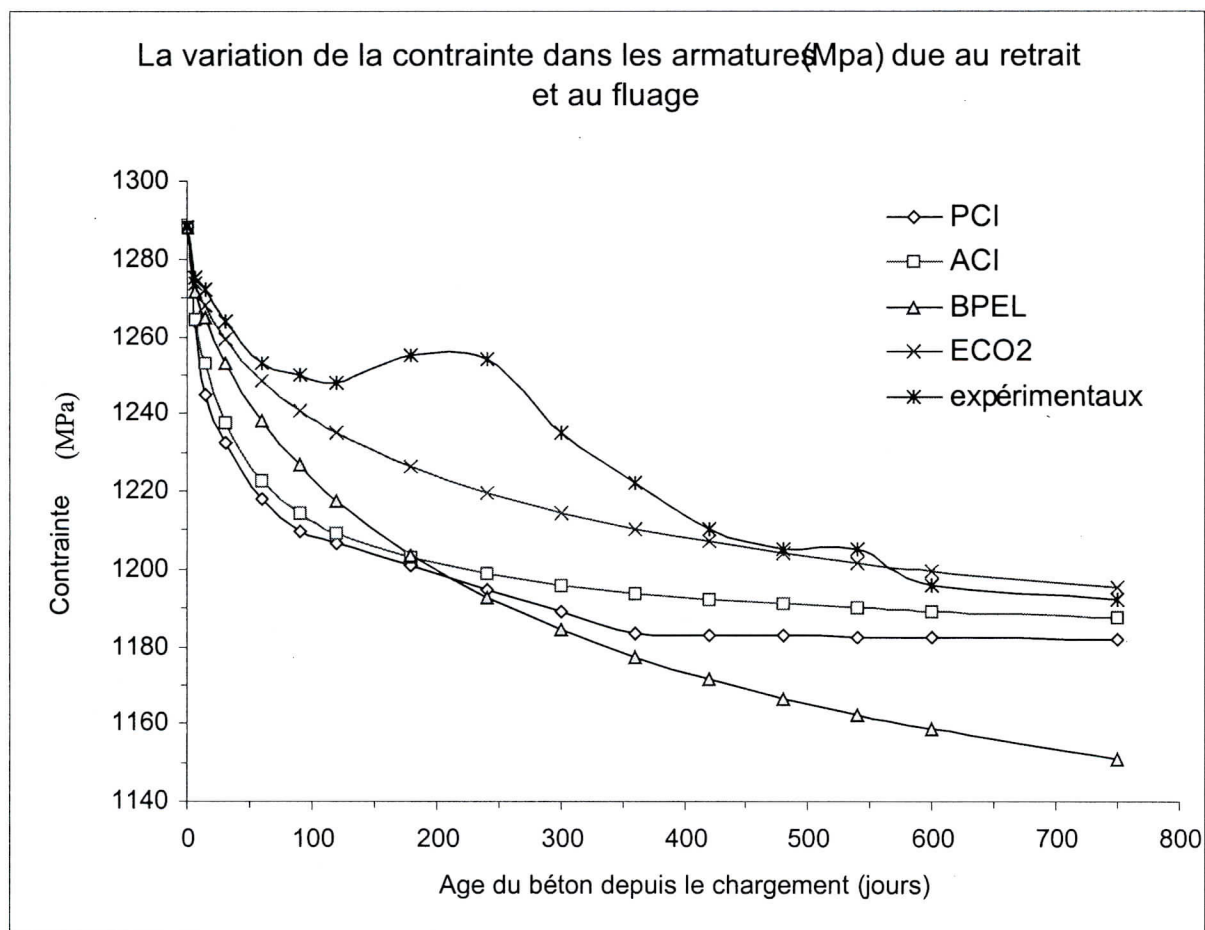


Figure 4- 4 : Comparaison de la variation des précontraintes dans l'acier, mesurées par les jauges et calculées par les méthodes

4.4.1. PCI :

Comparaison avec les autres méthodes, la méthode PCI est simple, elle contient moins des facteurs qui sont représentés par des tableaux.

L'âge de la mise en charge et la fin de la période maximal compté par cette méthode est 40 jours, alors que pour notre cas le pont a été précontraint à l'âge de 43 jours, donc on a utilisé dans les calculs des pertes 40 jours.

En plus cette méthode ne prend pas l'effet de l'humidité sur les pertes (voir paragraphes III-1-2 et III-1-3-2), elle base sur l'âge de béton au moment de la mise en charge et la période de la cure ainsi le module d'élasticité du béton. Mais la question qui se pose : Si on a deux poutres de mêmes caractéristiques la seule différence se trouve dans la composition du béton de telle sorte qu'on aura le même module élastique aux moments de la mise en tension. Est-ce qu'on aura les mêmes pertes ? Selon la méthode PCI la réponse est oui. Mais d'un autre côté peut être les paramètres qui dépendent de la composition du béton ainsi les conditions hygrométriques sont incluses dans le module élastique puisque ce dernier eux même est influencé par ces paramètres. A travers les résultats de calcul on constate que dans les premiers jours les pertes augmentent rapidement jusqu'à 350 jours où la cinétique des pertes diminue beaucoup. A l'âge de 750 jours les pertes calculées représentent 10,5 % des pertes mesurées.

Tableau 4-1 : Les facteurs de la méthode de PCI.

Facteurs	Valeurs	
	Retrait	Fluage
- Pertes Ultimes	99,3 MPa	11 MPa
- Volume/Surface	0,70	0,70
- Age de la mise en tension et la période de la cure	0,60	-

Tableau 4-2: les pertes calculées par la méthode de PCI.

t1	t2	USH*SSF	PSH	SH	UCR*SCF*MCF*fc	PCR	CR	RE	DF	σ_i
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1288
7	0	69,51	0,22	15,292	38,531	0,23	8,862	12,12	36,279	1251,721
14	7	69,51	0,086	5,9779	35,594	0,034	1,210	1,419	8,607	1243,114
30	14	69,51	0,114	7,9241	35,349	0,086	3,04	1,505	12,469	1230,645
60	30	69,51	0,13	9,0363	34,995	0,1	3,499	1,296	13,831	1216,814
90	60	69,51	0,07	4,8657	34,601	0,06	2,076	0,712	7,653	1209,160
120	90	69,51	0,02	1,3902	34,384	0,033	1,134	0,487	3,012	1206,148
180	120	69,51	0,04	2,7804	34,298	0,067	2,290	0,676	5,755	1200,394
240	180	69,51	0,058	4,0316	34,135	0,042	1,43	0,467	5,932	1194,462
300	240	69,51	0,058	4,0316	33,966	0,042	1,426	0,351	5,810	1188,652
360	300	69,51	0,058	4,0316	33,801	0,042	1,419	0,279	5,730	1182,922
420	360	69,51	0,0002	0,0139	33,638	0,001	0,033	0,229	0,276	1182,646
480	420	69,51	0,0002	0,0139	33,630	0,001	0,033	0,198	0,245	1182,401
540	480	69,51	0,0002	0,0139	33,623	0,001	0,033	0,174	0,222	1182,179
600	540	69,51	0,0002	0,0139	33,617	0,001	0,033	0,156	0,203	1181,976
750	600	69,51	0,0002	0,0139	33,611	0,001	0,033	0,329	0,377	1181,599

DF : pertes différées totales

RE : pertes par relaxation.

CR : pertes par fluage.

SH : pertes par retrait.

σ_i : la contrainte dans l'acier.

4.4.2. ACI :

La méthode de ACI prend en compte huit facteurs dans l'estimation du retrait et du fluage (tableau 4-3). La valeur minimale de l'humidité acceptée dans la méthode de ACI est de 40%, alors que dans notre cas HR est de 25%, il n'y a pas une grande différence de la contrainte dans l'acier entre les deux méthodes ACI et PCI. La valeur des pertes calculées par cette méthode représente une bonne estimation (+5%).

Tableau 4-3: les facteurs de la méthode de ACI

Facteurs	valeurs	
	Fluage	Retrait
- L'âge de chargement	0,802	—
- Humidité relative	1,10	1,15
- Rapport de Volume/Surface	0,723	0,675
- Affaissement	1,06	1,03
- pourcentage de granulats fins	0,975	0,854
- Quantité d'air	1,0	1,0
- période de la cure	—	0,833
- Dosage en ciment	—	0,953

Tableau 4-4: les pertes calculées par la méthode de ACI.

t1	ϵ_{sh}	SH	ϵ_{cr}	CR	RE	DF	σ_i
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1288,000
7	54,600	8,032	0,332	15,767	22,828	46,627	1241,373
14	93,600	13,769	0,447	21,234	22,514	57,518	1230,482
30	151,200	22,243	0,594	28,191	22,082	72,516	1215,484
60	206,905	30,438	0,735	34,902	21,664	87,004	1200,996
90	235,872	34,699	0,816	38,766	21,437	94,902	1193,098
120	253,626	37,311	0,872	41,404	21,290	100,005	1187,995
180	274,270	40,348	0,946	44,908	21,107	106,362	1181,638
240	285,905	42,060	0,994	47,207	20,994	110,261	1177,739
300	293,373	43,158	1,029	48,871	20,917	112,946	1175,054
360	298,572	43,923	1,056	50,150	20,860	114,933	1173,067
420	302,400	44,486	1,078	51,173	20,815	116,475	1171,525
480	305,336	44,918	1,095	52,016	20,780	117,714	1170,286
540	307,659	45,260	1,110	52,727	20,750	118,737	1169,263
600	309,543	45,537	1,123	53,337	20,725	119,599	1168,401
750	312,994	46,044	1,149	54,548	20,677	121,270	1166,730

DF : pertes différées totales

RE : pertes par relaxation.

CR : pertes par fluage.

SH : pertes par retrait.

σ_i : la contrainte dans l'acier.

ϵ_{sh} : retrait.

ϵ_{cr} : fluage.

4.4.3. BPEL:

D'après le graphe 4-4, on constate que les pertes calculées par la méthode de BPEL sont plus élevées par rapport aux pertes mesurées. De 14 jours à 180 jours, la contrainte dans l'acier calculée par cette méthode représente la valeur moyenne, elle est supérieure à celle calculée par les deux codes ACI et PCI, et inférieure de celle estimée par le code ECO2 et la contrainte mesurée. A l'âge de 180 jours les trois méthodes (BPEL, ACI, PCI) donnent la même contrainte dans l'acier de la précontrainte. A cet âge, la différence entre la méthode de BPEL et les deux autres méthodes augmente plus de 40% par rapport aux résultats mesurés à l'âge de 750 jours.

Comparativement avec les codes américains, les codes européens ne tiennent pas de l'effet de pourcentage des armatures sur les pertes de la précontraintes. Le code BPEL

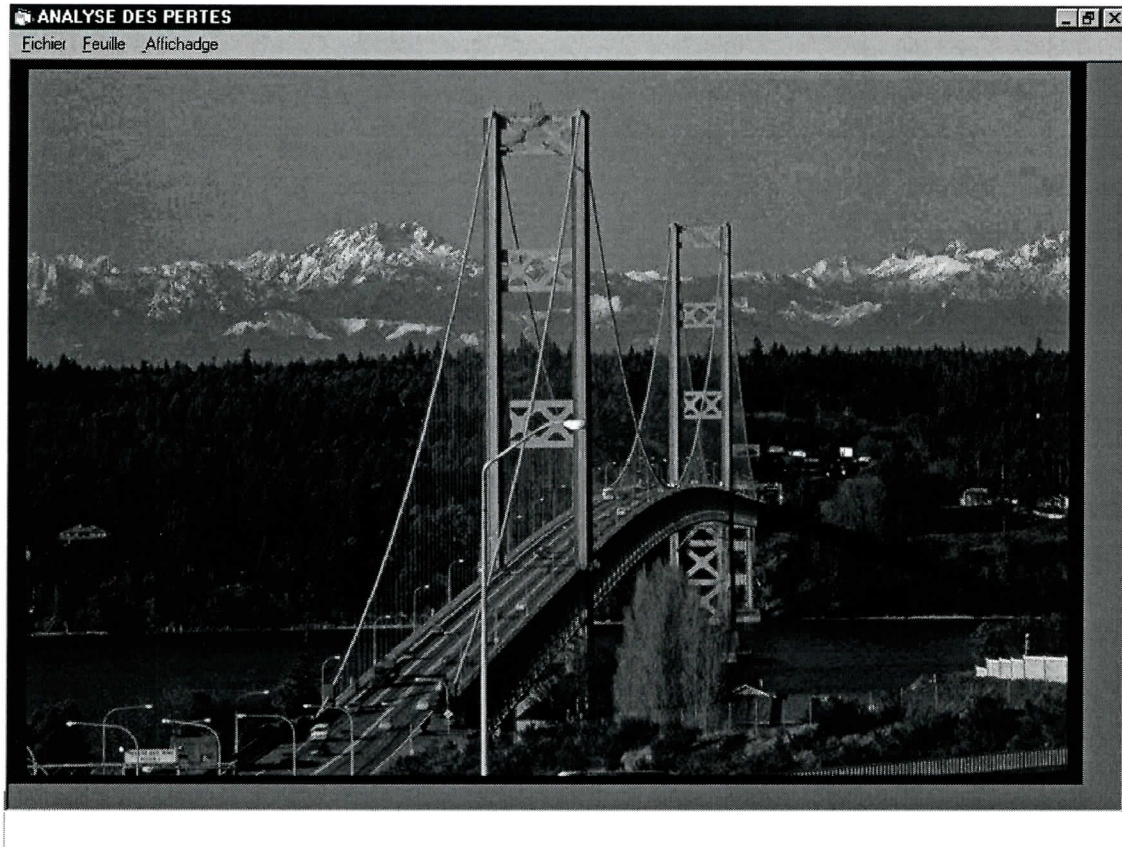


Figure 5-3 : La fenêtre principale du logiciel Analyse des pertes

5.3.1. Saisie des Données :

Avec un seul click sur le menu 'Nouveau fichier' le programme répond en affichant la première feuille de saisie des données, nommé « *Les caractéristiques de la poutre* » comme sans nom dit cette feuille est destinée pour la saisie des données liées aux caractéristiques de la poutre, elle regroupe :

- 1) Les champs pour la saisie.
- 2) Des boutons d'option :

Ils ont utilisé en groupe autoriser, le choix d'une option parmi d'autres possible.

Ces boutons rendent le programme plus flexible. La définition de la procédure de la précontrainte se fait en sélectionnant une option choisie.

- 3) Un contrôle combo box :

Il définit à l'utilisateur les types de la relaxation des armatures de la précontrainte. Le choix se fait par un seul click sur le type de la relaxation correspond.

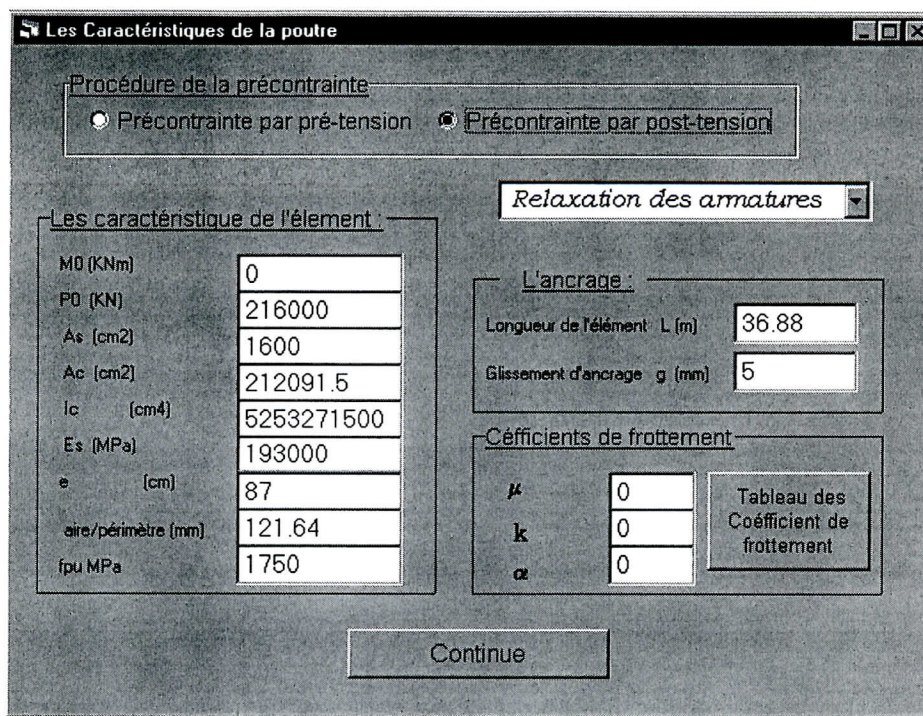


Figure 5-4 : La première fenêtre de saisie des données du logiciel Analyse des pertes

4) Deux boutons de commande :

- Le premier concerne les coefficients de frottement, lorsque l'utilisateur click sur ce bouton, une feuille apparaît contient un tableau des coefficients de frottement selon le code ACI.

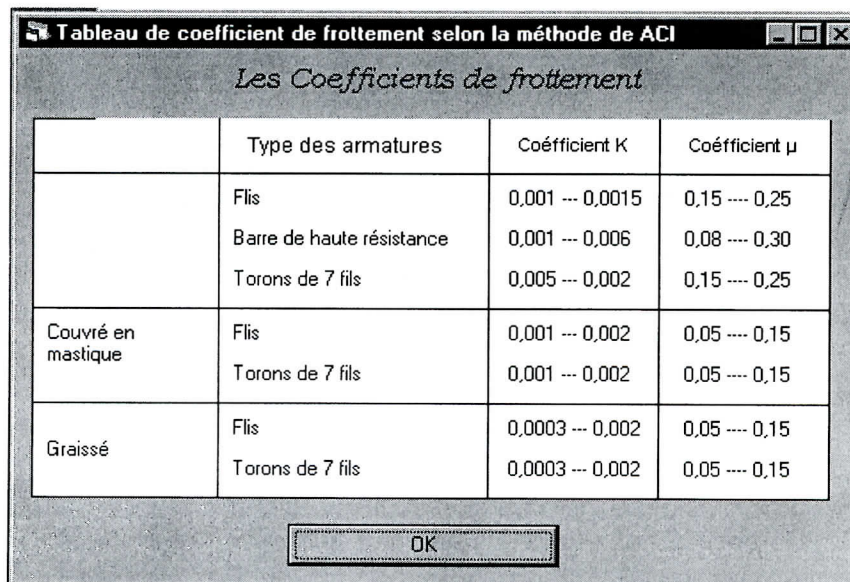


Figure 5-5 : La fenêtre des coefficients de frottement

- Le deuxième bouton conduit à une autre feuille de saisie nommé « *Les caractéristiques du béton* »

Cette feuille regroupe aussi des champs de saisie et des boutons d'option liés aux caractéristiques du béton tel que ; Le dosage de ciment, l'affaissement la densité du béton, quantité d'air, le rapport des fins granulats sur le total des granulats, et la contrainte caractéristique à l'âge de 28 jours.

Les conditions d'environnement

Type de la cure
 Cure humide
 Cure sec

La période de la cure t' (jours): 43
 L'humidité relative HR (%): 25
 La température (°C): 20

Les Caractéristique de béton

Contrainte caractéristique de béton à 28 jours " f_{cy1} 28" (MPa): 28.3
 L'affaissement de béton: 89
 La densité: 2500
 fines agregats (kg/m³) (%): 36.6
 totales agregats (kg/m³):
 Dosage de Ciment (kg/m³): 335
 Quantité d'aire en (%): 6.25

Type de ciment:
 Ciment portlande ordinaire
 Ciment portlande de durcissement rapide

L'âge de Béton

L'âge de béton au moment de la mise en tension (jours): 43
 L'âge de béton à un instant considéré (jours): 50

Calculé

Figure 5-6 : La deuxième fenêtre de saisie des données du logiciel Analyse des pertes

Lorsque l'utilisateur remplit toutes les données, il doit cliquer sur le bouton "calculé" pour l'obtention des résultats de calcul comme elle a représenté ci-dessous :

Cette feuille regroupe les résultats de calcul des pertes et les déformations du béton.

Elle contient deux onglets : "Diagramme" et "Pertes de la précontrainte"

Après la sélection de l'onglet "Diagramme", vous pouvez voir deux autres onglets le premier pour l'affichage des résultats des déformations du béton dans un tableau, et le deuxième affiche le diagramme des déformations totales du béton.

Lorsque l'utilisateur fait un click sur l'onglet "Pertes de la précontrainte" trois autres onglets apparaissent, le premier pour l'affichage des valeurs des pertes dans un tableau, le deuxième

donne le diagramme des pertes de la précontrainte dans les armatures, et le troisième affiche un diagramme qui représente la variation de la contrainte dans les armatures comme il est représenté dans la figure ci-dessous :

Les Résultats de calcul

DEFORMATION

PERTES DE LA PRECONTRAINTÉ

Tableau des résultats Diagramme des pertes de la précontrainte Variation de la contrainte dans les armatures

t (jours)	Retrait (SH)	Fluage (CR)	Relaxation(RE)	SH+CR+RE	SH+CR+RE+	Contrainte dans
128	24,48621	67,52174	17,55702	109,565	196,7179855	1170,839
129	24,56954	67,56335	17,56481	109,6977	196,8507160	1170,714
130	24,6515	67,60439	17,57259	109,8285	196,9815013	1170,591
131	24,73213	67,64488	17,58038	109,9574	197,1104074	1170,47
132	24,81146	67,68481	17,58816	110,0844	197,2374499	1170,351
133	24,88951	67,72421	17,59593	110,2097	197,3626731	1170,233
134	24,96634	67,76306	17,60369	110,3331	197,4861078	1170,118
135	25,04194	67,80141	17,61146	110,4548	197,6078271	1170,004
136	25,11637	67,83923	17,61921	110,5748	197,7278265	1169,891
137	25,18965	67,87656	17,62696	110,6932	197,8461761	1169,781
138	25,2618	67,91338	17,63469	110,8099	197,9628893	1169,672
139	25,33284	67,94971	17,64242	110,925	198,0779984	1169,564
140	25,40281	67,98557	17,65014	111,0385	198,1915408	1169,458

Data2

Pertes par raccourcissement élastique = 87,15301937364 Pertes par frottement = 0

Pertes par ancrage = 0 Pertes Instantanée = 87,15301937364

Fin c:\note1

Figure 5-7 : La fenêtre de résultats du logiciel Analyse des pertes

5.3.2. Les boîtes de dialogue de logiciel :

Pendant la saisie et au cours de l'analyse, le logiciel fait les vérifications. Lorsque l'utilisateur fait des erreurs de saisie, des boîtes de dialogue apparaissent sur l'écran contient des messages donnant des informations et des remarques concernant la méthode de saisie.

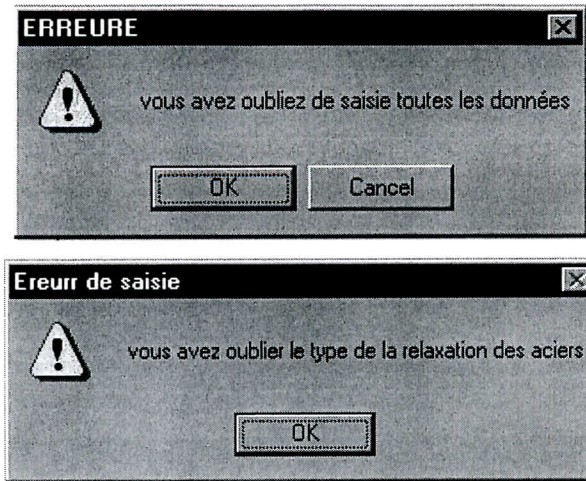


Figure 5-8 : Les boites de dialogue du logiciel Analyse des pertes

5.3.3. Création d'une note de calcul :

Le logiciel « Analyse des pertes » permet la réalisation d'une note de calcul complète qui contient toutes les données et les résultats de calcul. Pour faire cette étape, saisissez le nom de votre fichier dans le champ de la feuille des résultats, puis cliquez sur le menu "note de calcul" pour que le logiciel exécute le programme d'affichage de la note de calcul. Pour visualiser la note de calcul cliquez sur le menu "visualisé la note de calcul"

Lorsque vous voulez terminer le calcul cliquez sur le menu quittez.

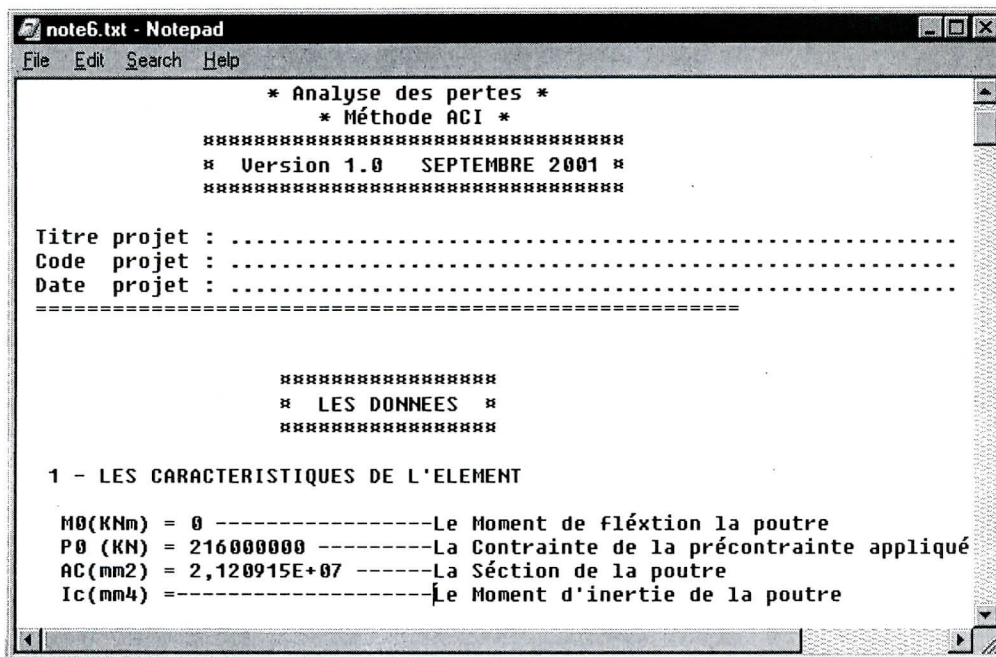
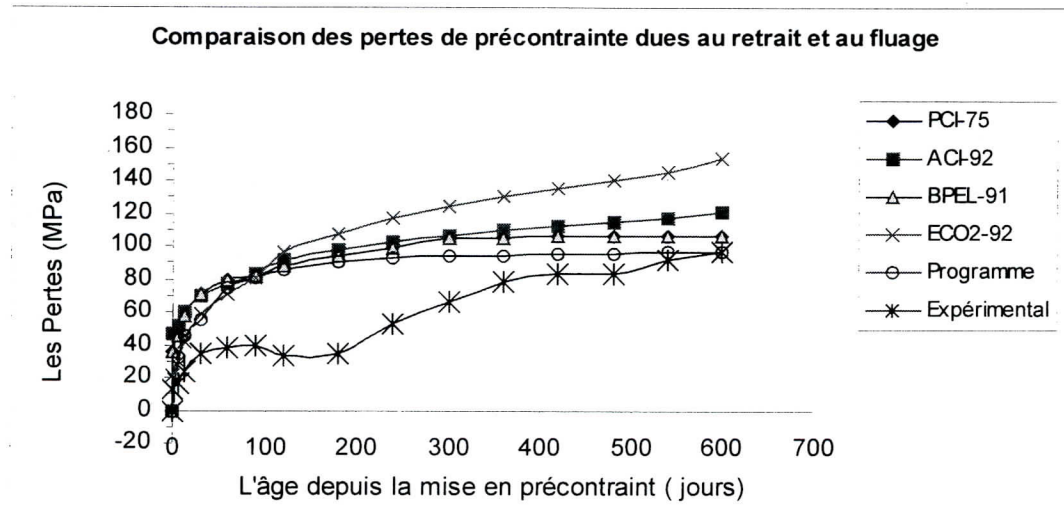


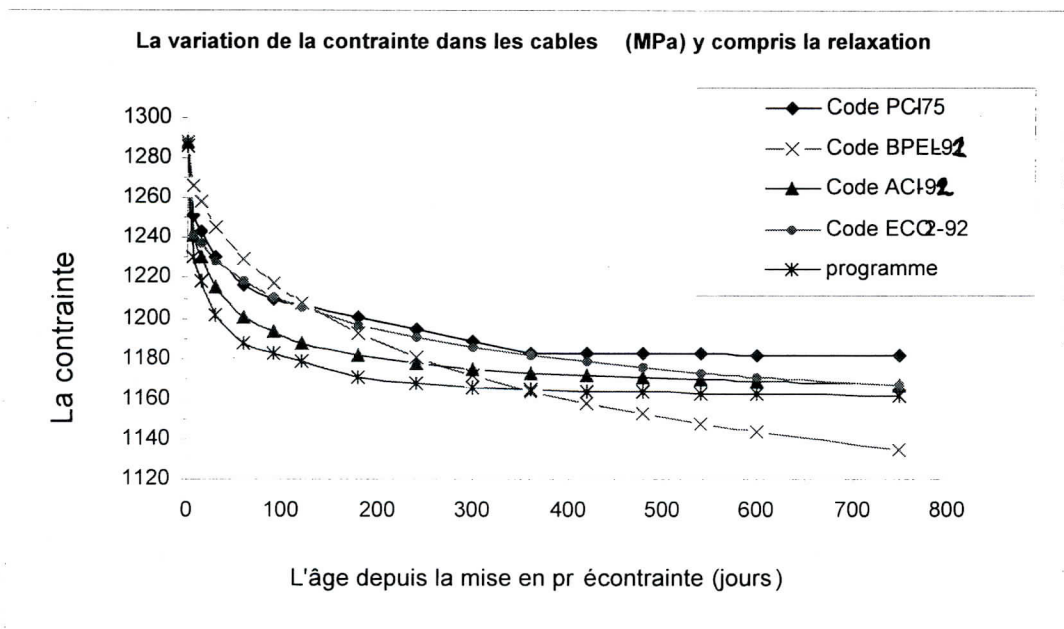
Figure 5-9 : L'affichage de la note de calcul de logiciel Analyse des pertes

5.3.4. Comparaison des résultats de programme :

On prend les données du chapitre 4 et on détermine les pertes totales dans les 600 jours de la mise en tension. Et puis on fait une comparaison entre les résultats du programme et les résultats expérimentaux. Les résultats de calcul sont représentés dans les figures 5-9 (a), (b)



(a)



(b)

Figure 5-10 : Comparaison des résultats de programme :
 (a)- Les pertes dues aux retrait et au fluage,
 (b) – le développement de la contrainte dans les armatures de précontrainte

Lors de l'élaboration du logiciel << ANALYSE DES PERTES >> nous avons donné une grande importance à l'aspect interactif entre l'utilisateur et le logiciel de telle sorte que l'utilisateur puisse exercer ses fonctions autant que décideur, le logiciel donne la possibilité à l'utilisateur d'intervenir à chaque étape de calcul et ce lui affichant sur écran les différents messages et menus à travers lesquelles il peut décider sur le cheminement du programme. Ce programme offre à l'ingénieur la possibilité de déterminer les pertes de la précontrainte avec une estimation de +10%. Les résultats présentés dans les deux figures 2-10 (a et b), nous montre les résultats de programme.

Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

1. GENERALITES :

Ce modeste travail a montré l'importance des pertes différées sur le comportement différé des structures en béton précontraint. Leur prise en compte dans les calculs s'avère indispensable pour une exploitation convenable dont toute sous-estimation peut conduire à des flèches inadmissibles, une redistribution des efforts qui peuvent rendre la structure très faible.

2. CONCLUSIONS GENERALES :

Il paraît que malgré toutes les améliorations apportées dans les méthodes d'estimation des pertes, toutes les méthodes sont approximatives, et ceci est dû probablement par le manque de connaissance fiables sur le développement des pertes différées dues au retrait et au fluage du béton et la relaxation des armatures avec le temps.

L'incertitude dans les résultats est causée par deux points essentiels :

- 1- Des difficultés de tirer et d'exprimer les facteurs influençant qui sont beaucoup plus nombreux que ceux mesurés dans le laboratoire.
- 2- La difficulté de séparer chaque facteur des autres facteurs.

A travers les résultats obtenus dans ce travail on peut conclure que :

- ✦ La méthode de BPEL, quoiqu'elle est très simple à utiliser, néanmoins elle possède certains inconvénients :
 - Elle néglige l'effet de la composition du béton sur le retrait et le fluage.
 - Elle néglige l'effet de la période de cure sur le retrait .

- ✦ La méthode de l'ECO2 elle est plus avantageuse que le BPEL, car elle tient compte de l'effet de la composition du béton par la valeur de la résistance caractéristique à l'âge de 28 jours sur le retrait et le fluage. Elle prend en

considération l'effet de la période de cure dans les premiers mois, tandis qu'à long terme cet effet est négligeable.

- ✦ La méthode de PCI elle donne des mauvaises estimations des pertes dans les deux premiers exemple des cas de laboratoire (+60%), alors que dans l'exemple du pont, a donnée une meilleure estimation les pertes du pont (+5%). Cette méthode donne une importance particulière à l'effet de la période de cure et elle se base sur le module élastique du béton pour le calcul des pertes.
- ✦ L'étude comparative des déformations et des pertes de la précontrainte entre les différentes méthodes nous a permet de voir l'influence des facteurs prises en compte dans le calcul des déformations il semble que la méthode du ACI, donne des estimations acceptable en générale pour les déformations différées ou les pertes quelque soit la composition et les conditions de réalisation du béton, malgré qu'elle ne tient pas compte de l'effet du pourcentage des armatures sur les pertes dues au retrait et au fluage du béton.

A travers les résultats du chapitre 6, on peut dire que la programmation de la méthode de ACI qui base sur le principe pas à pas à donnée des bons résultats que se soit dans l'estimation de déformation ou de retrait.

Lors de l'élaboration du logiciel << ANALYSE DES PERTES >> nous avons donné une grande importance à l'aspect interactif entre l'utilisateur et le logiciel de telle sorte que l'utilisateur puisse exercer ses fonctions autant que décideur, le logiciel donne la possibilité à l'utilisateur d'intervenir à chaque étape de calcul et ce en lui affichant sur écran les différents messages et menus à travers lesquelles il peut décider sur le cheminement du programme. Ce programme offre à l'ingénieur la possibilité de déterminer les pertes de la précontrainte avec une estimation de +10% .

3. RECOMMANDATIONS :

Ce travail reste limité et il serait intéressant dans le futur d'aborder les points suivants :

- Réalisation des essais sur des pertes de précontrainte qui peuvent constituer une base de donnée pour contrôler la validité des modèles existants ou pour développer de nouveaux modèles.
- Etude des pertes des bétons à haute performance
- Etudier l'effet des pertes différées sur les (comportement des structures)
- Etudier l'effet de coulé d'injection sur les pertes dues aux frottements des armatures
- Etudier l'effet des adjuvants sur les pertes totales.

Références bibliographiques

Référence Bibliographique
Référence Bibliographique

- [1] : ACI building code-93 "Prestressed concrete code", 318/318R.
- [2] : "Béton armé et précontraint cours du département génie civil de l'école polytechnique fédérale de LAUSANNE, Berti edition, 1993.
- [3] : **TONIER..H**, "le béton précontraint aux états limites 91", Presse de l'école nationale des pont et chaussées, Paris, édition1992.
- [4] : **Règlement BPEL- 91** "CD RIF "Encyclopédie des règles techniques du bâtiment.
- [5] : **HURST.M.K** "Prestressed Concrete Design", second Edition, 1998, London, USA and Canada.
- [6] : **PERCHAT,J ET CHAUSSIN,R . AFUENTES, LACROIX,R** "La précontrainte", Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris édition 1992.
- [7] : **VENUAT,M** "Ciments et bétons" le point des connaissances actuelles, No 1339. Paris. 1973. 2^{ème} Edition.
- [7] : **DE LARRARD.F** " Concrete mixture proportioning" 1999.
- [8] : **WITTMANN F.H** : "on the action of capillary pressure in fresh concrete" .Cement and concrete, Res 1976- 6.1, pp 49-56.
- [9] : **BARON,J ET PIERE OLLIVIER,J** " La durabilité des bétons", Presses de L'ENPC, FRANCE, 1992.
- [10] : **VEINUAT,M** . " La précontrainte des ciments et des bétons " Editions du Moniteur des travaux publics et du bâtiment,1976.
- [11] : **BAZANT, Z, P ET PANNULA, L**. New model for practical prediction of creep and shrinkage. American Concrete Institute Special Publication. SP-76 (Proc., A. Pauw Symp. Held in Houston 1978), Detroit Mich., pp 7-23, 1982,
- [12] : **NEVILLE,A.M ET BROOKS,J.J** "Concrete Technology", copublished in the united states with John Wiley, Longman group UK limited 1987.
- [13] : **BROOKS,J,J ET AL-QUARRA,H** "Assessment of creep and shrinkage of concrete for the flintshire Bridge", the structural Engineer, volume 77/ No 5, 2 March 1999.
- [14] : **DE LARRARD,F ET BOUSTVIRONNOIS, J.V** "On the long term strength losses of silica fume high strength concrete". Mag, Conc, Res, 43, N° 155, pp 109-119, 1991

Parmi les quatre méthodes, on remarque que la cinétique des pertes calculées par les deux méthodes PCI et ACI est presque égale depuis la mise en tension jusqu'à la fin d'observation.

Tableau 4-6: les pertes calculées par la méthode de ECO2.

t1	ϵ_{sh}	ϵ_{cr}	SH	ϕ_0	CR	RE	DF	σ_i
0	0	0	0,000	0	0,000	0,000	0,000	1288,000
7	8,055E-05	0,0001006	15,547	0,39556	19,425	34,776	46,662	1241,338
14	0,0001132	0,0001233	21,842	0,48469	23,802	33,516	51,130	1236,870
30	0,0001632	0,0001534	31,506	0,60281	29,602	33,395	59,634	1228,366
60	0,0002248	0,0001853	43,391	0,7283	35,765	33,166	69,958	1218,042
90	0,0002685	0,0002056	51,822	0,80806	39,681	32,887	77,139	1210,861
120	0,0003027	0,0002204	58,421	0,86628	42,540	32,693	82,763	1205,237
180	0,0003545	0,0002414	68,420	0,94856	46,581	32,541	91,382	1196,618
240	0,0003929	0,0002558	75,826	1,00549	49,377	32,309	97,635	1190,365
300	0,0004229	0,0002666	81,619	1,04791	51,460	32,140	102,526	1185,474
360	0,0004472	0,0002751	86,311	1,08101	53,085	32,008	106,484	1181,516
420	0,0004674	0,0002818	90,205	1,10767	54,394	31,901	109,767	1178,233
480	0,0004844	0,0002874	93,499	1,12967	55,474	31,812	112,542	1175,458
540	0,0004991	0,0002921	96,325	1,14817	56,383	31,737	114,922	1173,078
600	0,0005118	0,0002962	98,781	1,16395	57,158	31,673	116,989	1171,011
750	0,0005374	0,000304	103,719	1,19493	58,679	31,617	121,207	1166,793

4.5. LES PERTES PAR RELAXATION :

Entre les deux méthodes ACI et PCI la différence n'est que 0,27 MPa. Cette petite différence est causée pas l'influence des pertes par retrait et par fluage, sachant que les deux méthodes utilisent la même équation dans le calcul des pertes par relaxation. Avec la méthode de BPEL ces pertes ne sont pas très éloignées par rapport aux pertes calculées par les deux méthodes PCI et ACI, alors que avec le code ECO2 ces pertes sont sur-estimées de 50% par rapport aux autres méthodes (PCI , ACI), et de 41% par rapport au code BPEL.

les deux figures (4-5) représente le développement des pertes par relaxation des armatures et la figure (4-6) schématise les résultats des pertes différées totales calculées par les différentes méthodes et mesurées expérimentalement.

La sur estimation des pertes par relaxation obtenue par le code ECO2 compense la sous estimation des pertes par retrait et fluage. Les deux sommes des pertes différées calculée par les deux codes ACI et ECO2 sont égaux à l'âge de 750 jours. Cette somme représente la valeur médiane des pertes calculées par les quatre méthodes.

Donc on peut constater que les pertes par relaxation ne pose pas un problème lorsqu'il s'agit des armatures de basse relaxation soit à cours terme ou à long terme.

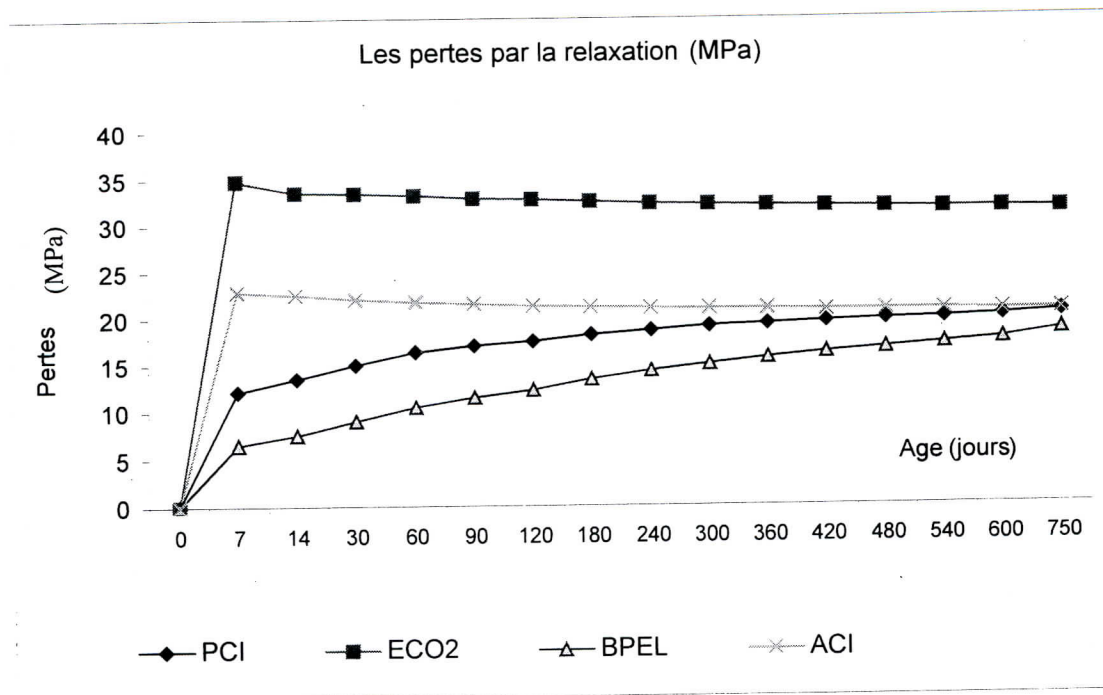


Figure 4-5 : Comparaison des pertes dues à la relaxation des armatures.

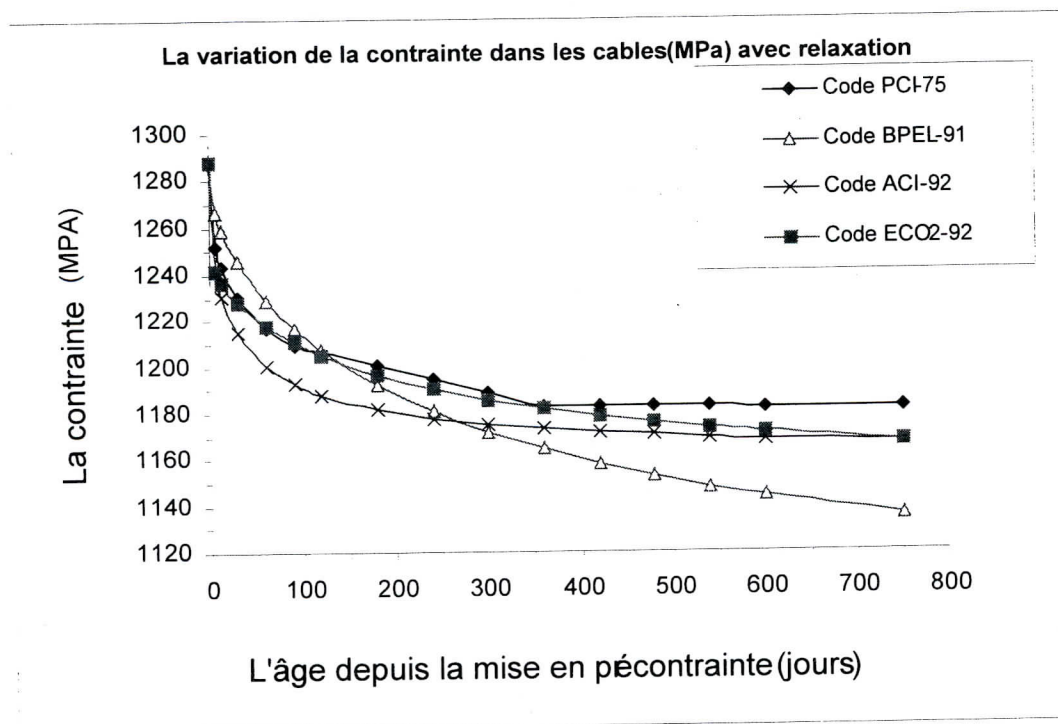


Figure 4-6 : Comparaison des contraintes dans les armatures après les pertes dues au retrait, et au du fluage du béton et la relaxation des armatures.

Chapitre V

Elaboration d'un Logiciel
de calcul des pertes
de précontrainte

ELABORATION D'UN LOGICIEL DE CALCUL DES PERTES DE LA PRECONTRAINT

5.1. INTRODUCTION :

Ce chapitre traite la structure générale du logiciel ainsi réalisé nommé « *Analyse des pertes* ». En commence tout d'abord par la présentation de logiciel de programmation « Visual Basic », puis en présente l'architecture et du contenu du programme de calcul des pertes, puis par le principe de déroulement et d'exécution des programmes et finalement par la création d'une note de calcul.

5.2. LOGICIEL DE PROGRAMMATION « *VISUAL BASIC* » [64, 65]

La construction d'une application se fait avec Visual Basic de façon conviviale, en dessinant l'interface au moyen d'un éditeur graphique.

Le code utilise le langage Basic qui est à la portée de tous. en permettant de créer des applications parfaitement opérationnelles rapidement, après un apprentissage minime (quelques jours) . Ce « miracle » est possible grâce aux deux facteurs qui ont donné leurs noms au produit : la construction *visuelle* d'une application , par le dessin direct des fenêtres et de leurs constituants, et l'utilisation du langage Basic qui est à la portée du plus grand nombre. Plusieurs fenêtres apparaissant autour d'une fenêtre central, donc la barre de titre comprend le texte « feuille ». Cette fenêtre centrale est normalement la fenêtre principale de l'application que vous allez fabriquer. Les fenêtres qui l'entourent sont utilisées pour construire l'application.

Les feuilles et les contrôles qui constituent l'ensemble de l'interface entre l'application et l'utilisateur sont souvent appelés des objets. Le fonctionnement de chacun des objets de Visual Basic n'est en général pas suffisant pour réaliser toutes les tâches d'une application.

La conception d'une application Visual Basic se fait initialement par dessin direct des fenêtres, grâce aux outils de l'environnement intégré.

L'écriture de code en langage Visual Basic permet de donner des instructions complémentaires qui font véritablement fonctionner l'application.

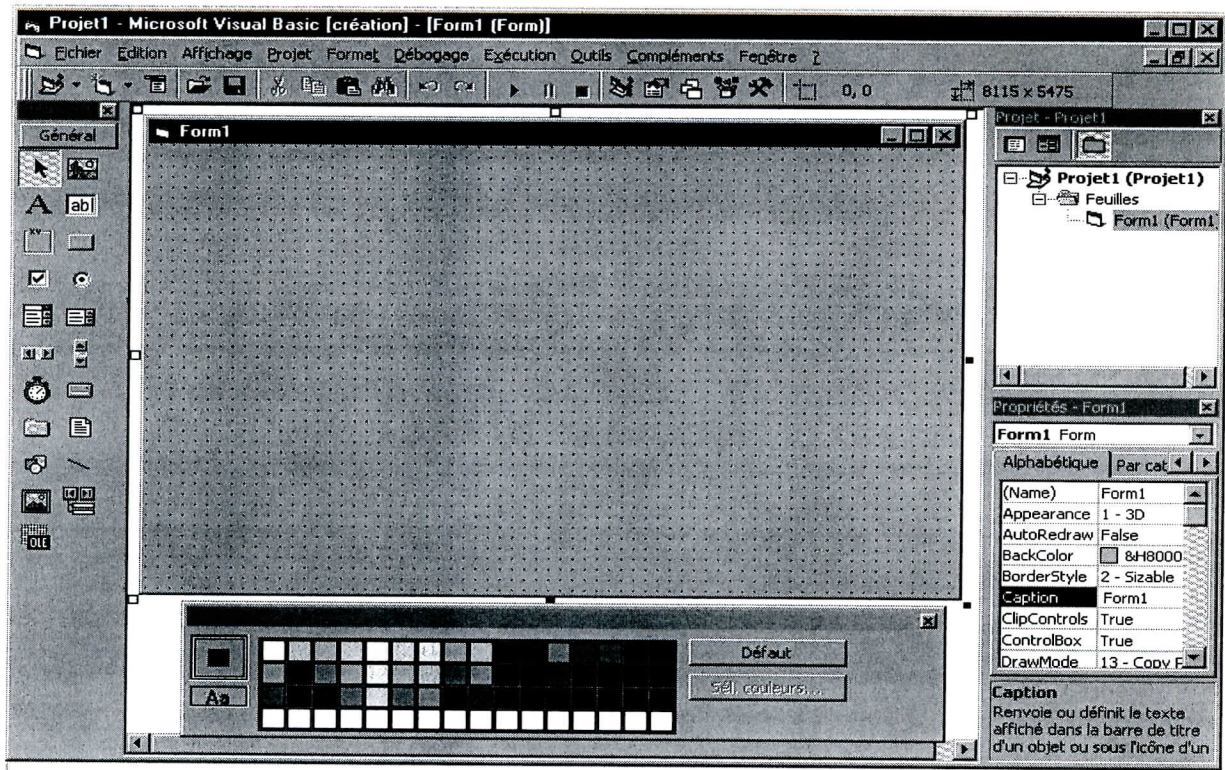


Figure 5-1 : Les fenêtres de Visual Basic

Donc le développement d'une application y passe par les étapes suivantes :

- 1- Dessin de l'interface d'utilisation , c'est -à- dire les fenêtres et leur constituant et cela se fait en plaçant des contrôles sur les feuilles .
- 2- Valorisation initiale des propriétés , à l'aide de la fenêtre des propriétés .
- 3- Ecriture du code en langage Basic, en réponse à des événements .

L'écriture du code ne vient donc qu'après avoir dessiné l'interface , ce qui fait qu'avant même d'écrire une seule ligne de code , il est possible de faire fonctionner l'application .

5.2.1. Dessin de L'interface :

Une application Visual Basic comme la plupart des applications Windows, est constituée de feuilles ou feuilles de travail, qui sont communément appelées fenêtres. On en distingue les fenêtres principales de l'application, les fenêtres secondaires ou les boîtes de dialogue.

5.2.2. Définition des Propriétés :

Chaque objet de Visual Basic , que se soit une feuille ou un contrôle , dispose d'un ensemble de propriétés . Une propriété est un attribut , ou une caractéristique de l'objet . Elle est identifiée par un nom et a une valeur . Par exemple , de nombreux contrôles ont une propriété dont le nom est **VISIBLE** et qui Prend deux valeurs : «true» ou «false» pour faire visualiser ou ne pas visualiser un bouton ou une feuille....

5.2.3. Ecriture du Code:

Si les deux étapes précédentes conduisent au dessin de la présentation de l'application, il ne s'agit là que de la partie visible. L'application peut effectivement fonctionner , mais il ne s'y passe pas grand-chose il est alors nécessaires d'écrire du code afin d'introduire des traitements spécifiques .

Le code est constitué d'instructions utilisant le langage Basic qui se distingue du Basic traditionnel par le faite que le code est exécuté en réponse à des événements.

Un événement peut avoir comme origine l'utilisateur - appui sur une touche du clavier ou action sur la souris par exemple - ou Visual Basic. De plus, un événement concerne toujours un objet, feuille ou contrôle.

5.2.4. Le Contrôle DATA :

Le contrôle de données (Data) et SQL permettent à votre programme d'avoir accès à des bases de données externes du type : Microsoft Access, Dbase , Btrieve , Paradox et FoxPro . Et méthodes du contrôle de données.

Le contrôle des données propose des propriétés et des méthodes qui permettent de gérer la base de données d'une façon quasi-illimitée, en voici quelques-unes.

Les propriétés et les méthodes du contrôle Data permettent d'afficher et de modifier le contenu des champs d'une table. Néanmoins, le contrôle Data offre d'autres fonctionnalités qui vous donnent la possibilité d'effectuer presque toutes les opérations de gestion de base de données dans Visual Basic.

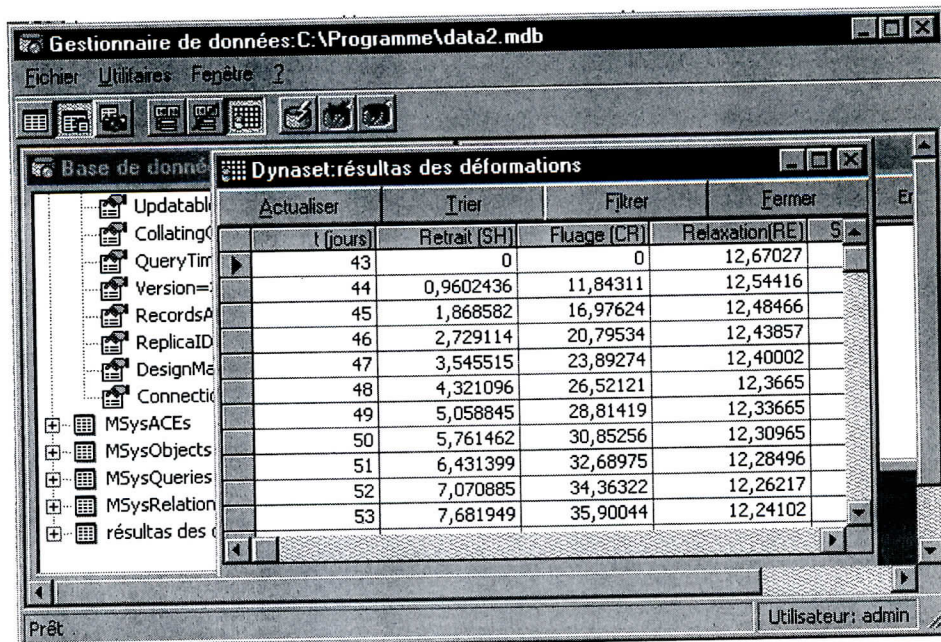


Figure 5-2 : l'ouverture d'une base de donnée.

5.3. LOGICIEL DE CALCUL DES PERTES : « Analyse des pertes » :

Le logiciel « Analyse des pertes » permet de calculer les pertes de la précontrainte, il est destiné aux structures poutre.

Les caractéristiques principales du programme sont les suivantes :

- La possibilité d'effectuer plusieurs calculs sans quitter le programme.
- Les résultats de calcul sont représentés par deux façons :
 - Un tableau qui regroupe toutes les pertes.
 - Deux graphes, l'un représente le développement des pertes dans le temps, et l'autre représente la variation de la contrainte dans les armatures en fonction du temps.
- Le calcul des pertes se fait pas à pas (c'est à dire que vous pouvez voir le développement de la contrainte dans le temps).

Après le lancement du logiciel une fenêtre est affichée comme la majorité des applications Windows, porte le nom du logiciel. Après quelques secondes, cette fenêtre disparaît, et une autre fenêtre apparaît, cette dernière représente la fenêtre principale du programme, elle comporte des menus comme elle a représenté.

Référence Bibliographique

- [15] : **BERTHIER,P,M** "Physique des bétons et des aciers pour ouvrages en béton précontraint " Annales ITBTP No 389, Dec 1980 pp35-66
- [16] : **SHAH, S.P. ET KARAGULER, M.E ET SARIGAPHUTLM** "Effects of shrinkage-reducing admistures on restrained shrinkage cracking of concrete"
- [17] : **SHOYA , M ET SUGITA ,M,**"application of special admixture to reduce shrinkage cracking of Air-dried concrete" .Hachinohe Institute of Techuslogy. Hachinohe .Japon.pp.1-11.
- [18] : **TAMITA ,R ; SIMOYAMA .Y. ET INONE .K,**"properties of Hardened concrete Impregnated with cement shrinkage Reducing Agent " , CAJ Review ,1986.pp.314317.
- [19] : **KOSMATKA,S.H, AND PANARESE ,W.C,** "Design and control of concrete mixtures", Portland Ciment Association, 1988,pp.151-156.
- [20] : **RAMACHANDRAN ,V,S ,** "concrete Admixtures Hand-book-properties" , science and Technology , Noyes Publications ,1984 ,pp.184-191.
- [21] : **GRZYBOWSKI,M ET SHAH.S.P ,**"shrinkage cracking of fiber reinforced concrete
- [22] : **SWAMY,R,N ; AND STAVRIDES,H,**" influence of fiber Reinforcement on Restrained shrinkage and gracking"ACI Journal R..... v.76.NO.3, Mar.1979,pp.443-460.
- [23] : **KOLVER,K ET BENTUR,A** "shrinkage of early age steel fiber reinforced concrete" ,1997, pp 431-439.
- [24] : **DREUX,G ET FESTA,J** "Nouveau guide du béton et de constituents", edituin Eyrolles, 8 ème edition, 1998.
- [25] : **ŠMERDA,Z ET VLADIMIR.** " Creep and shrinkage of concrete elements and structures", Translation © Ing. ProkopMaxa, 1988.
- [26] : **BAZANT,Z.P.** "Mathematical Modeling of creep and shrinkage of concrete". RELEM Committee chairman and symposium chairman A 27 November 1987 Evanston, Illinois, USA.
- [27] : **CEN-FIP.** Model code 90.material properties pp 53-58
- [28] : **TROXELL,G,E ET RAPHAEL,J,M ET DAVIS,R,E.** "long-time creep and shrinkage tests of plain and reinforced concrete .proc. ASTM.55.pp.1101-20 (1958)
- [29] : **L'HERMITE,R.** "Volume changes of concrete", Proc int. Symp. On the chemistry of cement, Washington D.C.1960,pp 659-94 [contecp 238]
- [30] : **L'HERMITE,R .**"WHAT DO WE KNOW ABOUT PLASTIC DEFORMATION AND CREEP OF CONCRETE" . RILEM bulltin ,No,1.pp.21-5 ,paris, March 1959.

- [31] : **BISSONNETE,B ET PIGON,M** "Tensile creep at early ages of ordinary , Sulicafume and fiber reinforced concretes" , cement and concrete Res , 25(5), 1075-1085,1995.
- [32] : **KRENCHER,H ET SHAH,S.P** "Restrained shrinkage tests with PP fiber reinforced concrete properties and application, SP 105, American concrete institute. Detroit 1987, pp 141-158.
- [33] : **BOUKENDAKDJI,M** "Comparative study of losses of prestess" thèse de magistère, university of leeds 1985.
- [34] : **MARECHAL, J.C** "le fluage du béton en fonction de la température" , Materials and Structures 2.No.8.pp.111-15.paris ,1969.
- [35] : **SICAR, V ET GERARD,P** "retrait et fluage de bétons à hautes performances ; données pour le calcul des déformations différées" Anuales ITBTP .n508. Nov 1992.pp61-85.
- [36] : **DANID B ET DONALD, MC ET HAROLD.R** "Accuracy of prediction Models for shrinkage of concrete ", ACI Materials Journal no 90-M30 May-June 1993.
- [37] : **DE LARRAD,F ET MALLIER,Y** " propriétés constructives des bétons à très hautes performances " Annale ITBTP No 479.Dec 1989 pp 77-108.
- [38] : **FOUE,B ET PAULTRE,P ET DE LARRADE,F** "Justification sous sollicitations normales " connaissance et utilisation des BHP , sous groupe règlement rapport final de L'AFREM Mai 1995.
- [39] : **BROOKS,J.J ET CABRERA,J.G ET MEGAT JAHARI,M.A** "factor affecting autogeneous shrinkage of silica fume high strength concrete" pp 195-202 in proceeding of the international workshop organized by Japan concrete institue , Hiro Shéma june 13-14-1998 pp 195-202
- [40] : **TAZAWA ET YONEKURA,A** "Drying shrinkage and creep of concrete with condensed silise furne " in fly Ash.Silica furne and Natural pozzslans in concrete , proceeding second international conference Madrid 1986SP91 pp 903-921.
- [41] : **DE LARRARD,F** "Formulation et propriétés des bétons à très hautes performances", rapport de recherche LPC, N 149, Mai 1988.
- [42] : **SICAR, V ET GERARD,P** "retrait et fluage de bétons à hautes performances ; données pour le calcul des déformations différées" Anuales ITBTP .n508. Nov 1992.pp61-85.
- [43] : **HALLAL .A** .Thèse de magister 1998 "contribution à l'étude de l'association Acier-béton".
- [44] : **DE LARRAD,F** " propriétés constructives des bétons à très hautes performance de la micro à la macrostructure, annale 89.
- [45] : **ALMUDAIHEEM,J.A** "An improved model to predict the ultimate drying shrinkage of concrete", Magazine of concrete Research, 1992, 44. No 159, June, 81-85.

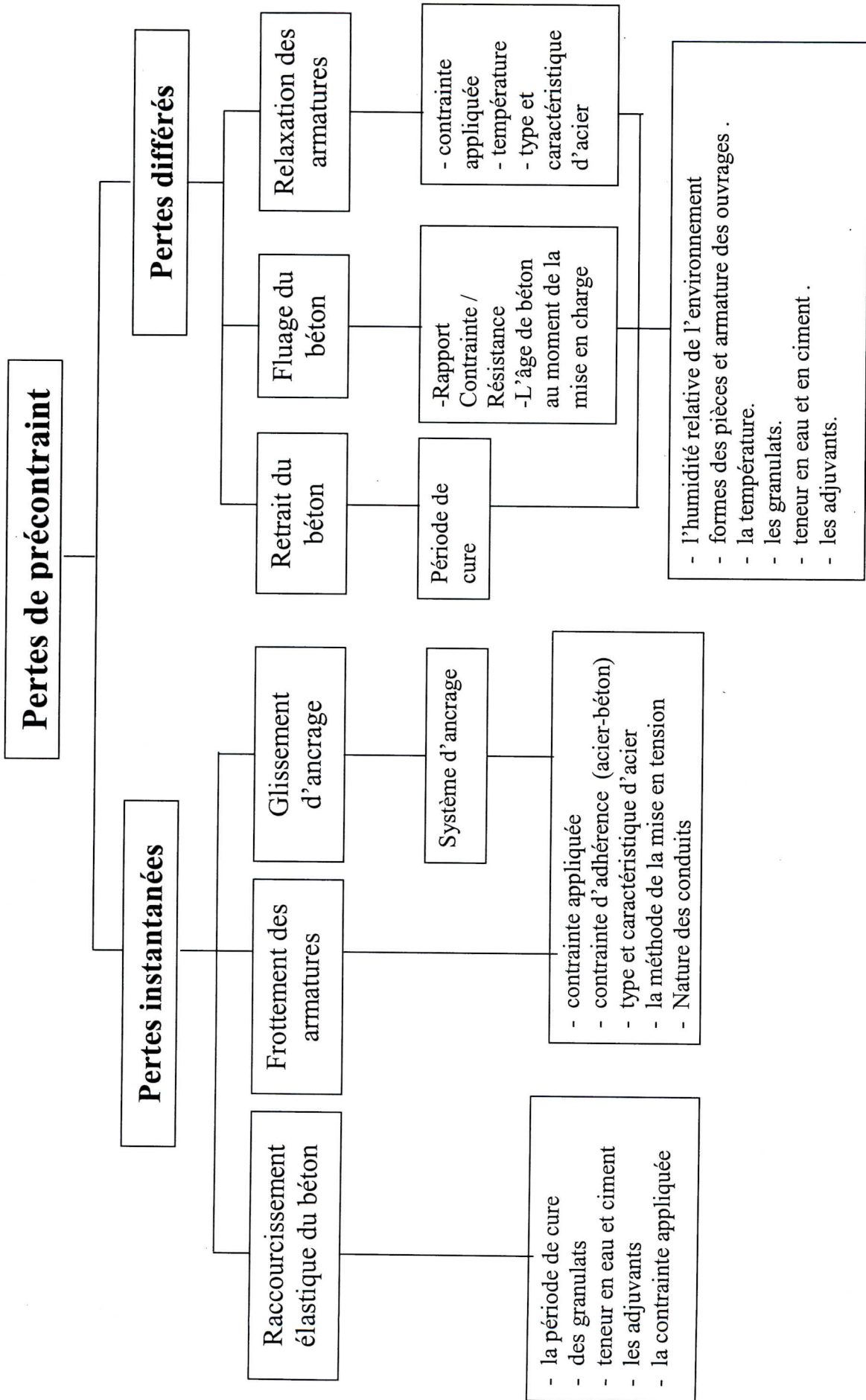
Référence Bibliographique

- [46] : CEB 1990 " Evaluation of the time dependent behavior of concrete". Bulletin d'information no 199, 1990
- [47] : KENNETH L. ET BERNAL, B. "Reinforced concrete Design ", third Edition, MCGRAW-HILL international Editions 1997.
- [48] : ACI COMMOTÉE 209-R-92, prediction of creep, shrinkage and temperature effects in concrete structures, Part 1 : Materials and general properties of concrete, ACI manual of concrete practice.
- [49] : ALMUDAIHEEM, A.J "An improved model to predict the ultimate drying shrinkage of concrete", Magazine of concrete Research, 1992, 44. No 159, June, 81-85.
- [50] : Tadros, M.K et Ghali, A et Dilger, W.H "Time dependent prestress loss and deflection in prestress concrete members", P.C.I. Journal Vol 20, no 3, May-June 1975, pp 86-98.
- [51] : PCI "Committee on prestress losses : (Recommendations for Estimating Prestress Losses) J.PCIVol.20.no 4, pp44-75, July-August 1975.
- [52] : BENNETT, W.B " Manufacture and Production of prestressed concrete" PCI, Vol 21, no 5. Semptember -October-1976.
- [53] : CARLSON R. W. "Shrinkage of concrete as affected by many factors". Proc. ASTM, 1993, 38, Part 2, 419 - 437.
- [54] : PHICKETT G. "Effect of aggregate on shrinkage of concrete and a hypothesis concerning shrinkage". American. Concrete. Inst. 1956, 52, No. 5, Jan. 581-590.
- [55] : HOBBS D.W. "Influence of aggregate restraint on the shrinkage of concrete". ACI J. 1974, Sept., 445-450.
- [56] : HANSEN T.C, AND NIELSIN K.E.C. "Influence of aggregate properties on concrete shrinkage". Proc. Am. Concr. Inst., 1965,
- [57] : FELDMAN R. F. AND SWENSON E.G. Volume change on first drying of hydrated portland cement with and without admixtures, Cem. Concr. Res., 1975, 5. 25.
- [58] : CLIFFORD AND KORESTSKY , A.V "Creep and shrinkage of the gateway bridge concrete" , Australian Road Research , V.17. No 2, 1987, pp 111-128.
- [59] : SAIDLH ET GARDELLA "Bridge prestress losses in dry climate « » Journal of Bridge Engineering Vol 3.no 3. August 1998. pp 111-118.
- [60] : Nathan G, ORI G, Le programmeur "Visual Basic 5" 1997.
- [60] : GERARS, F Le programmeur "Visual Basic 4" 1996.



Annexes

Annexe A
Les Facteurs Influant
les pertes de précontrainte



Annexe B

La méthode pas à pas

LA METHODE PAS A PAS

1. INTRODUCTION :

La plus part des résultats de fluage ont été obtenus sous des conditions constantes tels que la contrainte. En réalité dans les structures la contrainte varie dans le temps sous l'effet de plusieurs phénomènes tels que le fluage, le retrait et la relaxation ces trois derniers sont variables dans le temps, en conséquence la contrainte dans le béton au niveau des armatures varie dans le temps.

Donc il est nécessaire de savoir comment on peut déterminer les déformations dans le béton ou de déterminer la contrainte dans les armatures. quand la contrainte appliquée variée.

Pour résoudre ce type des problèmes il nous faut une base de donnée sur les déformations soient élastique, retrait ou fluage sous les mêmes conditions. Ces données peuvent être obtenues par des essais ou par des méthodes de la prédiction tels que les méthodes représentées dans le chapitre 2. Mais la relaxation est définie comme la variation de la tension dans le temps sous une contrainte constante. En pratique, il n'existe pas dans les structures des contraintes constantes à cause de l'effet de retrait et de fluage. Ces deux déformations provoquent des pertes de la contrainte dans le temps. Ces pertes influent sur la contrainte dans les armatures et sur les pertes par relaxation, car la contrainte dans le béton diminue de façon continue. Donc c'est difficile de déterminer la valeur exacte de la contrainte dans l'acier. Pour cela on va appliquer la méthode pas à pas pour résoudre le problème de la variation de la contrainte dans le temps, en utilisant la méthode ACI pour déterminer la base de donnée.

1.1. Le Principe de la Méthode Pas à Pas :

La procédure du pas par pas est complètement générale, elle peut traiter toutes les variations des déformations ou des contraintes.

Le principe de cette méthode est de diviser le temps total en plusieurs pas de temps. Dans chaque intervalle de temps on suppose que les pertes dues au retrait et au fluage du béton

ainsi que la relaxation des armatures sont indépendantes les unes des autres, et que la contrainte dans l'acier reste constante dans l'intervalle de temps consulté.

La contrainte calculée à la fin de chaque intervalle sera la contrainte initiale pour l'intervalle qui suit comme il est représenté dans la figure (A-1).

2. LES PERTES DIFFERÉES A UN INSTANT t_j :

Le retrait du béton ne dépend pas de la contrainte appliquée, mais il est variable dans le temps, alors que la relaxation et le fluage représentent deux manifestations qui dépendent de la contrainte appliquée du fait que la relation entre la contrainte et la déformation dans le béton est une fonction du temps. Les pertes différées à un instant t_j est exprimé par :

$$\sigma(t_j) = \sigma(t_{j-1}) - \Delta\sigma(t_{j-1}, t_j)$$

$$\Delta\sigma(t_{j-1}, t_j) = \Delta SH(t_{j-1}, t_j) + \Delta CR(t_{j-1}, t_j) + \Delta RE(t_{j-1}, t_j)$$

$\Delta SH(t_{j-1}, t_j)$: Les pertes dues au retrait du béton dans l'intervalle (t_{j-1}, t_j)

$\Delta CR(t_{j-1}, t_j)$: Les pertes dues au fluage du béton dans l'intervalle (t_{j-1}, t_j)

$\Delta SH(t_{j-1}, t_j)$: Les pertes dues à la relaxation des armatures dans l'intervalle (t_{j-1}, t_j)

2.1. Les pertes dues au retrait du béton:

$$\Delta SH(t_{j-1}, t_j) = SH(t_j) - SH(t_{j-1})$$

2.2. Les pertes dues au fluage du béton:

$$\Delta CR(t_{j-1}, t_j) = CR(t_j) - CR(t_{j-1})$$

$$CR(t_j) = [\sigma(t_{j-1}) * \phi_0(t_j, t_0)] / E(t_0)$$

$E(t_0)$: le module élastique du béton au moment de la mise en tension.

$\phi_0(t_j, t_0)$: le coefficient de fluage.

$\sigma(t_j)$: représente la contrainte initiale dans l'intervalle (t_j, t_{j-1})

La détermination des pertes par retrait et fluage du béton base sur les mêmes équations données par la méthode ACI.

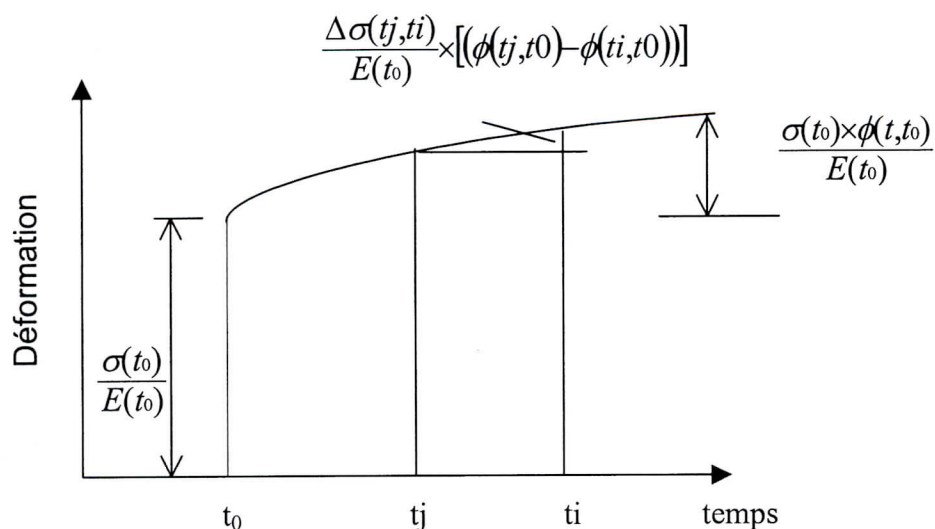


Figure A-1 : le principe de calcul le fluage par la méthode pas par pas.

2.3. Les pertes dues à la relaxation des armatures:

Dans l'estimation des pertes par relaxation nous avons vu que le code ACI inclus l'effet des pertes par retrait et fluage du béton, mais dans la méthode pas par pas puisqu'on suppose que les pertes différées sont séparables et que la contrainte appliquée reste constante dans le temps, La formule des pertes par relaxation sous l'effet d'une contrainte constante comme elle est représenté dans le tableau 6-1.

Tableau 6-1 : Les pertes par relaxation sous une contrainte constante.

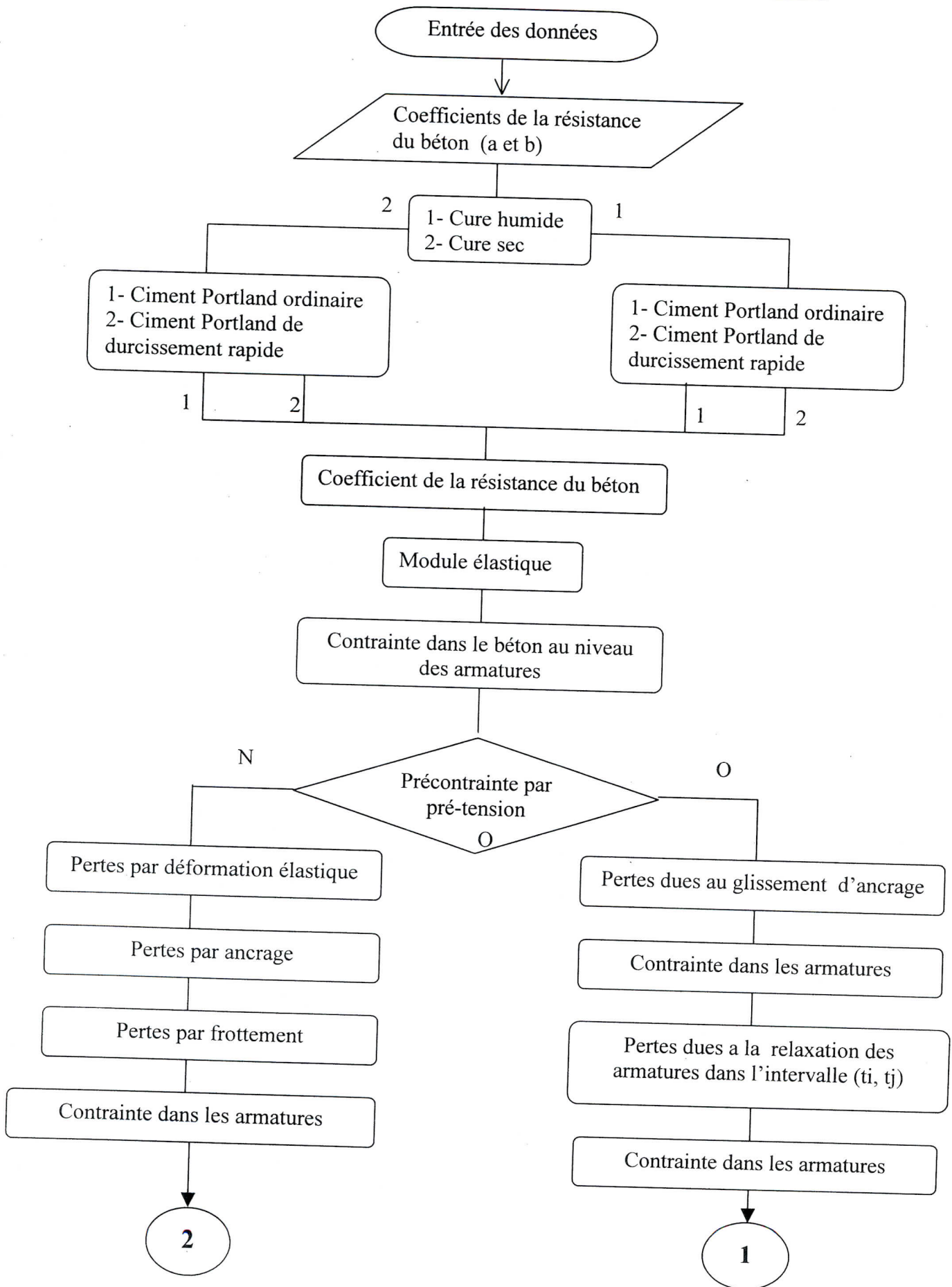
Fils ou torons		$f_{si}/f_{py} \geq 0,60$	Fpy à 0,1% allongement
acier	Relaxation normale	$0,1 \times f_{si} \times \left[\frac{f_{si}}{f_{py}} - 0,55 \right] \times \log_{10}(t/t_1)$	$f_{py} = 0,85 f_{pu}$
	Basse relaxation	$f_{si} \times \left[\frac{\log_{10}(t/t_1)}{45} \times \left[\frac{f_{si}}{f_{py}} - 0,55 \right] \right]$	$f_{py} = 0,90 f_{pu}$

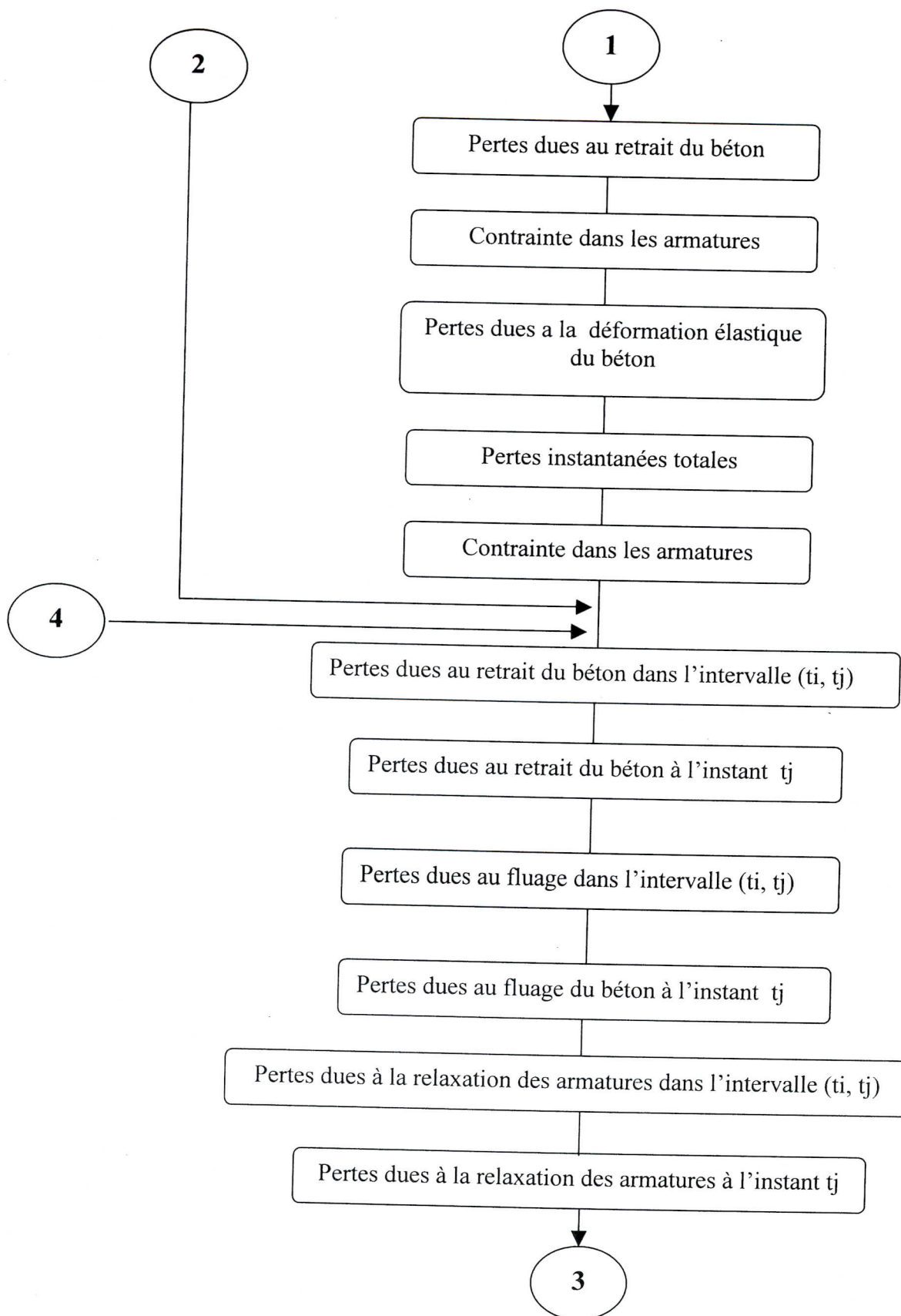
$f_{si} = \sigma(t_{j-1})$: représente la contrainte initiale dans l'intervalle (t_j, t_{j-1})

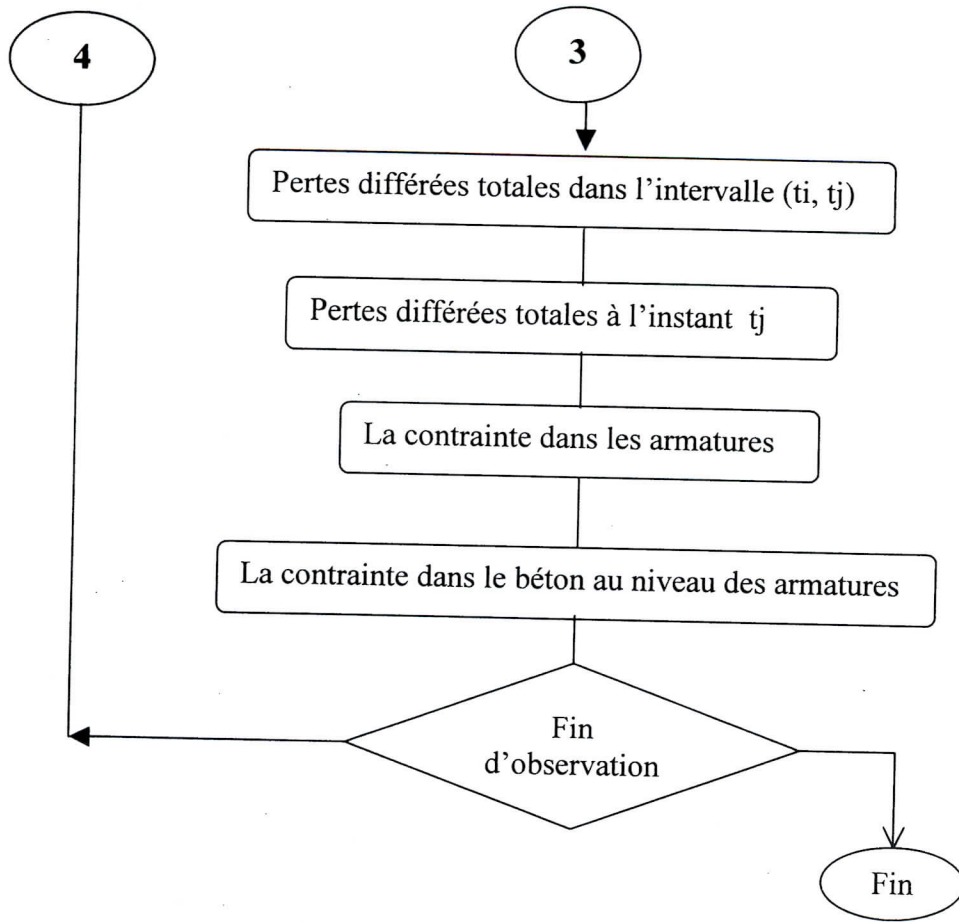
Annexe C

Organigramme de calcul
des pertes de précontrainte

Organigramme de Calcul des Pertes de Précontrainte







Annexe D
Programme de calcul
des pertes de précontrainte

PROGRAMME DE CALCUL DES PERTES DE PRECONTRAINT

'---- Déclaration des donnés-----

Dim N As Single

If form1.Option1.Value = True Then N = 1 ' pré-tension

If form1.Option2.Value = True Then N = 2 ' post-tension

If Check1.Value = vbChecked Then ss = 1 'ciment portland ordinaire

If Check2.Value = vbChecked Then ss = 2 'ciment portland artificiel

'--- cure humuide- et - cure sec ----

If Option1.Value = True Then m = 1 ' cure humide

If Option2.Value = True Then m = 2 ' cure sec

' ----les données de la feuille 1----

M0 = (Val(form1.Text1(0).Text)) * 10 ^ 6

P0 = (Val(form1.Text1(1).Text)) * 1000

l = Val(form1.Text1(2).Text)

Ap = (Val(form1.Text1(3).Text)) * 100

Ac = (Val(form1.Text1(4).Text)) * 100

Ic = (Val(form1.Text1(5).Text)) * 10 ^ 4

Ep = Val(form1.Text1(6).Text)

e = (Val(form1.Text1(7).Text)) * 10

vs = Val(form1.Text1(8).Text)

μ = Val(form1.Text1(9).Text)

k = Val(form1.Text1(10).Text)

alfa = Val(form1.Text1(11).Text)

g = Val(form1.Text1(12).Text)

v = Val(form1.Text1(13).Text)

v1 = Val(form1.Text1(14).Text)

' ----les données de la feuille 2----

t1 = Val(Text2(0).Text)

RH = Val(Text2(1).Text)

tem = Val(Text2(2).Text)

f28 = Val(Text1(0).Text)

S = Val(Text1(1).Text)

af = Val(Text1(2).Text)

C = Val(Text1(3).Text)

air = Val(Text1(4).Text)

t0 = Val(Text1(6).Text)

t = Val(Text1(7).Text)

w = Val(Text1(5).Text)

'--- Contrainte initiale dans le béton au niveau des armatures---

$$fcr1 = (P0 / Ac + (P0 * (e ^ 2) / Ic) + (M0 * e / Ic))$$

'----Les Pertes Instantanées-----

'-----les coefficients a et b-----

If ss = 1 And m = 1 Then

$$a = 4$$

$$b = 0.85$$

End If

If ss = 1 And ss = 2 Then

$$a = 1$$

$$b = 0.95$$

End If

If ss = 2 And m = 1 Then

$$a = 2.3$$

$$b = 0.92$$

End If

If ss = 2 And m = 2 Then

$$a = 0.7$$

$$b = 0.98$$

End If

'--- Résistance de compression dans le béton au moment de la mise en tension--

$$fc1 = t0 * f28 / (a + b * t0)$$

'-----Module Elastique-----

$$Ec1 = (w ^ 1.5) * 0.043 * (fc1 ^ 0.5)$$

'-----Les pertes Instantanées-----

'-1-Raccorcissement Elastique

'-a-dans le cas de la prétention

$$\text{If } N = 1 \text{ Then } ES = fcr1 * Ep / Ec1$$

'-b-dans le cas de la postension

$$\text{If } N = 2 \text{ Then } ES = 0.5 * fcr1 * Ep / Ec1$$

'-2- l'ancrage

Dim landa As Single

$$lx = 1 / 2$$

$$\text{If } N = 1 \text{ Then } AN = g * 0.001 * Ep / lx$$

If N = 2 Then

$$landa = (g * Ep / (FR)) ^ 0.5$$

$$\text{If } landa \leq 1 / 2 \text{ Then } AN = 2 * landa * FR$$

$$\text{If } landa > 1 / 2 \text{ Then } AN = Ep * (g / l)$$

End If

'-3- Frottement

If N = 2 Then

```
FR = sigma * Exp(-(\mu * f + k * l))
```

```
ElsC
```

```
FR = 0
```

```
End If
```

```
*** Les pertes Instantanées Totales ***
```

```
Dim sigma1 As Single
```

```
INS = ES + AN + FR
```

```
sigma1 = P0 / Ap - INS
```

```
'-----  
'-----Les pertes différées-----
```

```
'-----Le retrait-----
```

```
' Coefficient k'1
```

```
If m = 2 Then k11 = 1
```

```
If m = 1 Then
```

```
  If t1 >= 1 And t1 <= 3 Then k11 = 1.2 - 0.05 * (t1 - 1)
```

```
  If t1 >= 3 And t1 <= 7 Then k11 = 1.1 - 0.025 * (t1 - 3)
```

```
  If t1 >= 7 And t1 <= 14 Then k11 = 1 - 0.01 * (t1 - 7)
```

```
  If t1 >= 14 And t1 <= 28 Then k11 = 0.93 - 0.005 * (t1 - 14)
```

```
  If t1 >= 28 And t1 <= 90 Then k11 = 0.86 - (0.11 / 62) * (t1 - 28)
```

```
End If
```

```
' Coefficient K'2
```

```
If RH >= 20 And RH <= 80 Then k12 = 1.4 - 0.01 * RH
```

```
If RH <= 100 And RH >= 80 Then k12 = 3 - 0.03 * RH
```

```
'if RH < 40 then
```

```
' Coefficient K'3
```

```
If vs < 35.7 Then
```

```
  If vs >= 12.75 And vs <= 19 Then k13 = 1.35 - (0.1 / 6.25) * (vs - 12.75)
```

```
  If vs >= 19 And vs <= 26 Then k13 = 1.25 - (0.08 / 6) * (vs - 19)
```

```
  If vs >= 26 And vs <= 31.75 Then k13 = 1.17 - (0.09 / 6) * (vs - 26)
```

```
  If vs >= 31.75 And vs <= 37.5 Then k13 = 1.08 - (0.08 / 6.5) * (vs - 31.5)
```

```
End If
```

```
If vs >= 35.7 And vs <= 95 Then
```

```
  If t - t1 > 365 Then k13 = 1.17 - 0.00456 * vs
```

```
  If t - t1 <= 365 Then k13 = 1.23 - 0.006 * vs
```

```
End If
```

```
If vs > 95 Then k13 = 1.2 * Exp(-0.00472 * vs)
```

```
' il existe un autre coefficient dépend de V/S
```

```
'Coefficient K'4
```

```
k14 = 0.89 + 0.00161 * S
```

```
'Coefficient K'5
```

```
If af <= 50 Then k15 = 0.3 + 0.014 * af
```

```
If af > 50 Then k15 = 0.9 + 0.002 * af
```

'Coefficient K'6

$$k16 = 0.75 + 0.00061 * C$$

'Coefficient K'7

$$k17 = 0.95 + 0.008 * air$$

'----- retrait ultime-----

$$sh_{iin} = 780 * (10^{-6}) * k11 * k12 * k13 * k14 * k15 * k16$$

'---Le retrait dans le temps-----

For i = t1 To t Step 1

If m = 1 Then $Esh(i) = (i - t1) * sh / (35 + (i - t1))$

If m = 2 Then $Esh(i) = (i - t1) * sh / (55 + (i - t1))$

'----- Pertes dues aux retrait-----

' Coefficient ksh

Dim Ksh As Single

If t1 <= t0 Then

$$t2 = t0 - t1$$

$$Ksh = 1$$

End If

If N = 2 Then Ksh = 1

If N = 1 Then

If 3 <= t2 And t2 <= 5 Then $Ksh = 0.85 - 0.025 * (t2 - 3)$

If 5 <= t2 And t2 <= 7 Then $Ksh = 0.8 - 0.015 * (t2 - 5)$

If 7 <= t2 And t2 <= 10 Then $Ksh = 0.77 - 0.013 * (t2 - 7)$

If 10 <= t2 And t2 <= 20 Then $Ksh = 0.73 - 0.009 * (t2 - 10)$

If 20 <= t2 And t2 <= 30 Then $Ksh = 0.64 - 0.006 * (t2 - 20)$

If 30 <= t2 And t2 <= 60 Then $Ksh = 0.58 - 0.004 * (t2 - 30)$

End If

$$SH(i) = Esh(i) * Ksh * Ep * (1 - 0.0024 * vs) * (1 - 0.015 * RH)$$

Next i

'-----Le fluage-----

'-----Coefficients de fluage-----

' Coefficient K2 pour HR > 40

$$k2 = 1.27 - 0.0067 * RH$$

' if RH < 40 then

' Coefficient K3

If vs < 35.7 Then

If vs < 35.7 Then

If vs >= 12.75 And vs <= 19 Then $k3 = 1.3 - (0.13 / 6.25) * (vs - 12.75)$


```

If vs >= 19 And vs <= 26 Then k3 = 1.17 - (0.06 / 6.75) * (vs - 19)
If vs >= 26 And vs <= 31.75 Then k3 = 1.11 - (0.07 / 6.75) * (vs - 26)
If vs >= 31.75 And vs <= 37.5 Then k3 = 1 - (0.04 / 5.75) * (vs - 31.75)
End If
End If
If vs >= 35.7 And vs <= 95 Then
  If t - t1 > 365 Then k3 = 1.14 - 0.00368 * vs
  If t - t1 <= 365 Then k3 = 1.23 - 0.00268 * vs
End If
If vs > 95 Then k3 = (2 / 3) * (1 + 1.13 * Exp(-0.0213 * vs))
' il existe un autre coefficient dépend de V/S

'Coefficient K4
k4 = 0.82 + 0.00264 * S
'Coefficient K5
k5 = 0.88 + 0.0024 * af
'Coefficient K6
k6 = 0.46 + 0.09 * air
If k6 < 1 Then k6 = 1
'Coefficient K1
For i = t0 To t Step 1
  If m = 1 Then k1(i) = 1.25 * ((i) ^ (-0.118))
  If m = 2 Then k1(i) = 1.13 * (i) ^ (-0.095)

'----- fluage ultime -----
  Fii(i) = 2.35 * k1(i) * k2 * k3 * k4 * k5 * k6
'-----Coefficient de Fluage dans le temps -----
  Fi(i) = (i - t0) ^ (0.6) * F(i) / (10 + ((i - t0) ^ (0.6)))

  If i <> t0 Then Fi(i) = (i - 1) ^ (0.6) * F(i) / (10 + ((i - i) ^ (0.6)))

Next i
'---- Déformation élastique plus le fluage ----

'- Résistance de compression dans le béton dans le temps--

For i = t0 To t Step 1
  fc(i) = i * f28 / (a + b * i)

  If i <> t0 Then
    dEcré(i) = dfcr(i - 1) * (1 + (Fi(i) - Fi(i - 1))) / Ec(i - 1))
    dEcr(i) = fcr(i - 1) * ((Fi(i))) / Ec(t0)

    Ec(i) = (w ^ 1.5) * 0.043 * (fc(i) ^ 0.5)
  If i = t0 Then
    fcr(i) = fcr1
    dEcré(i) = fcr(i) / Ec(i)
    'Ecré(i) = 0
    Ecr(i) = 0
  End If

```


Annexes E
Note de calcul

- LA RELAXATION DES ARMATURES
Très basse relaxation

4 - La Procédure de la précontrainte

Précontrainte par pré-tension

XX
X RESULTATS DE CALCUL DES PERTES X
XX

1 - LES PERTES INSTANTANÉES

ES (MPa) =44,64 -----Les Pertes par raccourcissement élastique
AN (MPa) =0 -----Les Pertes par ancrage
FR (MPa) =0 -----Les Pertes par frottement
INS (MPa) =44,64 -----Les Pertes Instantanées totale

2 - LES PERTES DIFFÉRÉES

t= 43

SH (MPa) =0,00 -----Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa) =0,00 -----Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa) =0,00 -----Les Pertes dues au relaxation des
Armatures

t=45

DF (MPa) =0,00 -----Les Pertes différées totale
SH (MPa) =1,87 -----Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa) =16,57 -----Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa) =20,54 -----Les Pertes dues au relaxation des
armatures

DF (MPa) =38,98 -----Les Pertes différées totale

t = 47

SH (MPa) =3,54 -----Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa) =23,26 -----Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa) =20,14 -----Les Pertes dues au relaxation des
armatures

DF (MPa) =46,94 -----Les Pertes différées totale

t = 49

SH (MPa) =5,05 -----Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa) =27,93 -----Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa) =19,73 -----Les Pertes dues au relaxation des
armatures

DF (MPa) =51,77 -----Les Pertes différées totale

t = 51

SH (MPa) =6,461 -----Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa) =31,55 -----Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa) =19,54 -----Les Pertes dues au relaxation des
armatures

DF (MPa) =57,52 -----Les Pertes différées totale

t = 53

SH (MPa) =7,63 -----Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa) =34,50 -----Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa) =19,34 -----Les Pertes dues au relaxation des
armatures

DF (MPa)	=61,52	-----	Les Pertes différées totale
t	= 55		
SH (MPa)	=8,82	-----	Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa)	=36,99	-----	Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa)	=19,18	-----	Les Pertes dues au relaxation des armatures
DF (MPa)	=64,99	-----	Les Pertes différées totale
t	= 57		
SH (MPa)	=9,87	-----	Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa)	=39,13	-----	Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa)	=19,05	-----	Les Pertes dues au relaxation des armatures
DF (MPa)	=69,05	-----	Les Pertes différées totale
t	= 59		
SH (MPa)	=10,84	-----	Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa)	=41,00	-----	Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa)	=18,94	-----	Les Pertes dues au relaxation des armatures
DF (MPa)	=70,87	-----	Les Pertes différées totale
t	= 61		
SH (MPa)	=11,74	-----	Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa)	=42,65	-----	Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa)	=18,85	-----	Les Pertes dues au relaxation des armatures
DF (MPa)	=73,24	-----	Les Pertes différées totale
t	= 63		
SH (MPa)	=12,57	-----	Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa)	=44,14	-----	Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa)	=18,77	-----	Les Pertes dues au relaxation des Armatures
DF (MPa)	=75,48	-----	Les Pertes différées totale
t	= 65		
SH (MPa)	=13,34	-----	Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa)	=45,47	-----	Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa)	=18,70	-----	Les Pertes dues au relaxation des armatures
DF (MPa)	=77,51	-----	Les Pertes différées totale
t	= 67		
SH (MPa)	=14,06	-----	Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa)	=46,69	-----	Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa)	=18,64	-----	Les Pertes dues au relaxation des armatures
DF (MPa)	=79,39	-----	Les Pertes différées totale
t	= 69		
SH (MPa)	=14,73	-----	Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa)	=47,30	-----	Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa)	=19,59	-----	Les Pertes dues au relaxation des armatures
DF (MPa)	=81,12	-----	Les Pertes différées totale
t	= 71		
SH (MPa)	=15,36	-----	Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa)	=48,31	-----	Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa)	=18,54	-----	Les Pertes dues au relaxation des armatures
DF (MPa)	=82,71	-----	Les Pertes différées totale
t	= 73		

SH (MPa)	=15,95	-----	Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa)	=49,75	-----	Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa)	=18,50	-----	Les Pertes dues au relaxation des armatures
DF (MPa)	=84,20	-----	Les Pertes différées totale
τ	= 75		
SH (MPa)	=16,51	-----	Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa)	=50,62	-----	Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa)	=18,47	-----	Les Pertes dues au relaxation des armatures
DF (MPa)	=85,60	-----	Les Pertes différées totale
τ	= 77		
SH (MPa)	=17,03	-----	Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa)	=51,43	-----	Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa)	=18,44	-----	Les Pertes dues au relaxation des armatures
DF (MPa)	=86,90	-----	Les Pertes différées totale
τ	= 79		
SH (MPa)	=17,52	-----	Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa)	=52,13	-----	Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa)	=18,41	-----	Les Pertes dues au relaxation des armatures
DF (MPa)	=88,13	-----	Les Pertes différées totale
τ	= 81		
SH (MPa)	=17,99	-----	Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa)	=52,88	-----	Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa)	=18,39	-----	Les Pertes dues au relaxation des armatures
DF (MPa)	=89,26	-----	Les Pertes différées totale
τ	= 83		
SH (MPa)	=18,43	-----	Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa)	=53,54	-----	Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa)	=18,37	-----	Les Pertes dues au relaxation des armatures
DF (MPa)	=90,34	-----	Les Pertes différées totale
τ	= 85		
SH (MPa)	=18,85	-----	Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa)	=54,16	-----	Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa)	=18,35	-----	Les Pertes dues au relaxation des armatures
DF (MPa)	=91,36	-----	Les Pertes différées totale
τ	= 87		
SH (MPa)	=19,25	-----	Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa)	=54,74	-----	Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa)	=18,34	-----	Les Pertes dues au relaxation des armatures
DF (MPa)	=92,33	-----	Les Pertes différées totale
τ	= 89		
SH (MPa)	=19,63	-----	Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa)	=55,29	-----	Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa)	=18,32	-----	Les Pertes dues au relaxation des armatures
DF (MPa)	=93,24	-----	Les Pertes différées totale
τ	= 91		
SH (MPa)	=19,99	-----	Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa)	=55,81	-----	Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa)	=18,31	-----	Les Pertes dues au relaxation des armatures
DF (MPa)	=94,11	-----	Les Pertes différées totale
τ	= 93		
SH (MPa)	=20,33	-----	Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa)	=56,31	-----	Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa)	=18,30	-----	Les Pertes dues au relaxation des armatures
DF (MPa)	=94,94	-----	Les Pertes différées totale
τ	= 95		

SH (MPa)	=20,66	-----	Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa)	=56,77	-----	Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa)	=18,30	-----	Les Pertes dues au relaxation des armatures
DF (MPa)	=95,73	-----	Les Pertes différées totale
t	= 97		
SH (MPa)	=20,97	-----	Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa)	=57,21	-----	Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa)	=18,29	-----	Les Pertes dues au relaxation des armatures
DF (MPa)	=96,47	-----	Les Pertes différées totale
t	= 99		
SH (MPa)	=21,27	-----	Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa)	=57,64	-----	Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa)	=18,29	-----	Les Pertes dues au relaxation des armatures
DF (MPa)	=97,20	-----	Les Pertes différées totale
t	= 101		
SH (MPa)	=21,55	-----	Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa)	=58,04	-----	Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa)	=18,28	-----	Les Pertes dues au relaxation des armatures
DF (MPa)	=97,87	-----	Les Pertes différées totale
t	= 103		
SH (MPa)	=21,83	-----	Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa)	=58,42	-----	Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa)	=18,28	-----	Les Pertes dues au relaxation des armatures
DF (MPa)	=98,53	-----	Les Pertes différées totale
t	= 105		
SH (MPa)	=22,096	-----	Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa)	=58,788	-----	Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa)	=18,284	-----	Les Pertes dues au relaxation des armatures
t	= 107		
SH (MPa)	=22,347	-----	Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa)	=59,136	-----	Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa)	=18,284	-----	Les Pertes dues au relaxation des armatures
t	= 109		
SH (MPa)	=22,589	-----	Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa)	=59,470	-----	Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa)	=18,284	-----	Les Pertes dues au relaxation des armatures
t	= 111		
SH (MPa)	=22,822	-----	Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa)	=59,789	-----	Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa)	=18,285	-----	Les Pertes dues au relaxation des armatures
t	= 113		
SH (MPa)	=23,046	-----	Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa)	=60,095	-----	Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa)	=18,287	-----	Les Pertes dues au relaxation des armatures
t	= 115		
SH (MPa)	=23,261	-----	Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa)	=60,388	-----	Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa)	=18,290	-----	Les Pertes dues au relaxation des armatures
t	= 117		
SH (MPa)	=23,469	-----	Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa)	=60,670	-----	Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa)	=18,293	-----	Les Pertes dues au relaxation des armatures
t	= 119		
SH (MPa)	=23,669	-----	Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa)	=60,940	-----	Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa)	=18,297	-----	Les Pertes dues au relaxation des armatures
t	= 121		

SH (MPa) =23,862-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =61,200-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,301-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 123$
 SH (MPa) =24,048-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =61,451-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,305-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 125$
 SH (MPa) =24,228-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =61,691-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,311-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 127$
 SH (MPa) =24,401-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =61,923-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,316-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 129$
 SH (MPa) =24,570-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =62,147-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,322-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 131$
 SH (MPa) =24,732-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =62,363-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,328-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 133$
 SH (MPa) =24,890-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =62,571-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,335-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 135$
 SH (MPa) =25,042-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =62,770-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,341-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 RT (MPa) -----Les Pertes différées totale
 $t = 137$
 SH (MPa) =25,190-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =62,966-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,349-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 139$
 SH (MPa) =25,333-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =63,154-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,356-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 141$
 SH (MPa) =25,472-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =63,336-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,363-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 143$
 SH (MPa) =25,607-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =63,512-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,371-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 145$
 SH (MPa) =25,737-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =63,682-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,379-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 147$
 SH (MPa) =25,864-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =63,846-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,387-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 149$

SH (MPa) =25,988-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =64,006-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,396-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 151$
 SH (MPa) =26,108-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =64,161-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,404-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 153$
 SH (MPa) =26,225-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =64,311-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,413-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 155$
 SH (MPa) =26,338-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =64,456-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,422-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 157$
 SH (MPa) =26,449-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =64,597-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,431-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 159$
 SH (MPa) =26,556-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =64,735-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,440-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 161$
 SH (MPa) =26,661-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =64,868-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,449-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 163$
 SH (MPa) =26,763-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =64,997-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,458-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 165$
 SH (MPa) =26,862-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =65,122-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,467-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 167$
 SH (MPa) =26,959-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =65,245-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,477-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 169$
 SH (MPa) =27,054-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =65,363-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,486-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 171$
 SH (MPa) =27,146-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =65,479-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,496-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 173$
 SH (MPa) =27,236-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =65,591-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,505-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 175$
 SH (MPa) =27,324-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =65,700-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,515-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 177$
 SH (MPa) =27,410-----Les Pertes dues au retrait du béton

CR (MPa) =65,807-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,525-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 179$
 SH (MPa) =27,493-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =65,910-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,534-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 181$
 SH (MPa) =27,575-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =66,011-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,544-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 183$
 SH (MPa) =27,655-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =66,109-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,554-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 185$
 SH (MPa) =27,733-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =66,205-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,564-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 187$
 SH (MPa) =27,810-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =66,298-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,574-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 DF (MPa) =-----Les Pertes différées totale
 $t = 189$
 SH (MPa) =27,884-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =66,389-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,584-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 191$
 SH (MPa) =27,957-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =66,478-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,594-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 193$
 SH (MPa) =28,029-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =66,564-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,604-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 195$
 SH (MPa) =28,099-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =66,648-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,614-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 197$
 SH (MPa) =28,167-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =66,730-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,624-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 199$
 SH (MPa) =28,234-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =66,811-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,634-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 201$
 SH (MPa) =28,300-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =66,899-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,644-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 203$
 SH (MPa) =28,361-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =66,985-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,654-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 205$
 SH (MPa) =28,427-----Les Pertes dues au retrait du béton

CR (MPa) =67,040-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,664-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 t = 207
 SH (MPa) =28,439-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =67,113-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,674-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 t = 209
 SH (MPa) =28,549-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =67,184-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,684-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 t = 211
 SH (MPa) =28,609-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =67,253-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,694-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 t = 213
 SH (MPa) =28,667-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =67,321-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,704-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 t = 215
 SH (MPa) =28,724-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =67,387-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,714-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 t = 217
 SH (MPa) =28,780-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =67,452-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,724-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 t = 219
 SH (MPa) =28,835-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =67,516-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,734-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 t = 221
 SH (MPa) =28,888-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =67,577-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,744-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 t = 223
 SH (MPa) =28,941-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =67,638-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,754-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 t = 225
 SH (MPa) =28,993-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =67,697-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,764-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 t = 227
 SH (MPa) =29,044-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =67,755-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,774-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 t = 229
 SH (MPa) =29,094-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =67,811-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,784-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 t = 231
 SH (MPa) =29,143-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =67,867-----Les Pertes dues au fluage du béton
 RE (MPa) =18,794-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 t = 233
 SH (MPa) =29,191-----Les Pertes dues au retrait du béton
 CR (MPa) =67,921-----Les Pertes dues au fluage du béton

RE (MPa)	=18,804	-----	Les Pertes dues au relaxation des armatures
t	=	235	
SH (MPa)	=29,239	-----	Les Pertes dues au retrait du beton
CR (MPa)	=67,974	-----	Les Pertes dues au fluage du beton
RE (MPa)	=18,814	-----	Les Pertes dues au relaxation des armatures
t	=	237	
SH (MPa)	=29,265	-----	Les Pertes dues au retrait du beton
CR (MPa)	=68,026	-----	Les Pertes dues au fluage du beton
RE (MPa)	=18,824	-----	Les Pertes dues au relaxation des armatures
t	=	239	
SH (MPa)	=29,331	-----	Les Pertes dues au retrait du beton
CR (MPa)	=68,176	-----	Les Pertes dues au fluage du beton
RE (MPa)	=18,854	-----	Les Pertes dues au relaxation des armatures
t	=	241	
SH (MPa)	=29,376	-----	Les Pertes dues au retrait du beton
CR (MPa)	=68,126	-----	Les Pertes dues au fluage du beton
RE (MPa)	=18,844	-----	Les Pertes dues au relaxation des armatures
t	=	243	
SH (MPa)	=29,420	-----	Les Pertes dues au retrait du beton
CR (MPa)	=68,175	-----	Les Pertes dues au fluage du beton
RE (MPa)	=18,854	-----	Les Pertes dues au relaxation des armatures
t	=	245	
SH (MPa)	=29,464	-----	Les Pertes dues au retrait du beton
CR (MPa)	=68,222	-----	Les Pertes dues au fluage du beton
RE (MPa)	=18,864	-----	Les Pertes dues au relaxation des armatures
t	=	247	
SH (MPa)	=29,506	-----	Les Pertes dues au retrait du beton
CR (MPa)	=68,269	-----	Les Pertes dues au fluage du beton
RE (MPa)	=18,873	-----	Les Pertes dues au relaxation des armatures
t	=	249	
SH (MPa)	=29,548	-----	Les Pertes dues au retrait du beton
CR (MPa)	=68,314	-----	Les Pertes dues au fluage du beton
RE (MPa)	=18,883	-----	Les Pertes dues au relaxation des armatures
t	=	251	
SH (MPa)	=29,590	-----	Les Pertes dues au retrait du beton
CR (MPa)	=68,359	-----	Les Pertes dues au fluage du beton
RE (MPa)	=18,893	-----	Les Pertes dues au relaxation des armatures
t	=	253	
SH (MPa)	=29,630	-----	Les Pertes dues au retrait du beton
CR (MPa)	=68,402	-----	Les Pertes dues au fluage du beton
RE (MPa)	=18,903	-----	Les Pertes dues au relaxation des armatures
t	=	255	
SH (MPa)	=29,670	-----	Les Pertes dues au retrait du beton
CR (MPa)	=68,445	-----	Les Pertes dues au fluage du beton
RE (MPa)	=18,913	-----	Les Pertes dues au relaxation des armatures
t	=	257	
SH (MPa)	=29,711	-----	Les Pertes dues au retrait du beton
CR (MPa)	=68,487	-----	Les Pertes dues au fluage du beton
RE (MPa)	=18,923	-----	Les Pertes dues au relaxation des armatures
t	=	259	
SH (MPa)	=29,748	-----	Les Pertes dues au retrait du beton
CR (MPa)	=68,528	-----	Les Pertes dues au fluage du beton
RE (MPa)	=18,933	-----	Les Pertes dues au relaxation des armatures
t	=	261	
SH (MPa)	=29,787	-----	Les Pertes dues au retrait du beton
CR (MPa)	=68,568	-----	Les Pertes dues au fluage du beton

RE (MPa) =18,942-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 263$
SH (MPa) =29,324-----Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa) =68,608-----Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa) =18,951-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 265$
SH (MPa) =29,861-----Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa) =68,646-----Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa) =18,861-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 267$
SH (MPa) =29,897-----Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa) =68,684-----Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa) =18,871-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 269$
SH (MPa) =29,933-----Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa) =68,721-----Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa) =18,880-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 271$
SH (MPa) =29,968-----Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa) =68,757-----Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa) =18,890-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 273$
SH (MPa) =30,003-----Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa) =68,793-----Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa) =18,999-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 275$
SH (MPa) =30,037-----Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa) =68,828-----Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa) =19,009-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
DF (MPa) =-----Les Pertes différées totale
 $t = 299$
SH (MPa) =31,174-----Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa) =70,066-----Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa) =19,847-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 384$
SH (MPa) =31,490-----Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa) =70,076-----Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa) =19,855-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 411$
SH (MPa) =31,567-----Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa) =70,124-----Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa) =19,894-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 417$
SH (MPa) =31,611-----Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa) =70,130-----Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa) =19,917-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 425$
SH (MPa) =31,661-----Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa) =70,181-----Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa) =19,847-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 427$
SH (MPa) =31,681-----Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa) =70,190-----Les Pertes dues au fluage du béton
RE (MPa) =19,885-----Les Pertes dues au relaxation des armatures
 $t = 435$
SH (MPa) =31,735-----Les Pertes dues au retrait du béton
CR (MPa) =70,219-----Les Pertes dues au fluage du béton

