

**UNIVERSITE SAAD DAHLAB. BLIDA**

**Faculté des Science de L'ingénieur**

**MEMOIRE DE MAGISTER**

**En Génie Civil**

**Spécialité : construction**

**SUR LE FLUAGE DES BETONS**

**AVEC ET SANS ADDITIONS MINERALES**

**Par**

**KEBIR Abderraouf**

**Devant les jurys composé de**

<b>ABED Mohamed</b>	<b>Professeur</b>	<b>Président</b>	<b>U.S.D.Blida</b>
<b>OUDJIT Mohamed Nadjib</b>	<b>M.C.A</b>	<b>Examineur</b>	<b>U.S.T.H.B</b>
<b>SLITAINE Mohamed</b>	<b>M.A</b>	<b>Examineur</b>	<b>U.S.D.Blida</b>
<b>BRAHMA Abdelmalek</b>	<b>professeur</b>	<b>Rapporteur</b>	<b>U.S.D.Blida</b>

**Blida, juin 2011**

## **REMERCIEMENTS**

Au terme de 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.

Je tiens à remercier le professeur A. BRAHMA, pour m'avoir dirigé et suivi, et pour ses précieux conseils, qu'il n'a cessé de me prodiguer.

Je remercie également tous les membres de jury pour avoir accepté d'examiner ce mémoire.

Mes remerciements vont à tous les enseignants du département de génie civil.

Enfin, je remercie toute personne, qui de près ou de loin ont m'aidé à la réalisation de ce mémoire.

## **DEDICACES**

*Je dédie ce modeste travail à mon père pour tous son soutient, que dieu le protège.*

*A ma mère pour tous ces sacrifices, amour et soutient consacrés à ma réussite et que  
je la souhaite une longue vie.*

*A toute ma famille.*

*A mes amis, ouanes, tayeb, abdelkader et sans oublié ma chère fatima.*

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

## ملخص

تعتبر الخرسانة منذ القدم المادة الأساسية المستعملة للبناء. و من الأكد أنها ستبقى كذلك في المستقبل القريب و حتى المستقبل البعيد.

تتعرض الخرسانة بعد صبها للكثير من العوامل التي تؤثر على خصائصها، نذكر من بين تلك العوامل ظاهرة الانكماش. ما يؤثر سلبا على المنشأة الخرسانة و يؤدي إلى تغير أبعاد الهيكل الخرساني.

في هذا العمل، قمنا في بادئ الأمر بتعريف ظاهرة الانكماش، ما هي أسبابها و ما هو تأثيرها في المنشأة الخرسانية.

بعد ذلك قمنا بذكر العوامل المؤثرة في ظاهرة انكماش الخرسانة.

و أخيرا قمنا بوضع نموذج رياضي يحدد عملية تطور ظاهرة الانكماش للخرسانة العادية و الخرسانة بالاضافات.

بعد ذلك قمنا بمقارنة هذا النموذج مع النتائج التجريبية المتحصل عليها مسبقا من طرف الباحثين و المخبر، و قمنا كذلك بمقارنة هذا النموذج كذلك مع مختلف النماذج المتداولة عالميا.

النتائج المتحصل عليها باستعمال هذا النموذج مرضية و تمثل حقيقة تطور ظاهرة الانكماش لمختلف أنواع الخرسانة.

## RESUMÉ

Le béton a été depuis longtemps le matériau le plus utilisé dans la construction. Il demeurera sans aucun doute le matériau le plus employé, au cours des prochaines décennies, dans la construction de divers ouvrages.

Les matériaux hydrauliques sont soumis après leur mise en place aux agressions les plus diverses entre autres le fluage. Le fluage est inévitable au cours de la durée de vie du béton, il conduit à d'importantes variations dimensionnelles qui nuisent à la bonne tenue et à la durabilité des ouvrages.

Dans ce travail, nous commentons, dans un premiers temps, le phénomène de fluage, ses origines et ses effets sur les éléments de structure.

Puis, dans un second temps, nous traitons des paramètres influençant le fluage du béton.

Enfin, dans un derniers temps, nous présentons un modèle mathématique donnant l'évolution du fluage des bétons avec et sans additions minérales.

Le modèle développé a été par la suite comparé à de différents résultats expérimentaux et à de différents modèles codifiés les plus utilisés dans la pratique.

Les prédictions du modèle conçus ont été très satisfaisantes pour décrire le phénomène de fluage pour de différents types de bétons.

## **ABSTRACT**

Concrete has been for a long time the most used material in the construction. It will last with no doubts for the following years, in construction of divers civil engineering works.

The hydraulic materials can be faced to external factors, during its operation as the creep, we can't avoid the creep. It contacts to important dimensional variations that infect the same state and the durability of the civil engineering works.

In this work, we comment on, in the first time, the phenomenon of creep, its origins and its effects on the elements of structure.

Then, in the second time, we treat the parameters influencing the creep of the concrete.

Finally, in a last time, we present a mathematical model giving the evolution of the creep of the concretes with and without mineral additions.

The developed model was compared thereafter with various experimental results and various codified models the most used in practice.

The predictions of the model conceived were very satisfactory to describe the phenomenon of creep for various types of concretes.

## TABLE DES MATIERES

<b>RESUME</b> .....	
<b>REMERCIEMENTS</b> .....	
<b>TABLE DES MATIERES</b> .....	
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	
<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	
<b>1. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE</b> .....	
<b>1.1 Généralités et historique</b> .....	17
<b>1.2 Présentation du matériau béton</b> .....	17
<b>1.3 Les déformations du béton</b> .....	20
1.3.1 Variations Dimensionnelles Spontanées.....	20
1.3.2 Déformations Provoquées par un Chargement.....	21
<b>1.4 Le fluage</b> .....	21
1.4.1 Définition et généralité sur le fluage.....	21
1.4.2 Ses effets néfastes.....	22
1.4.3 Ses effets favorables.....	23
1.4.4 Les sources du fluage.....	23
1.4.5 Les théories de fluage.....	24
1.4.6 Le fluage propre.....	26
1.4.7 Le fluage de dessiccation.....	27
1.4.8 L'expérience de Pickett.....	29
1.4.9 L'expérience de Kovler.....	32
1.4.10 Mesure de la fissuration par fluage de dessiccation.....	33
1.4.11 Le fluage à court terme et à long terme.....	33
<b>1.5 Le retrait</b> .....	35
1.5.1 Définition et généralité sur le fluage.....	35
1.5.2 Les différents retraits du béton.....	36
1.5.2.1 Retraits au très jeune âge.....	36
1.5.2.2 Retrait endogène.....	37
1.5.2.3 Retrait thermique.....	38
1.5.2.4 Retrait de dessiccation.....	38

<b>2. ANALYSE DES PARAMETRES INFLUANÇANT LE FLUAGE DU BETON.....</b>	
<b>2.1 Introduction.....</b>	41
<b>2.2 Paramètres ayant un rapport avec les caractéristiques mécaniques du béton.....</b>	42
2.2.1 Influence du dosage en ciment.....	42
2.2.2 Influence du rapport Eau / Ciment (E/C).....	43
2.2.3 Influence de la composition et de la structure de la pâte de ciment.....	44
2.2.4 Influence du volume et de la teneur de la pâte.....	45
2.2.5 Influence des granulats.....	45
2.2.6 Influence des ajouts.....	48
<b>2.3 Paramètres résultants de la conservation du béton.....</b>	49
2.3.1 Influence de l'hygrométrie.....	49
2.3.1.1 Chargement d'une éprouvette en équilibre hygrométrique avec son milieu.....	50
2.3.1.2 Chargement d'une éprouvette en déséquilibre hygrométrique avec son milieu.....	50
2.3.2 Influence de la température.....	51
<b>2.4 Paramètres de définition du produit fini (Dimension du spécimen).....</b>	52
<b>2.5 Paramètres en relation avec le mode d'application de la charge.....</b>	53
2.5.1 Influence du rapport ( $\sigma/f_c$ ).....	53
2.5.2 Age du béton à la mise en charge.....	54
2.5.3 Les déformations de fluage sous contraintes croissantes.....	56
2.5.4 Influence du type de sollicitation (contrainte).....	58
2.5.4.1 Cas de la traction.....	59
2.5.4.2 Cas de la flexion et de la torsion.....	60
<b>2.6 Les différents modèles de prédiction existants.....</b>	61
2.6.1 Les modèles américains.....	61
2.6.1.1 Le modèle de fluage ACI 209.....	61
2.6.1.2 Le modèle de fluage SAKATA.....	61
2.6.1.3 Le modèle de fluage GZ (GARDNER).....	62
2.6.1.4 Le modèle de fluage B3.....	62
2.6.2 Les modèles européens.....	62
2.6.2.1 Le modèle de fluage Eurocode2.....	62
2.6.2.2 Le modèle de fluage BPEL 91.....	63
2.6.2.3 Modèle de fluage CEB 90 (version 99).....	63
<b>3. PROPOSITION D'UN MODÈLE DE PREDICTION.....</b>	
<b>3.1 Introduction.....</b>	65
<b>3.2 Modélisation.....</b>	65

<b>3.3 Estimation des paramètres du modèle</b> .....	67
<b>3.4 Amélioration du modèle</b> .....	69
<b>3.5 Fonction de fluage</b> .....	69
<b>3.6 Validation du modèle</b> .....	70
3.6.1 Comparaison du modèle avec les résultats expérimentaux obtenus par STAQUET [30].....	70
3.6.2 Comparaison avec les résultats expérimentaux obtenus par MEYERSON [64].....	72
3.6.3 Comparaison avec les résultats expérimentaux obtenus par Mang Tia [67].....	74
3.6.4 Comparaison du modèle avec les modèles codifiés.....	77
3.6.4.1 Comparaison par rapport aux résultats expérimentaux obtenus par STAQUET [30].....	77
3.6.4.2 Comparaison par rapport aux résultats expérimentaux obtenus par MEYERSON [64].....	80
<b>3.7 Conclusion</b> .....	82
<b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	84

## REFERENCES

## ANNEXE 1

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1.1:</b> Structures microscopiques des particules de ciment hydratées.....	19
<b>Figure 1.2 :</b> Evolution de la résistance du béton du jeune âge à moyen terme compte tenu de la qualité des agrégats.....	20
<b>Figure 1.2 :</b> Evolution de la résistance du béton du jeune âge à moyen terme compte tenu de la qualité des agrégats.....	20
<b>Figure 1.3 :</b> Illustration de la fissuration par déformation structurellement empêchée....	23
<b>Figure 1.4 :</b> Evolution des déformations de fluage en traction avec variation hygrométrique au jeune âge (7 jours).....	25
<b>Figure 1.5.a:</b> Processus de diffusion à travers la pâte de ciment sous chargement appliqué.....	28
<b>Figure 1.5.b :</b> Déformations de fluage propre et de fluage total (propre + dessiccation).	28
<b>Figure 1.6 :</b> Expérience de Pickett.....	29
<b>Figure 1.7 :</b> Courbes de fluage total et de fluage propre pour deux contraintes de traction.....	31
<b>Figure 1.8 (a):</b> cinétique de gonflement par fluage [26].....	32
<b>Figure 1.8.b :</b> Déformations de fluage en traction totale et propre avec correction de l'effet de gonflement [16].....	32
<b>Figure 1.9 :</b> Mécanisme de fluage propre proposé.....	35
<b>Figure 1.10 .a :</b> Déformation différée de retrait d'un spécimen non chargé.....	36
<b>Figure 1.10 .b :</b> Variation volumique d'une éprouvette de béton au retrait.....	36
<b>Figure 1.11.a :</b> Ponts cristallins (Interparticule bond) lors de la prise.....	37
<b>Figure 1.11.b :</b> Localisation des fissures de retrait sur la coupe d'une éprouvette [10].....	37
<b>Figure 1.12 :</b> Variation du retrait en fonction de l'humidité relative (RH%).....	39
<b>Figure 2.1 :</b> Influence du dosage en ciment sur la déformation du béton [35].....	42
<b>Figure 2.2 :</b> Influence du rapport (E/C) sur le fluage spécifique du béton.....	43
<b>Figures 2.3 :</b> Dépendance du fluage spécifique $C(t, t')$ en traction du ratio E/C (série 5 : E/C=0.55 ; série 4 : E/C=0.40) [40].....	43
<b>Figure 2.4 :</b> Fluages de bétons confectionnés avec différents types de ciment. Eprouvettes de béton chargées à 90 jours au tiers de leurs résistances. Rapport eau/ciment et granulats/ciment constants (respectivement 0,55 et 0,40) [1].....	44
<b>Figure 2.5 :</b> Evolution du fluage dans le temps pour plusieurs types de granulats.....	47
<b>Figure 2.6 :</b> Relation entre le fluage C et le dosage en granulats g.....	47
<b>Figure 2.7 :</b> Relation entre le fluage et le module d'élasticité des granulats [46].....	48
<b>Figure 2.8 :</b> Influence de l'humidité relative sur le fluage du béton.....	49
<b>Figure 2.9 :</b> Evolution du fluage suivant différents modes de conservation avant et en cours du chargement.....	49

<b>Figure 2.10</b> : Etude de l'augmentation de la complaisance $J(t, t')$ par élévation de température par Bažant & Panula en 1978 [29].....	52
<b>Figure 2.11</b> : Influence de la dimension des éprouvettes sur le fluage du béton.....	53
<b>Figure 2.12</b> : (a) Amplitude des déformations de fluage en fonction de la résistance du béton – (b) Déformation d'un béton ordinaire (BO) et d'un BHP à rapport équivalent de contrainte [39].....	53
<b>Figure 2.13</b> : Relation entre le rapport $\sigma/f_c$ et la déformation de fluage.....	54
<b>Figure 2.14</b> : Influence de l'âge du béton à la mise en charge sur le fluage.....	54
<b>Figure 2.15</b> : Variation de la déformation différée totale avec l'augmentation de l'âge de trois bétons différents à la mise en charge.....	55
<b>Figure 2.16</b> : Influence de l'augmentation de l'âge du béton sur le fluage avec différents modes de conservation.....	55
<b>Figure 2.17</b> : (a) Evolution de la déformation de fluage sous charge et contrainte constante de traction, (b) Evolution du taux de déformation de fluage sous charge et contrainte constante de traction [55].....	56
<b>Figure 2.18</b> : (a) Test mécanique de fluage – (b) Déformation de fluage primaire à secondaire [58].....	57
<b>Figure 2.19</b> : (a) Evolution de déformation de fluage complète [60] – (b) Variation de coefficient de fluage $\phi(t', t)$ en fonction de niveau de contrainte [57].....	58
<b>Figure 2.20</b> : Fluage spécifique $C(t, t')$ en traction et compression [60].....	59
<b>Figure 2.21</b> : Déformation de traction et compression à différents âges [60].....	60
<b>Figure 3.1</b> : allure type de la fonction de fluage .....	66
<b>Figure 3.2.a</b> : comparaison des prédictions du modèle et les résultats obtenus par STAQUET [30] ( $t_0=4$ jours).....	70
<b>Figure 3.2.b</b> : comparaison des prédictions du modèle et les résultats expérimentaux obtenus par STAQUET [30] ( $t_0=7$ jours).....	71
<b>Figure 3.2.c</b> : comparaison des prédictions du modèle et les résultats expérimentaux obtenus par STAQUET [30] ( $t_0=28$ jours).....	71
<b>Figure 3.3.a</b> : comparaison des déformations obtenus expérimentalement par MEYERSON [64] et celles prévues par le modèle.....	72
<b>Figure 3.3.b</b> : comparaison des déformations obtenus expérimentalement par MEYERSON [64] et celles prévues par le modèle.....	73
<b>Figure 3.3.c</b> : comparaison des déformations obtenus expérimentalement par MEYERSON [64] et celles prévues par le modèle.....	73
<b>Figure 3.4</b> : comparaison de déformations obtenues expérimentalement par Mang Tia [67] et celles prévues par le modèle (mélange 3) .....	75
<b>Figure 3.5</b> : comparaison de déformations obtenues expérimentalement par Mang Tia [67] et celles prévues par le modèle (mélange 4) .....	75
<b>Figure 3.6</b> : comparaison de déformations obtenues expérimentalement par Mang Tia [67] et celles prévues par le modèle (mélange 5) .....	76
<b>Figure 3.7</b> : comparaison de déformations obtenues expérimentalement par Mang Tia [67] et celles prévues par le modèle (mélange 9) .....	76
<b>Figure 3.8.a</b> : évolution du fluage prévu par le modèle et par les différents codes, $t_0 = 4$ jours.....	77
<b>Figure 3.8.b</b> : évolution du fluage prévu par le modèle et par les différents codes, $t_0 = 7$ jours.....	77
<b>Figure 3.8.c</b> : évolution du fluage prévu par le modèle et par les différents codes, $t_0 = 28$ jours.....	78
<b>Figure 3.9.a</b> : évolution du fluage prévu par le modèle et par les différents codes, $t_0 = 4$ jours.....	78

<b>Figure 3.9.b</b> : évolution du fluage prévu par le modèle et par les différents codes, t <sub>0</sub> = 7jours.....	79
<b>Figure 3.9.c</b> : évolution du fluage prévu par le modèle et par les différents codes, t <sub>0</sub> = 28jours.....	79
<b>Figure 3.10.a</b> : évolution du fluage prévu par le modèle et par les différents codes, Cas du gravier.....	80
<b>Figure 3.10.b</b> : évolution du fluage prévu par le modèle et par les différents codes, Cas du diabase.....	81
<b>Figure 3.10.c</b> : évolution du fluage prévu par le modèle et par les différents codes, Cas du limestone.....	81

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 2.1.</b> Influence des ajouts du béton sur le fluage et le retrait [48].....	48
<b>Tableau 2.2.</b> Influence des conditions de conservation sur le fluage.....	50
<b>Tableau 3.1 :</b> tests du paramètre « a ».....	68
<b>Tableau 3.2 :</b> tests du paramètre « b ».....	68
<b>Tableau 3.3 :</b> tests du paramètre « c ».....	68
<b>Tableau 3.4:</b> Les valeurs de coefficient (c) prédites pour notre modèle.....	69
<b>Tableau 3.5 :</b> propriétés des mélanges utilisés par Mang Tia [67].....	74
<b>Tableau 3.6:</b> valeurs du coefficient $\alpha$ pour chaque mélange de béton.....	74

## INTRODUCTION

L'invention du béton armé est généralement attribuée à Joseph Lambot, qui, en 1848, fit flotter une barque en ciment armé, et à Joseph Monier, qui construisit indépendamment, grâce à ce matériau, des bacs à fleurs en 1849. L'emploi du béton armé dans les structures s'étend dès lors rapidement en France sous l'impulsion de Joseph Monier, mais aussi de Coignet, de François Hennebique et d'Armand Gabriel Considère; dès 1906, une circulaire ministérielle fixe des " Instructions relatives à l'emploi du béton armé ", codifiant ainsi pour la première fois la conception et le calcul des ponts et des bâtiments avec ce matériau.

Le béton est aujourd'hui le matériau de construction par excellence. Environ 4 milliards de mètres cubes de béton sont utilisés tous les ans de par le monde pour la construction d'ouvrages de toutes natures, notamment de bâtiments, d'immeubles d'habitation, de ponts, de routes, de tunnels, d'aéroports, de barrages, de ports, de centrales thermiques et nucléaires et de plates-formes offshore.

Ce choix universel est fondé sur des critères technico-économiques, la résistance mécanique et la durabilité. Autrement dit le bon comportement dans le temps face aux actions des charges et aux agressions physico-chimiques de l'environnement, constituent les principaux critères techniques. Les critères économiques sont évalués à partir de la disponibilité et du coût des matières premières, de la facilité d'emploi et du prix de revient du matériau en œuvre.

Tous les matériaux, et entre autres le béton, sont, à des degrés divers, viscoélastiques. Le facteur temps intervient donc dans leur comportement et dans la formulation de leurs déformations. Il faut donc distinguer les déformations instantanées des déformations différées qui se produisent au cours du temps. Cela est d'autant plus vrai pour le béton dont la résistance s'accroît avec le temps à mesure que se complète l'hydratation du ciment

La résistance potentielle du béton à long terme est fonction de la durée d'application de la contrainte. Elle résulte en première analyse de la combinaison de deux phénomènes contradictoire dont les effets sont antagonistes :

1. le durcissement progressif du béton, en absence de la contrainte, due à la réaction physico-chimique lié à l'hydratation du ciment.
2. l'endommagement interne progressif sous l'effet de la contrainte appliquée correspondant au développement de microfissures.

La résistance et la déformation sont des caractéristiques importantes du béton. Elles jouent un grand rôle dans la stabilité, et la durabilité des ouvrages.

Dans cette étude nous nous sommes intéressés au comportement à long terme du béton sous charge soutenue.

Le fluage du béton est ce processus continu de déformation d'un élément sur lequel s'exerce une charge constante ou variable. Il est fonction notamment des caractéristiques du béton, de son âge lors du chargement, de l'épaisseur de l'élément, de l'hygrométrie de l'environnement et du temps. Le fluage est un phénomène complexe, constaté mais encore mal compris. Il serait lié à des effets de migration d'eau dans les pores et les capillaires de la matrice ainsi qu'à un processus de réaménagement de la structure des cristaux hydratés du liant.

C'est Eugène Freyssinet qui, le premier, dès 1912, a mis en évidence ce phénomène et en a mesuré les conséquences sur le comportement des structures en béton armé et en béton précontraint (réduction de la résistance sous charges soutenues, pertes de précontrainte, redistribution de moments).

Dans ce travail, nous analysons le comportement différé du béton. Nous portons un intérêt particulier au phénomène du fluage avec et sans ajouts.

Nous avons scindé ce travail comme suit : Le premier chapitre présente une étude bibliographique sur le fluage. Dans le deuxième chapitre nous exposons les définitions et les paramètres qui influencent le fluage et nous exposons aussi les différents codes de prédiction de fluage les plus usités.

Dans le troisième chapitre nous proposons un modèle de prédiction de fluage, le quel est validé par des résultats expérimentaux obtenus par Staquet [30], meyersson [64] et Mang tia [67], puis par la suite comparé aux différents codes de calculs.

## **CHAPITRE 1**

### **ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

#### **1.1 Généralités et historique :**

L'utilisation des mortiers à base de chaux, d'argile, de sable et d'eau est très ancienne. Les égyptiens utilisaient déjà ce type de mortiers vers -2600 av J.C., dont l'un des mélanges les plus anciens est celui de la pyramide d'Abou Rawash. Vers le 1<sup>er</sup> siècle av. J.C. les romains empruntèrent la technique importée par les Grecs de Neapolis dès le V<sup>e</sup> siècle av. J.C. pour améliorer ce liant en y ajoutant le sable volcanique de Pouzzoles. Dans la seconde moitié du XVIII<sup>e</sup> siècle, l'Anglais John Smeaton entrevoit le rôle que joue l'argile dans l'hydraulicité de certains calcaires. En 1779, Bry Higgins publie ses recherches sur l'importance de la granulométrie des sables destinés à la confection des mortiers, et Jean-Antoine Chaptal établit que les pouzzolanes françaises peuvent sans dommage être substituées aux pouzzolanes italiennes. Pourtant, la découverte du ciment est attribuée en France à Louis Vicat, jeune ingénieur de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC). En 1818, il fut le premier au monde à fabriquer, de manière artificielle et contrôlée, des chaux hydrauliques dont il détermina les composants ainsi que leur proportion. Préférant la gloire d'être utile à la fortune, il publia le résultat de ses recherches sans déposer de brevet. C'est l'industriel Joseph Apsdin qui dépose en octobre 1824 le premier brevet et crée la marque ciment de Portland.

#### **1.2 Présentation du matériau béton :**

L'histoire du béton remonte à deux mille ans avant JC. A cette époque, les romains construisaient leurs premiers ouvrages à base de chaux vive (poudre issue de la calcination du calcaire pur) dont ils avaient découvert les propriétés hydrauliques et qui fournissait une pâte "dure comme de la pierre" très résistante et durable. Plus tard (19<sup>ième</sup> siècle), les véritables recherches approfondies sur les propriétés de la chaux ont été faites par Smeaton, Vicat et Apsdin qui montrèrent dans un premier temps que le clinker issu de la calcination du mélange "calcaire – argile" (particules anhydres) fournissait une meilleure hydraulicité au liant. En 1855, du gypse (SO<sub>3</sub>) en une petite quantité ajoutée au

clinker, permet d'obtenir au contact de l'eau, une pâte homogène et maniable pendant un laps de temps. Ce mélange original "gypse – clinker" fut breveté et possède encore aujourd'hui l'appellation "Ciment Portland Artificiel" (réglementairement CPA - CEM I). Puis, rapidement les premiers mortiers et bétons furent mis en œuvre en introduisant dans la pâte de ciment respectivement du sable ou des granulats. En parallèle à de nombreuses recherches sur leur composition et leur comportement, ces "nouveaux" matériaux composites furent rapidement employés dans de nombreuses constructions.

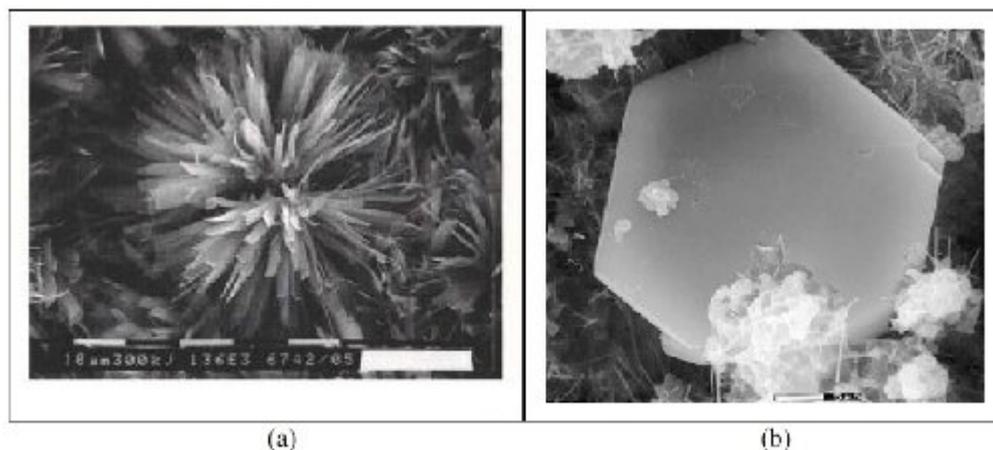
Les résultats d'analyses des différentes phases (ciment – granulats – eau) précisent l'influence de chacun des constituants. Classiquement, le ciment Portland se compose d'environ 50 % de silicate tricalcique ( $C_3S$ ), 20 % de silicate bi-calcique ( $C_2S$ ), 5 % d'alumino-ferrite tétra-calcique ( $C_4AF$ ) et 15 % d'aluminate tricalcique ( $C_3A$ ).

Lors de l'hydratation du ciment, une forte teneur du composé  $C_3S$  contribue à l'augmentation rapide de la résistance au jeune âge avec un fort dégagement de chaleur. Cette réaction exothermique est accentuée par la présence de  $C_3A$  qui constitue un élément chimique essentiel dans la fabrication du ciment et pour l'obtention d'une éttringite homogène en combinaison avec le composé  $C_4AF$  [1]. Cependant, ces gradients thermiques sont la source de fissuration au sein de l'élément de béton car la température peut atteindre  $70^\circ\text{C}$ . Le pourcentage de  $C_3A$  doit être alors le plus faible possible car il est également plus vulnérable aux sulfates et sa forte teneur implique un dosage plus important en gypse. Même si l'action du gypse peut entraîner un fluage plus important du béton à court terme (dû à la finesse du liant), il ne possède aucune influence à long terme. Seul, le composé  $C_2S$  agit sur le comportement à long terme du béton car sa réaction est plus lente. Il contribue principalement au développement de la résistance. C'est pourquoi les bétons du début du 20<sup>ème</sup> siècle, à forte teneur en  $C_2S$ , ont développé une résistance à long terme, deux fois supérieure à celle obtenue à 28 jours. Actuellement, les bétons confectionnés possèdent une teneur en  $C_2S$  nettement plus faible qui ne permet pas de tenir compte d'une augmentation de la résistance au delà de 28 jours mais plutôt, d'une diminution après 10 ans de maturité [1].

Pendant la réaction chimique du ciment au contact de l'eau, deux principaux hydrates se forment par pression-dissolution. Les hydrates de silicate de calcium (CSH) correspondent au principal hydrate formé de la pâte de ciment et tissent le réseau résistant. La Portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  libérée par l'hydrolyse des silicates de calcium ( $C_3S$ ),

forme de minces plaques hexagonales de l'ordre du micromètre (figure 1.1(b)). Elle se forme entre les feuillet de CSH en grande quantité dans les zones d'interface entre le granulats et la pâte de ciment. Ces particules d'hydroxyde de calcium permettent de colmater les fissures par carbonatation [1].

L'hydratation du ciment n'est jamais complète (60 à 70 % des particules sont hydratées). Isolées de tout contact avec l'extérieur, les particules anhydres peuvent attendre des années avant d'être enfin en contact avec un composé permettant l'hydratation. Un béton âgé de cent ans peut encore développer des réactions d'hydratation. La phase solide ou xérogel [2] obtenue par hydratation est beaucoup plus poreuse à l'interface entre le gel de ciment et le granulats. Cette couche d'interface de plus faible résistance, appelée aussi "auréole de transition" est composée de fines aiguilles d'étringite et de particules d'hydroxydes de calcium non réactives enveloppant le grain inerte (figures 1.1(a)). Elle est la zone de fissures prépondérante de par sa plus grande porosité (capacité de rétention d'eau importante accentuée par la porosité du granulats) et sa structure fragile en aiguilles qui lui confèrent une plus faible résistance aux efforts de traction et de cisaillement.



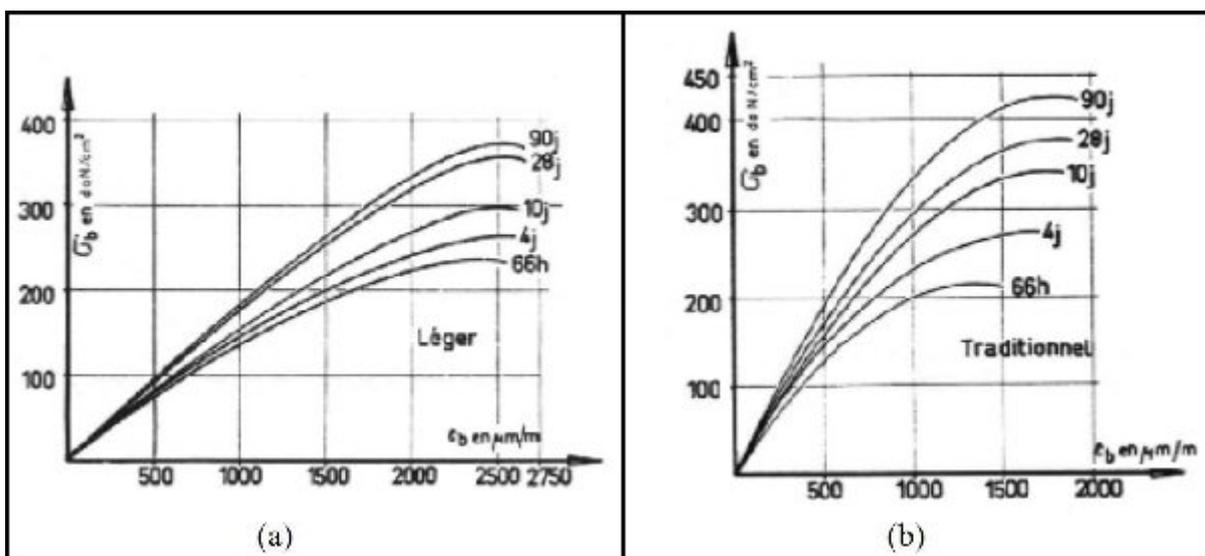
**Figures 1.1:** Structures microscopiques des particules de ciment hydratées :

(a) Aiguilles d'étringite à l'interface pâte de ciment – granulats

(b) Hydroxyde de calcium hexagonale (Portlandite). [Bertholet, 2003]

Quant aux granulats choisis pour le béton, ils sont de forme roulée (alluvions) ou anguleuse (issus de processus de concassage) et de composition siliceuse, calcaires ou silico-calcaires. Ils influencent principalement le comportement du béton par leur taille, leur porosité, leur propreté ou leur résistance. Les bétons de granulats légers présentent à la fois une forte porosité mais également un module de raideur plus faible. En conséquence, ils

possèdent une plus faible résistance et une capacité de déformation plus importante (figures 1.2) [3]. Le béton, caractérisé généralement par des essais à 28 jours, présente en vieillissant une configuration thermodynamique instable compte tenu des réactions chimiques encore possibles à long terme [2]. Au-delà d'une consistance plastique initiale au moment de la mise en œuvre, le béton développe tout au long de sa vie, une fragilité accrue caractérisée par une rupture plus brutale [4].



**Figures 1.2 :** Evolution de la résistance du béton du jeune âge à moyen terme compte tenu de la qualité des agrégats [3] :

- (a) granulats légers.
- (b) granulats de classe courante.

### **1.3 Les déformations du béton :**

Le béton est un matériau très complexe dans la mesure où il est à la fois hétérogène (mortier et granulats) et tri-phasique (solide, liquide, gaz). C'est cette complexité micro structurale qui est à l'origine des comportements macroscopiques spécifiques du béton : fluage, retrait, fissuration... [5].

#### **1.3.1 Variations dimensionnelles spontanées :**

Le durcissement de la pâte de ciment s'accompagne de variations dimensionnelles qui apparaissent dès les premières réactions chimiques, et qui peuvent être au cours des premières heures un gonflement, mais qui se traduisent presque toujours par un volume apparent final décroissant. Nous appellerons ce type de déformation le retrait endogène (ou d'auto-dessiccation, ou d'hydratation).

La réaction chimique de l'eau avec les composants du ciment est exothermique. Lorsque la température ambiante est inférieure à la température maximale atteinte dans le béton, le retour à l'équilibre occasionne un retrait thermique, fonction de l'écart de température et du coefficient de dilatation thermique du matériau.

Outre les phénomènes endogènes, les variations hygrométriques du milieu extérieur provoquent des déformations spontanées du béton, qu'on nomme le retrait de dessiccation, ou retrait de séchage. Lorsque le degré hygrométrique extérieur est inférieur à celui régnant dans la porosité du matériau, ce qui est le cas dans la plupart du temps, il s'agit effectivement d'un retrait, mais dans la situation contraire, c'est un gonflement [6].

### **1.3.2 Déformations provoquées par un chargement :**

L'application de contraintes extérieures à un élément de béton lui fait subir des déformations instantanées et différées.

Généralement on divise les déformations différées en deux parties :

La première partie, appelée « fluage propre », représente les déformations dues au chargement du matériau, lorsque celui-ci est protégé vis à vis de l'absorption ou de la désorption d'eau.

La deuxième partie, appelée « fluage de dessiccation », est le complément par rapport au fluage propre des déformations dues au chargement, lorsque le matériau est exposé aux variations hydriques du milieu extérieur.

Ces définitions sont maintenant couramment utilisées. Cela veut dire que l'on peut isoler chacune de ces déformations par des essais spécifiques [6].

## **1.4 Le fluage :**

### **1.4.1 Définition et généralité sur le fluage :**

Conventionnellement, le fluage correspond à l'augmentation des déformations d'un élément de structure sous charge maintenue constante au cours du temps. Les déformations de fluage sont évaluées par la différence des évolutions dans le temps des bétons chargés et non chargés [7].

La découverte du fluage en 1910 a été révélée par **Eugène Freyssinet** qui l'observa sur un pont qu'il construisit à Le Veudre sur l'Allier (France) en observant une évolution des déplacements de la structure au cours du temps. En parallèle, il étudiait les méthodes de

précontraintes et montra qu'elles remédiaient en partie aux déformations différées. Mais, il cherchait aussi à établir les relations entre l'évolution des déformations et les propriétés des ciments et des matériaux. Ces travaux permirent de conclure que le fluage dépendait des mouvements de l'eau contenue dans le ciment et très tôt, il l'associa davantage à un retrait amplifié par l'état de contrainte qui accélérât la vitesse de déformation et par suite, le départ d'eau [8].

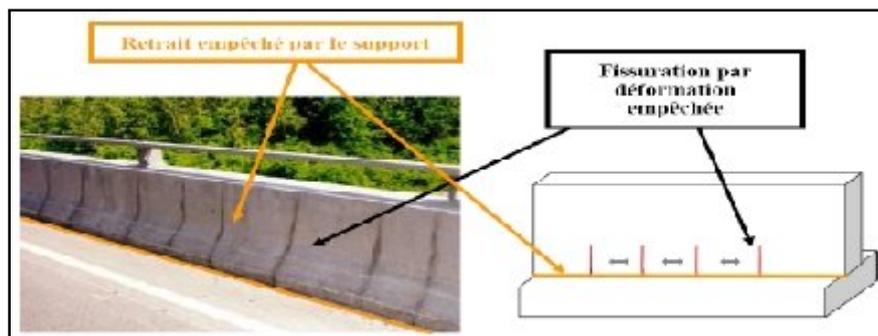
#### **1.4.2 Ses effets néfastes :**

Certaines déformations, par exemple les flèches des poutres des planchers, le tassement des poteaux...etc., mettent en danger les matériaux de revêtement qui adhèrent sur ces éléments (les murs de façades, les revêtements des planchers et les cloisons de distribution), et imposent la construction de ces derniers sur des semelles déformables.

Dans ce cas, si l'on ramène l'importance des désordres à leur juste proportion, on peut dire que la sécurité de l'ouvrage n'est pas nécessairement en jeu, mais le point de vue esthétique en sera affecté : rupture de l'harmonie des lignes architecturales (fissures, décollement, soulèvement...etc.).

Par contre, sur un élément en béton précontraint, le fluage risque de menacer la sécurité. La tension initiale à donner aux aciers de précontrainte doit absolument être déterminée en tenant compte, de la chute de tension due au retrait du béton ou encore, à la redistribution des contraintes et des réactions d'appui dans une structure hyperstatique précontrainte.

Enfin, à l'échelle de la structure, les déformations peuvent être empêchées par des facteurs extérieurs (fondations, structures adjacentes, etc....). Les désordres observés sont alors la combinaison du blocage de ces déformations et de l'évolution des propriétés mécaniques du béton. On peut citer comme exemple courant celui d'un voile coulé sur un radier déjà hydraté et qui empêche donc les déformations du voile. Les désordres observés sont alors une fissuration verticale caractéristique des déformations empêchées dans la longueur. Ce retrait empêché est considéré comme un fluage en traction. Un exemple de cette fissuration observée sur un parapet de pont est présenté sur la figure (1.19).



**Figure 1.3** : Illustration de la fissuration par déformation structurellement empêchée cité par [CHAABANE A ,2008].

Donc, il est primordial d'estimer correctement les déformations différées au stade de la conception de l'ouvrage, pour minimiser leurs effets, d'où l'intérêt de maîtriser les méthodes de prévisions théoriques. De même, il est important de suivre l'évolution des ouvrages déjà construits pour pouvoir y intervenir à temps lorsque la situation l'exige, d'où la nécessité de perfectionner les techniques d'expérimentation et d'observation.

#### **1.4.3 Ses effets favorables :**

La distribution des tensions dans certaines zones d'éléments de construction est influencée favorablement par l'ampleur des déformations de fluage par rapport aux déformations élastiques. Le fluage permet une adaptation des ouvrages qui soulagent les parties en surtension. Cette intervention est dans ce cas très avantageuse aussi bien en compression qu'en traction.

On peut encore citer les possibilités d'adaptation apportées par la relaxation, et qui atténuent les risques de fissuration dus aux variations dimensionnelles empêchées.

Les qualités mécaniques et élastiques d'un béton soumis depuis plusieurs années à une charge permanente ne sont pas affectées. La résistance en compression et en traction et parfois supérieure sur un élément qui a subi le fluage.

#### **1.4.4 Les sources du fluage :**

Le béton est un mélange de particules inertes (inclusions) et de particules chimiquement réactives au contact de l'eau .Le mélange est donc partagé en deux phases : la pâte de ciment et les inclusions. En observant les propriétés mécaniques respectives de ces deux phases, on peut affirmer que la majorité des déformations de fluage est issue de la déformation de la pâte de ciment autour des granulats. Le taux de déformation possible de la

pâte dépend principalement de la présence et du transport de l'eau dans la matière poreuse (à travers les micros et macros pores) qui modifient les contacts et les liens entre particules et créent une source d'intensification ou de réduction du fluage [9].

En traction ou en compression, la déformation de fluage semble provenir d'une source identique ; à savoir la possibilité de glissement des CSH entre eux. Pour le béton, la présence des granulats joue un rôle important dans la cinétique des déformations de fluage en créant une interface "pâte – granulat" qui constitue une zone de cohésion de moindre résistance notamment en traction et en cisaillement et par conséquent, une source prépondérante de microfissuration [10].

Le mécanisme de fluage peut provenir d'autres sources. Si généralement, il est le résultat des mouvements de l'eau adsorbée et de sa migration entre les feuillettes de CSH, il peut aussi traduire des glissements cristallins, un écoulement visqueux de la pâte, la redistribution interne de l'eau, l'échange hydrique avec l'environnement extérieur, les microfissurations, la polymérisation des silicates (capacité illimitée de diffusion et de recristallisation des particules) ou éventuellement, la cassure des ponts cristallins [11]; [12]. Ces multiples sources du fluage ont donné lieu à la proposition de théories diverses.

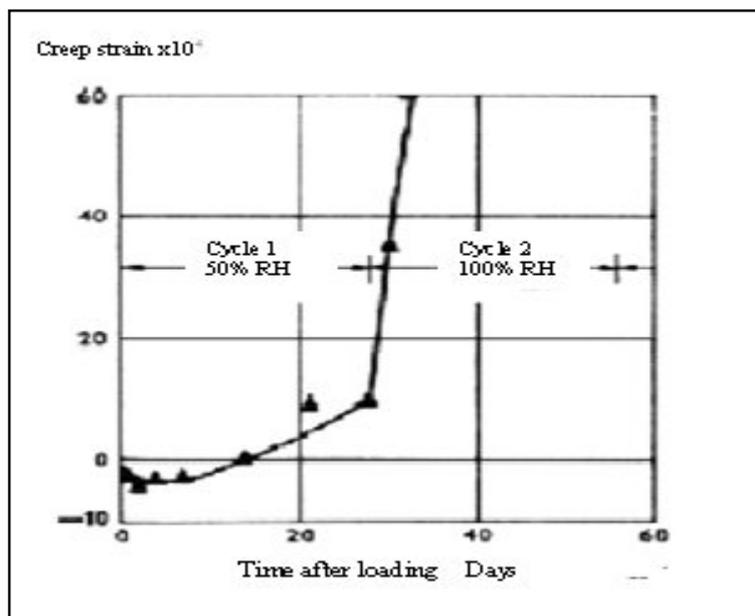
#### **1.4.5 Les théories de fluage :**

Eugène Freyssinet relia tout d'abord le mécanisme de fluage à la théorie de la dépression capillaire des ménisques aqueux situés entre les particules de ciment sous chargement [13]. L'eau, élément favorisant la viscosité, constitue la base des théories ultérieures. Puis, l'étude de différents types de béton a démontré que la cinétique de fluage dépend plus précisément, des mouvements de l'eau, par exemple, du cœur du béton vers le milieu extérieur [14]. Ces déplacements hydriques sont particulièrement remarquables sous faibles contraintes et dépendent de la valeur de l'humidité relative du matériau en chaque point de la matière [15]. Certains auteurs affirment même qu'aucun fluage n'est possible s'il n'existe pas une quantité d'eau évaporable dans la pâte [16].

Les théories qui suivent trouvent leur fondement dans la présence d'eau au sein du matériau, mais leur analyse a permis de ne pas les retenir. Néanmoins, nous les citons brièvement pour un rappel historique [13].

- La théorie de suintement ("seepage theory") associe le fluage à la consolidation de la structure poreuse par départ d'eau sous charge. Cette idée n'est pas valide car on constate que

la contrainte de compression en condition d'équilibre hydrique, ne provoque pas de départ d'eau mais que le fluage propre associé (condition de confinement, sans séchage) est loin d'être négligeable. En parallèle, des essais de fluage en traction sur des éprouvettes au jeune âge, mettent en évidence une accélération de la vitesse de fluage lorsque l'humidité relative est augmentée (figure 1.4) ; ce qui annule cette théorie au moins dans le cadre d'efforts de traction [13].



**Figure 1.4 :** Evolution des déformations de fluage en traction avec variation hygrométrique au jeune âge (7 jours) [ROSSI P, 1988].

- La théorie de cisaillement visqueux ("viscous shear theory") est basée sur la possibilité de glissement des particules de la pâte de ciment liées par une interface hydrique. De plus, la migration de l'eau aurait tendance à accroître le taux de glissement et créerait des dérangements de la structure poreuse. Des tests de perméabilité ont cependant démontré l'indépendance du flux hydrique vis-à-vis de l'amplitude des déformations de fluage.

- La théorie de l'effet de vitesse avec énergie d'activation ("rate process theory") correspond à la tension de surface produite par le séchage des pores. Cet effort sollicite la microstructure en compression et les déformations semblent liées à une dépendance du taux de fluage sur la contrainte. Cette explication proposée par **Wittmann**, ne reste valide que pour des chargements en compression.

- Enfin, **Powers** démontre que les molécules d'eau contenues à l'interface des feuillettes de CSH peuvent transmettre de fortes pressions dans un état d'équilibre et en même temps

mobile (en cours de séchage). Le fluage serait issu de la diffusion des molécules d'eau de l'intérieur vers l'extérieur de l'interface des feuillets (ou inversement). Le taux de fluage secondaire s'explique ici et son évolution ralentit lorsque la teneur en eau chute.

L'incidence de l'eau vis-à-vis du mécanisme de fluage met en évidence plusieurs types de fluage (fluage propre, fluage de dessiccation, fluage transitoire, etc.).

#### **1.4.6 Le fluage propre :**

Dans des conditions de température et d'hygrométrie en équilibre avec les caractéristiques internes du matériau (système thermodynamique fermé) (température, teneur hydrique, etc.), le béton sous chargement présente des déformations de fluage propre (Basic creep) [13].

Si on souhaite étudier l'influence des échanges hydriques du béton, on retranche de la déformation totale de fluage, la part de fluage propre pour quantifier celle de dessiccation. L'expérience de **Kovler** présentée ci-après remet en cause cette possible partition des déformations en mettant en évidence l'influence de la quantité d'eau dans les pores qui représente un paramètre essentiel de la cinétique de fluage propre. La quantité d'eau étant plus faible, le taux de fluage diminue d'autant plus [18]. C'est pourquoi, au jeune âge, le fluage propre constitue une grande part des déformations différées [12]. Sa définition l'associe à une caractéristique intrinsèque au matériau et l'amène donc à coexister avec le retrait endogène [19]; [20]. L'évolution des deux mécanismes différés est alors inhérente à la composition du béton. Par exemple, à retrait endogène équivalent, les déformations de fluage propre sont deux fois plus importantes pour un béton de sable que pour un béton de granulats [14].

En termes de cinétique, les déformations de fluage propre n'atteignent pas de valeur asymptotique par le maintien d'un état hydrique intrinsèque au matériau [19]. Nous verrons à l'inverse, que les déformations de fluage de dessiccation tendent à se stabiliser à l'approche d'un équilibre thermo-hydrique (à l'exception des pièces de fortes épaisseurs pour lesquelles le séchage est infiniment lent laissant supposer continûment une teneur en eau constante) [21]. Pour des ouvrages dont le séchage est lent, le fluage propre peut-il être le seul à déterminer leur durée de vie à long terme ? Les conditions environnementales possèdent-elles un impact sur les déformations de fluage de séchage pour ces structures généralement massives ? [9].

Les mesures de déformations de fluage propre sont effectuées en créant un confinement du matériau vis-à-vis de l'extérieur (réalisé soit sur des éprouvettes, soit dans le

cas de pièces massives). Une pression de vapeur qui ne peut s'échapper, se produit en limitant les déformations de fluage dues à la dessiccation [9].

Ceci explique la dépendance des déformations de fluage propre vis-à-vis de la quantité d'eau évaporable dans le béton [9]. Les faibles déformations de fluage propre du béton à hautes performances (BHP) résultent d'un faible ratio E/C mais, constituent une bonne part du fluage total. Les déformations différées dues au séchage sont donc réduites mais également, le potentiel de fluage propre en traction, comme en compression qui est inhérent à la composition de béton. On constate que le pourcentage de déformation de fluage propre par rapport à l'amplitude de fluage total (propre et dessiccation) est aussi réduit [10].

#### **1.4.7 Le fluage de dessiccation :**

Quatre sources de fluage de dessiccation d'importance décroissante existent [18]; à savoir:

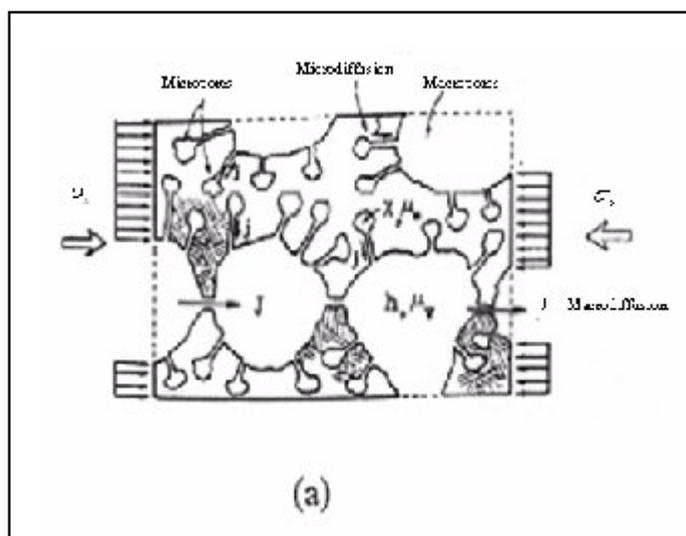
- le retrait induit par la contrainte (Stress-induced shrinkage),
- l'adoucissement de la déformation en traction par la progression de la fissuration,
- l'irréversibilité au déchargement due à la contraction après adoucissement,
- l'augmentation de la raideur du matériau due au vieillissement.

La composante d'autodessiccation générée par les processus d'hydratation, peut être négligée devant l'amplitude des déformations de fluage de dessiccation liées au séchage de l'élément de béton.

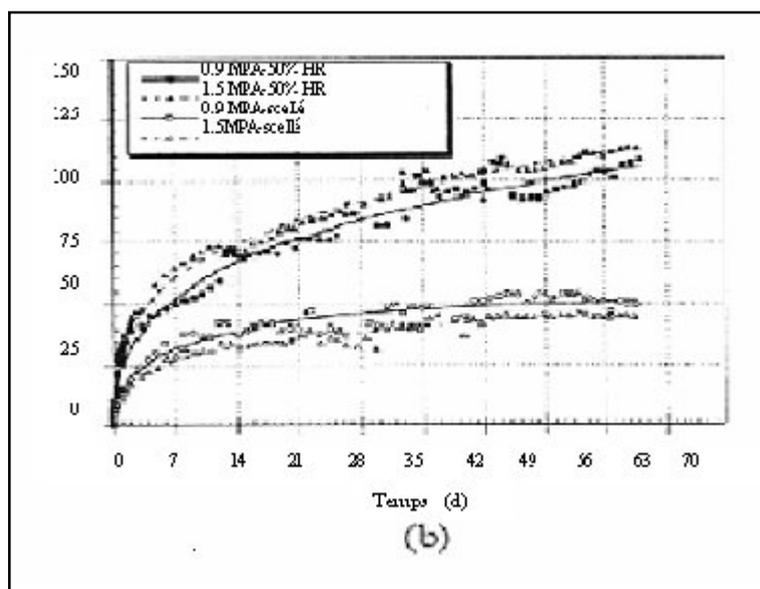
Le fluage de dessiccation est majoritairement présent dans deux types de configurations :

- La première coïncide avec la phase de retrait (contraction et séchage) qui s'effectue dans la première année après fabrication du béton. Au jeune âge, l'eau contenue dans les pores s'évapore par porosité ouverte (séchage) en intégrant le retrait du béton (contraction) (figure 1.5(a)). Le fluage propre devient alors plus faible car le béton s'assèche mais le départ d'eau provoque aussi des déformations de fluage de dessiccation par le passage d'un état humide à un état plus sec [21]. La durée du retrait effective correspond à l'assèchement de la zone de porosité granulaire ouverte. Notons ici l'existence de l'interaction entre la charge et le retrait qui provoque une déconnexion de la porosité fermée en une porosité ouverte pendant le temps de retrait. Un retrait moyen plus faible d'un spécimen non chargé en compression est la cause de fissuration dans les zones tendues (non relaxées en compression par fluage).

- La seconde configuration d'obtention du fluage de dessiccation est obtenue en plaçant le béton en déséquilibre thermo-hydrrique qui subit un séchage ou une réhumidification (figure 1.5 (b)). Si on suppose l'arrêt du retrait à partir d'un an de maturité du béton, il est difficile d'associer le "fluage de dessiccation" à un retrait amplifié sous charge au-delà de cette période. En revanche, les variations hydriques et hygrométriques possèdent une influence sur la cinétique de déformation du fluage au séchage (ou à la sorption) qui conduit à l'appellation confirmée de "fluage" de dessiccation [9]. En termes de cinétique, on observe des déformations de fluage de dessiccation deux fois plus grandes si le séchage est deux fois plus rapide.



**Figures 1.5.a:** Processus de diffusion à travers la pâte de ciment sous chargement appliqué [18].

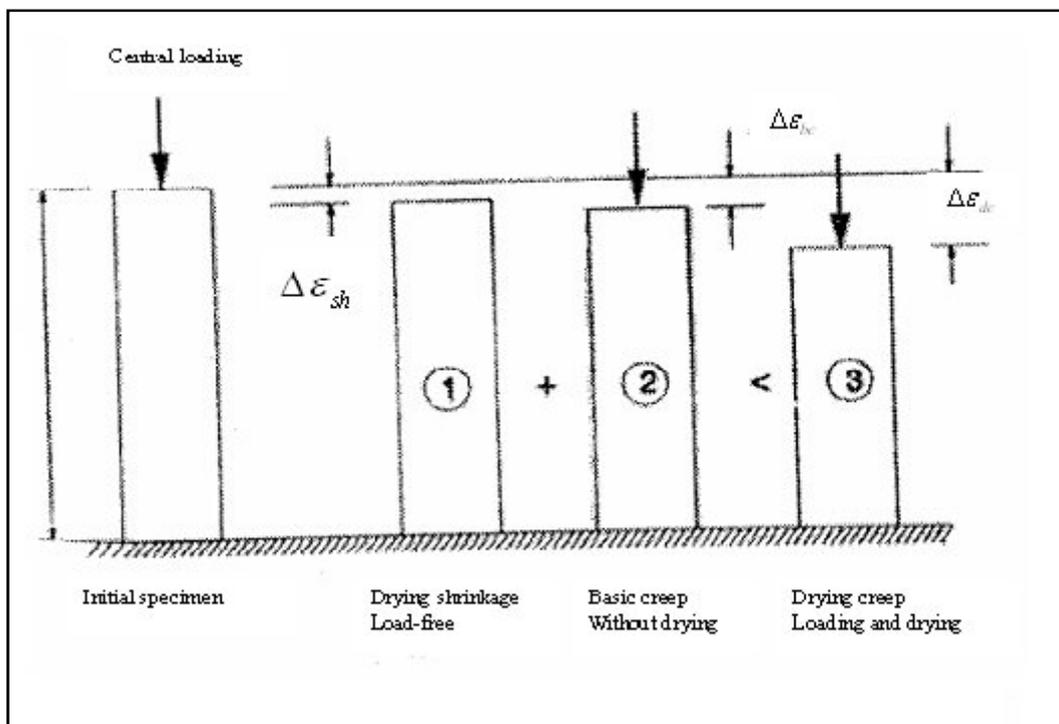


**Figures 1.5.b :** Déformations de fluage propre et de fluage total [45].

### 1.4.8 L'expérience de Pickett :

L'expérience de **Pickett (1942)** a permis de déceler l'existence d'une déformation de fluage supplémentaire à la composante de fluage propre en plaçant une éprouvette simultanément dans une configuration de chargement et de séchage (figure 1.6) [19]. Cet excès de déformation est appelé "fluage de dessiccation" (Drying creep).[7] en fournissant une définition du fluage qui repose sur l'hypothèse de l'égalité des retraits (ou des gonflements) des bétons témoins et des bétons chargés, confirme l'appellation "fluage de dessiccation" et non celle de "retrait de dessiccation".

Cependant, la terminologie interroge plusieurs chercheurs sur l'origine du "fluage de dessiccation". Comme le mentionnait **Eugène Freyssinet**, ce supplément de déformation au cours du temps d'un béton contraint et séchant, correspondait plutôt à un retrait amplifié sous charge.



**Figure 1.6 :** Expérience de Pickett [19].

La réflexion semble plus complexe encore. Tout d'abord, il est difficile d'affirmer que le fluage de séchage est indépendant du fluage propre puisque la valeur de la teneur en eau varie au sein de l'éprouvette. Cependant, l'amplitude des déformations du fluage de séchage est bien supérieure à la variation liée au fluage propre que l'on pourrait imaginer (par variation de l'eau interne). Kovler comme Bazant & al. Supposent donc en première approche, le fluage de dessiccation indépendant du fluage propre et que l'interaction majeure se réalise avec le

retrait dont la cinétique est liée au départ d'eau. Deux définitions du fluage de dessiccation sont alors établies. Le fluage de dessiccation pourrait être :

$$\text{- un excès de fluage au séchage : } \varepsilon_{dc} = (\varepsilon - \varepsilon_{fs}) - \varepsilon_{bc}$$

$$\text{- un excès de retrait au chargement : } \varepsilon_{dc} = (\varepsilon - \varepsilon_{bc}) - \varepsilon_{fs}$$

Avec  $\varepsilon$ , la déformation différée totale,  $\varepsilon_{dc}$ , la déformation de fluage de dessiccation (Drying creep),  $\varepsilon_{fs}$ , la déformation libre de retrait (Free shrinkage) et  $\varepsilon_{bc}$ , la déformation de fluage propre (Basic creep).

L'influence du fluage propre semble plus importante que supposée au départ et fait l'objet de l'expérience de **Kovler** qui mesure sous conditions confinées et de séchage, les déformations différées d'un béton en traction.

#### **1.4.9 L'expérience de Kovler :**

Dans les essais conduits par **Kovler** en traction, les cinétiques de déformation du fluage propre et du fluage de dessiccation sont mises en évidence. Les résultats émanant de ces tests, conduisent à la proposition de nouvelles définitions pour les déformations de fluage.

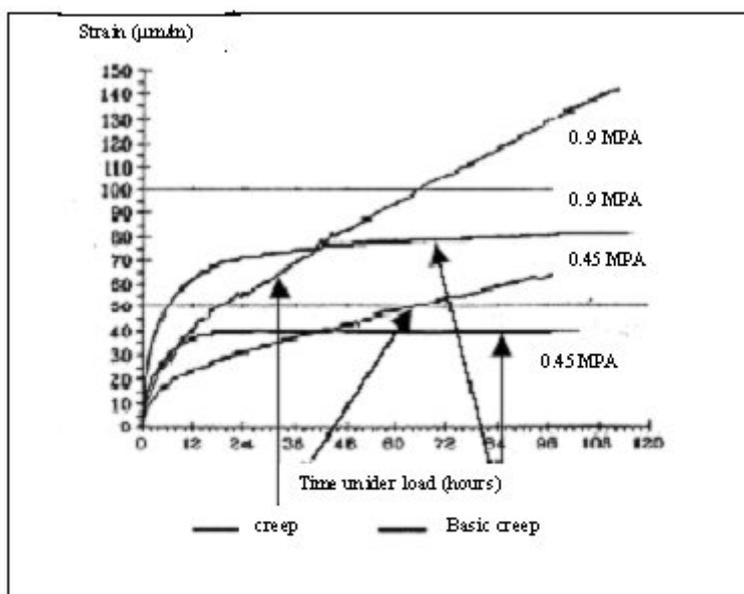
Pendant la première période du palier de chargement, les déformations de fluage de dessiccation (par différence des déformations obtenues sous conditions en air et confinées) tendent à amplifier les déformations de retrait (Retrait induit par fluage : creep-induced shrinkage). Ensuite, le phénomène s'inverse et on assiste à des déformations de fluage de séchage qui seraient dues à un fluage induit par retrait (Shrinkage-induced creep).

Ces nouveaux résultats conduisent à observer de plus près l'influence et la participation du fluage propre dans ce changement de mécanisme.

L'amplitude des déformations de fluage propre dépend de la quantité d'eau maintenue constante par les conditions de confinement. Ces déformations sont plus ou moins importantes comme la quantité d'eau contenue. Cette teneur peut être considérée comme un élément intrinsèque au fluage propre. Au séchage, l'implication des déformations de fluage de dessiccation contribue à un supplément de déformation. Comment alors expliquer que les déformations de fluage propre soient plus fortes pendant les deux premiers jours d'essai ? (Figure 1.7).

Lorsqu'une éprouvette est immergée, elle gonfle (Figure 1.8.a). L'humidification induit une plus forte teneur en eau et fournit une plus grande capacité intrinsèque du matériau à fluer. A l'inverse, une baisse de cette teneur en eau contribue à un ralentissement des déformations de fluage propre.

Lors des essais de **Kovler**, l'eau contenue dans l'éprouvette confinée ne peut s'extraire et induit un fluage propre plus large que si on considérait la teneur en eau effective du matériau en chaque temps (au cours du séchage). Cette différence de fluage au départ peut s'apparenter à un gonflement puisque que l'éprouvette confinée est plus humide. (Figure 1.8.a).



**Figures 1.7 :** Courbes de fluage total et de fluage propre pour deux contraintes de traction.

Kovler explique que la charge impose au spécimen un gonflement et précise qu'il serait dû à la libération des tensions de surface de l'eau des capillaires de la pâte de ciment par changement de pression de vapeur autour du ménisque de transition. Et, les plus fortes déformations de fluage propre résultent uniquement de la possibilité d'une conservation de la teneur en eau constante et élevée (système thermodynamique fermé) [12].

Pendant le test avec séchage, cette pression hydrique est libérée. A ce propos, on rappelle que les processus sont opposés si on augmente l'humidité relative. Ils sont analogues à une augmentation de déformation de fluage par gonflement ou par "recouvrance" des déformations de fluage au changement d'humidité relative (séchage) [18].

En retranchant la composante de gonflement de la cinétique de fluage propre, les courbes de déformations de fluage propre et de dessiccation deviennent très proches dans un

premier temps puis s'éloignent l'une de l'autre car la déformation de fluage propre évolue très peu alors que le processus de séchage continue (figure 1.8 (b)).

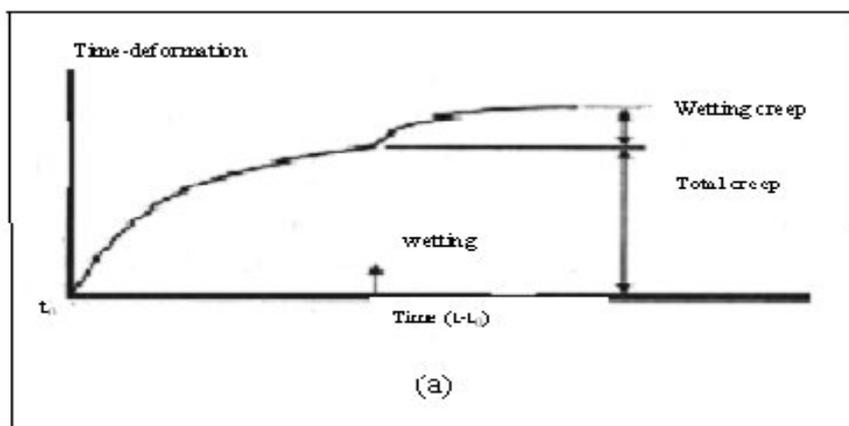
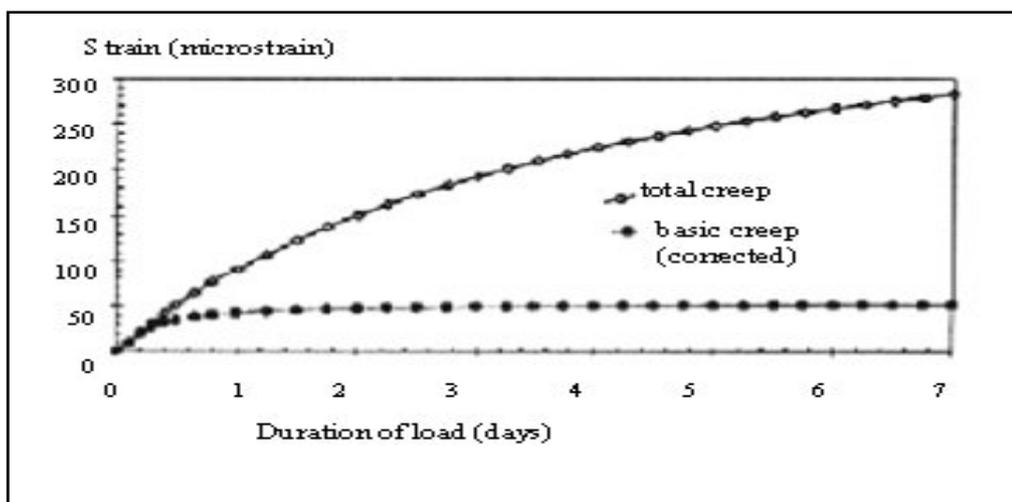


Figure 1.8 (a): cinétique de gonflement par fluage [9].



Figures 1.8.b : Déformations de fluage en traction totale et propre avec correction de l'effet de gonflement [9].

La déformation de fluage de dessiccation résulte donc uniquement du processus de "fluage induit par le retrait" (Shrinkage induced creep). **Bazant & Xi** l'associent aussi à une composante de microfissuration. **Wittmann & Roelfstra** suggère une participation maximale de la fissuration dans le processus de fluage de dessiccation. La contribution à l'excès de déformation au séchage est en grande partie due à la non-linéarité en traction et tout particulièrement, si la déformation se produit en phase d'adoucissement [18]. Après fissuration, il se produit une redistribution de contrainte importante.

L'association de la fissuration avec les déformations de fluage de dessiccation est aussi supposée par la constatation d'une fissuration plus dense de spécimens plus "secs" (l'énergie de fissure est plus faible) [17] et, par la localisation des déformations au niveau du frottement interne de la pâte de ciment durcie dont la teneur hydrique est plus faible [23]. Par exemple, les tests montrent qu'un des mécanismes possibles de fluage réside dans la rupture interne par sorption en immergeant des spécimens après une période de séchage.

#### **1.4.10 Mesure de la fissuration par fluage de dessiccation :**

La procédure d'essais d'**Altoubat & Lange** est destinée à la quantification de la fissuration du béton en cours de séchage. Trois essais sont réalisés en condition scellée (isolé, il n'échange ni énergie, ni matière), en condition d'humidité (fermé, il échange de l'énergie, mais pas de matière) et en condition de séchage (ouvert, il échange de l'énergie et de la matière). Le fluage propre est obtenu en condition d'humidité. Le "retrait induit par contrainte" (Stress-induced shrinkage) est déterminé par soustraction de la déformation du test scellé avec la déformation de fluage propre. Enfin, la microfissuration liée au séchage est calculée en retranchant de la déformation en condition de séchage, le fluage propre et le "retrait induit par contrainte".

#### **1.4.11 Le fluage à court terme et à long terme :**

Au jeune âge, l'eau contenue dans les pores s'évapore par porosité ouverte (retrait, fluage, perte d'eau et microfissurations). Ce transfert contribue à la déformation du matériau.

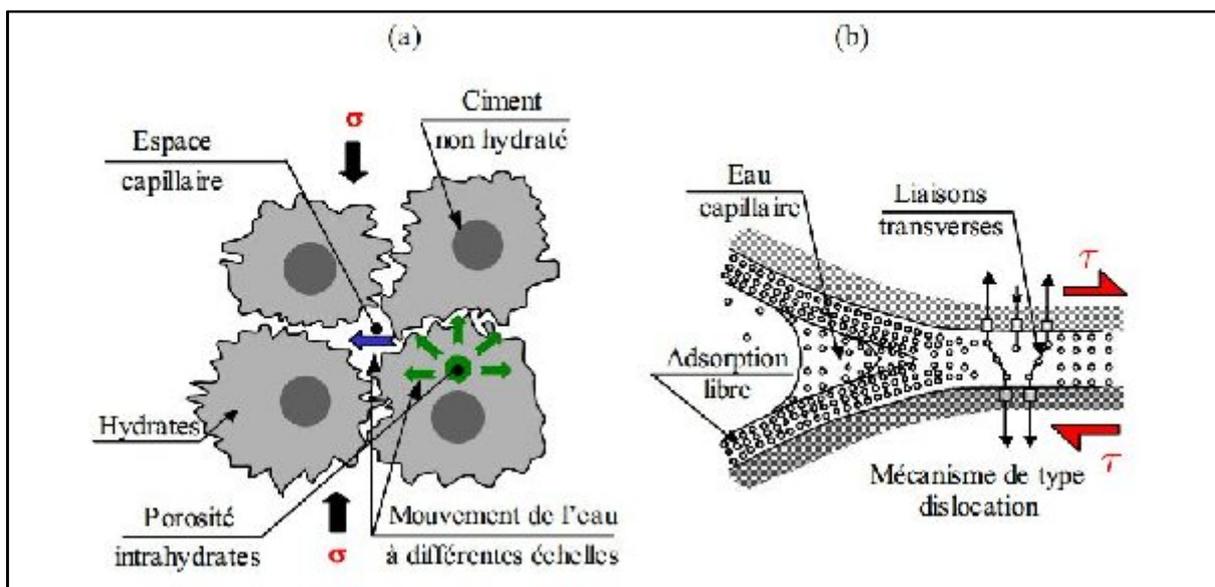
Les particules glissent aisément jusqu'au durcissement des unes par rapport aux autres. Un premier réarrangement de la matière s'établit. Sous charge, il se traduit par un processus de compactage de la matière. Le béton frais se déforme davantage sous contraintes que dans une configuration non chargée. Au cours du temps, la charge maintenant une pression autour de la porosité fermée et humide, réduit petit à petit la résistance des liens entre feuillettes par "pression-dissolution" des cloisons affaiblies. Puis, des zones de fermeture de la porosité se créent progressivement par hydratation de feuillettes de CSH au cours de la première année de mûrissement du béton. Le béton contenant encore de l'eau peut permettre le mouvement (glissement) des particules de ciment anhydre.

De nouveaux liens se créent et en particulier, à proximité des auréoles de transition où la compacité cimentaire est faible. Le potentiel de déformation est alors progressivement ralenti par l'hydratation et la prise progressive du ciment en créant une rigidité de la structure par la réaction chimique interne qui évolue continûment.

Dans sa théorie sur la solidification du béton (Solidification theory), **Bazant & al.** tentent d'expliquer le fluage par un processus imagé de maturation par assemblage de couches solidifiées au cours du temps. Ils émettent l'hypothèse d'une dépendance directe de la viscosité sur le temps. Le mûrissement du béton est expliqué par le mécanisme de déposes successives de nouvelles couches de solides issues de l'avancement de l'hydratation et procurant une raideur plus grande du matériau. Cependant, les déformations dues au vieillissement ou au mûrissement du béton, font l'objet d'un processus temporel à elles seules. Un état de contrainte appliqué pendant l'hydratation peut modifier l'arrangement des grains mais, il ne sera pas responsable de la réaction d'hydratation du béton. La vision simplifiée du durcissement par **Bazant** reste néanmoins acceptable dans la phase où le béton n'a pas atteint sa résistance maximale ; c'est-à-dire environ un an après coulage, même si **Hansen** en 1960 montre par ses expériences que des éprouvettes identiques chargées et non chargées s'assèchent aussi rapidement. Ce qui mettrait en défaite la théorie de la solidification. D'autre part, le béton ayant atteint sa maturité, l'idée de cette théorie paraît difficilement acceptable pour expliquer le fluage à long terme car le béton n'a plus ou très peu de gain de raideur.

Le mécanisme de fluage est encore mal ciblé à long terme. Les premières explications s'appuient sur la réduction de l'eau contenue dans le béton et sur l'accroissement de raideur du matériau. La pâte est soumise à des glissements de cristaux entre eux qui dégagent par frottement, plus de chaleur que si les cristaux se déplaçaient par interposition d'un film hydrique. Ce dégagement de chaleur entraîne le "dessèchement" des particules et la perte de cohésion de certaines d'entre elles, car leur lien hydrique est révolu. L'état de contrainte atteint la résistance en traction inter-particulaire du ciment. Ce processus reste très progressif et semble particulièrement relié au niveau de contrainte ainsi qu'à la vitesse de chargement.

L'hypothèse d'un phénomène de pression-dissolution des hydrates de ciment s'impose également comme ultime source de fluage à long terme et s'apparente à un processus de polymérisation [18] **BAZANT Z.P.**,. Enfin, une autre explication s'appuie sur la liaison des hydrates et l'implication d'une pression de disjonction à l'interface des CSH.



**Figure 1.9 :** Mécanisme de fluage propre proposé par Ulm et al, 1999: (a) à court terme, (b) à long terme cité par [24].

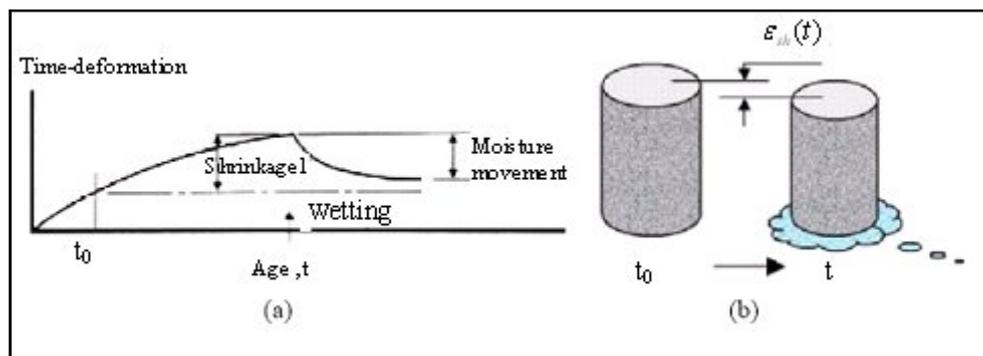
## **1.5 Le retrait :**

### **1.5.1 Définition et généralité sur le fluage :**

Le mécanisme de retrait du béton ne constitue pas notre thème de recherche principal. Cependant, son action différée interagit avec le mécanisme de fluage en modifiant le comportement du béton [9]. Cette interaction nous amène à la présentation du retrait du béton qui, même si elle n'est pas exhaustive, regroupe les principales sources du mécanisme ainsi que les cinétiques de comportement.

Par définition, le retrait se présente comme la réduction de volume liée au départ ou à la consommation d'eau au sein du béton non-contraint extérieurement (figure 1.10 (b)). Par opposition, un gonflement (*wetting*) s'observe par immersion de l'éprouvette (ou lors de conditions hygrométriques saturées) (figure 1.10 (a)) [7].

Les processus de diffusion hydrique du retrait tendent à se stabiliser à un an d'âge du béton. La déformation finale de retrait varie entre 500 et 1000  $\mu\text{m} / \text{m}$  sachant que la déformation élastique ultime en traction n'excède pas 100 à 200  $\mu\text{m} / \text{m}$  [10].



**Figures 1.10** :-(a) Déformation différée de retrait d'un spécimen non chargé : Illustration de la cinétique de retrait et, du gonflement par variation hydrique -(b) Variation volumique d'une éprouvette de béton au retrait. [29]

## 1.5.2 Les différents retraits du béton :

### 1.5.2.1 Retraits au très jeune âge :

Au moment du mélange du ciment avec l'eau, le retrait d'hydratation ou retrait chimique (à ne pas confondre avec le retrait hydraulique, ni avec le retrait de dessiccation) se produit par contraction ; c'est pourquoi, d'autres auteurs le nommeront "retrait de serrage avant prise" [7]. Ce premier retrait, mis en évidence par Le Châtelier en 1894 d'où la dénomination "Contraction de Le Châtelier", résulte d'une diminution du volume (8 à 12 % du volume initial) de la pâte formée par rapport à la somme des volumes absolus des anhydres et de l'eau [21].

Avant la prise de la pâte de ciment, il est possible d'observer un retrait d'évaporation ou retrait plastique [25], la limitation de ce retrait est souhaitée par des solutions de cure pour éviter une perte en eau excessive conduisant au phénomène pathologique de ressuage et à un arrêt prématuré de l'hydratation. En conséquence, une faible résistance du béton et une durabilité limitée à long terme seraient obtenues [10].

Ce syllogisme est évidemment une source de fissuration excessive au sein du matériau car l'amplitude du retrait plastique est très importante comparée à celle du retrait hydraulique (ou retrait endogène) et dépend de la géométrie de l'ouvrage [19],[2]. C'est le problème des bétons mis en place longtemps après gâchage et qui possèdent un retardateur de prise. La durabilité de ce type de béton est largement moins importante devant celle d'un béton gâché et mis en place immédiatement.

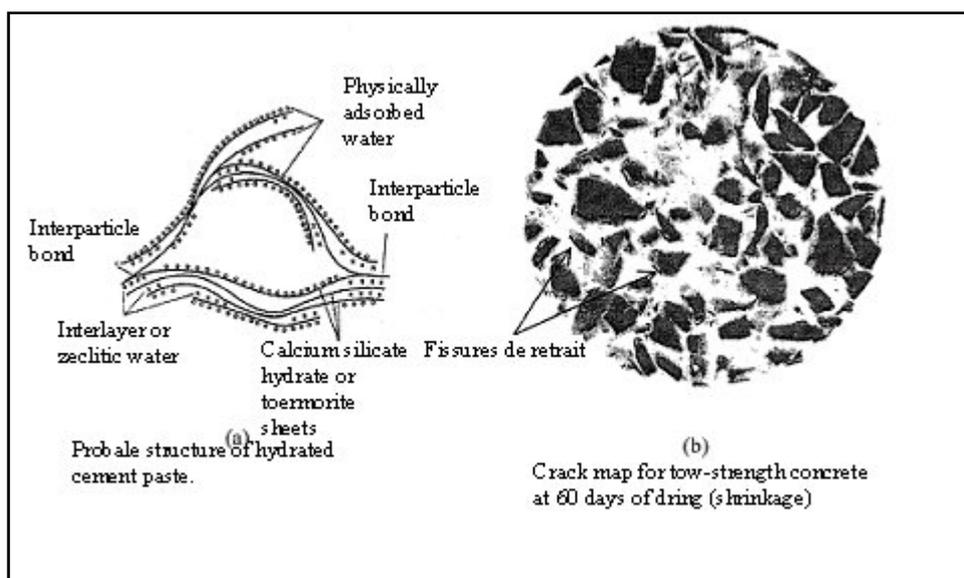
### 1.5.2.2 Retrait endogène :

Après la phase d'hydratation, le mélange "eau – ciment" à l'état de suspension se raidit. C'est la prise. Il se constitue une étroite où les particules de ciment se soudent, formant entre eux des ponts cristallins (figure 1.11 (a)). Cette étape coïncide avec le début du retrait hydraulique ou plus communément "retrait endogène", même si de nombreux hydrates de ciment ont déjà été formés dès le mélange [21] ce retrait est aussi qualifié de retrait d'autodesiccation. En effet, le squelette minéral formé après la prise s'oppose à la diminution de volume de l'hydratation croissante au sein de la pâte de ciment. La mise en pression du système cristallin conduit à la cavitation des pores et à un dégagement gazeux analogue à un départ d'eau.

Le retrait endogène est également influencé par le nombre et le type d'agrégats car, à l'interface "pâte – granulat", il est empêché par les granulats qui créent des zones de concentration de contraintes où vont se former les premières fissures (figure 1.11 (b)) [26].

Un béton de granulats calcaires concassés donnera un plus fort retrait qu'un béton de granulats quartzeux ou de granulats roulés [40]. Enfin, un ratio E/C plus faible produit un retrait endogène plus important [26].

Le retrait endogène est un des processus intrinsèques du béton car il ne dépend que des propriétés du matériau [21], par exemple, les composés du ciment  $C_3S$  et en particulier,  $C_3A$ , provoquent d'importants dégagements de chaleur lors de l'hydratation. Ils accélèrent le retrait dont on peut diminuer l'amplitude en réduisant principalement la teneur en  $C_3A$ .



**Figures 1.11 :** -(a) Ponts cristallins (Interparticle bond) lors de la prise [1].

-(b) Localisation des fissures de retrait sur la coupe d'une éprouvette [27].

### **1.5.2.3 Retrait thermique :**

La réaction d'hydratation peut devenir fortement exothermique et provoquer de forts gradients de température. Au cœur d'éléments massifs de structure, la température peut atteindre 50 à 70° C. Par conséquent, des retraits différentiels d'origine thermique vont s'ajouter pour obtenir l'équilibre de l'élément avec les températures du milieu environnant [7], [21].

La durée de la réaction d'hydratation est relativement courte puisque 60% de l'hydratation (en rapport avec la quantité de ciment qui pourra réellement être hydratée de l'ordre de 60 à 70% du volume de ciment) est obtenue au bout d'un jour et, 90% au bout de 4 à 5 jours. Par conséquent, le retrait thermique est effectif à très court terme.

### **1.5.2.4 Retrait de dessiccation :**

Le retrait de dessiccation ou retrait de séchage par définition, se traduit par un départ d'eau inhérent à l'équilibre hydrique du matériau avec l'atmosphère ambiante non saturée et ce, dès la mise en place du béton. Il possède une amplitude très importante devant les autres retraits. La contraction produite permet l'évaporation de l'eau en excès, nécessaire uniquement au malaxage du béton frais et dépend donc, de la teneur en eau initiale de la composition de béton. Le retrait de séchage est notamment diminué si la proportion "granulats/pâte de ciment" augmente [10]. Ce retrait hydrique n'est pas un processus intrinsèque du béton car les transferts hydriques du cœur de l'élément vers l'extérieur, amènent à considérer la taille et de la géométrie des éléments [21]. En particulier, de forts gradients hydriques sont maintenus longtemps au voisinage de la surface [21].

Le retrait de dessiccation dépend fortement de l'environnement hygrométrique et de ses variations (conditions de conservation) qui interviennent sur l'accélération ou le ralentissement du séchage. Selon le matériau et son épaisseur, le séchage peut prendre fin au bout de quelques années (structures massives) (figure 1.12) [10]. Pour les structures de faibles épaisseurs, le changement brusque d'ambiance par ré-humidification ou un séchage intense conduit à un endommagement du matériau en générant des efforts de traction trop importants devant la résistance effective du béton [28].

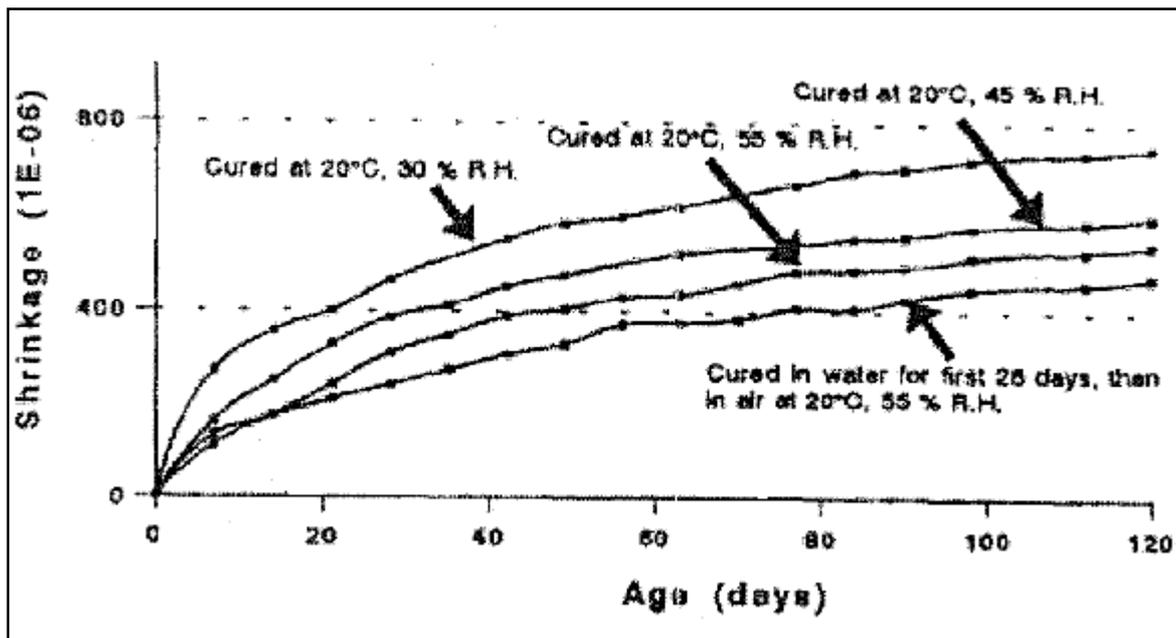


Figure 1.12 : Variation du retrait en fonction de l'humidité relative (RH%).

## CHAPITRE 2 PARAMETRES INFLUANÇANTS LE FLUAGE DU BETON

### **2.1 Introduction :**

Le fluage du béton est un phénomène très complexe qui dépend de nombreux facteurs. De l'avis de certains chercheurs, le nombre de ces facteurs atteint plusieurs dizaines [31]. Il est difficile de les prendre tous en compte et c'est néanmoins indispensable. Il faut aussi pouvoir apprécier le degré d'influence de tel ou tel facteur d'une façon non subjective. Les principaux paramètres ayant une influence sur le fluage sont :

*Les caractéristiques mécaniques du béton* (telles que la résistance en compression et traction, le module d'élasticité, les limites élastiques,...etc.) : ces caractéristiques sont fonction de la qualité du béton qui se détermine par les principaux facteurs suivants [32].

- a). la nature minéralogique des granulats (dureté, réactivité,...).
- b). la qualité des granulats (résistance, porosité, propreté,...).
- c). la composition granulométrique du béton qui se définit par les paramètres suivants:

- Le dosage en ciment,
- Le rapport gravier sur sable (G/S),
- Le rapport eau sur ciment (E/C),
- La nature et la qualité du ciment.

*Les paramètres résultants de la conservation du béton* qui sont l'hygrométrie et la température durant la vie de la structure.

*Les paramètres de définition du produit fini* : formes et dimensions de la structure, traitement de surface et armatures.

*Le mode d'application de la charge :*

- a. Sens d'application de la charge par rapport au sens de mise en place du béton

- (Perpendiculairement ou parallèlement aux couches de coulé),
- Grandeur de la charge appliquée,
  - Age du béton au moment de l'application de la charge,
  - Histoire du chargement.

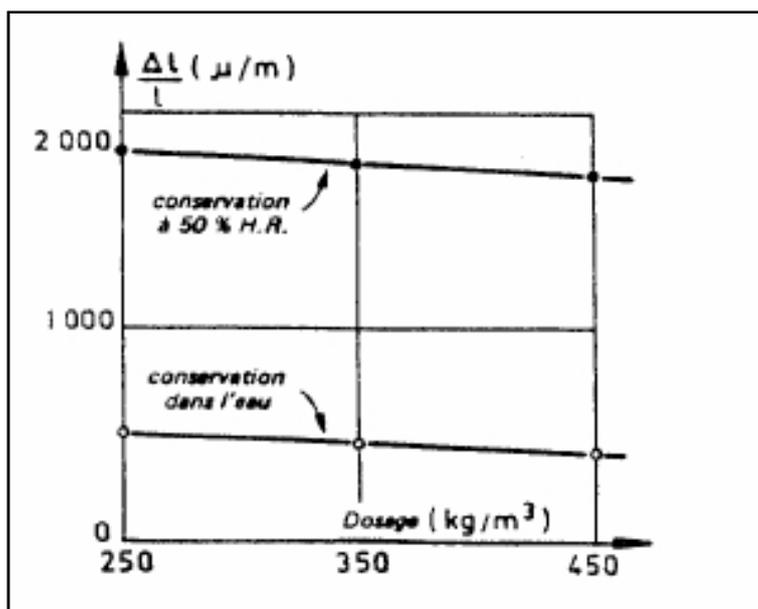
Les effets de ces différents paramètres sont généralement interdépendants et leur étude doit être couplée, pour tenter de définir quantitativement ou qualitativement leur influence. Nous allons examiner dans cette section quelques recherches expérimentales existantes dans la bibliographie, sur les paramètres qui influent sur le fluage.

## **2.2 Paramètres ayant un rapport avec les caractéristiques mécaniques du béton :**

Vu que le béton est un matériau fortement hétérogène, les caractéristiques mécaniques de celui-ci sont fonction des paramètres de composition. Il en résulte que le fluage est sensiblement modifié lorsque varie la nature et/ou le dosage des différents constituants.

### **2.2.1 Influence du dosage en ciment :**

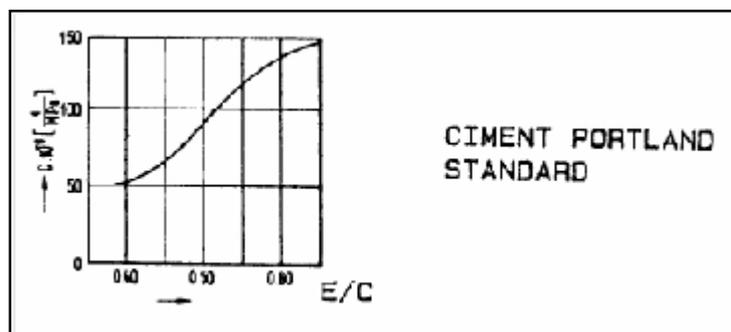
L'Hermitte constate que la déformation varie très peu avec le dosage du ciment dans le béton, avec toutefois une légère tendance à la diminution lorsque le dosage augmente. Les résultats montrés sur la figure suivante correspondent à des déformations obtenues sur des éprouvettes cylindriques (16 x 32) après 3000 jours sous 100 bars (figure 2.1) [35].



**Figure 2.1 :** Influence du dosage en ciment sur la déformation du béton [35].

### 2.2.2 Influence du rapport Eau / Ciment (E/C) :

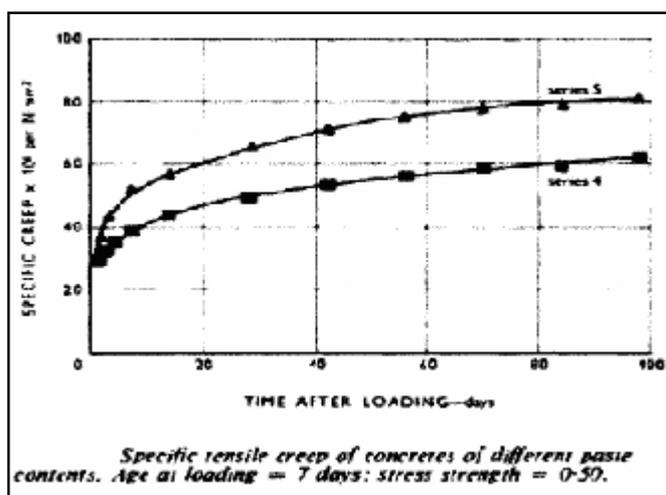
On constate que le rapport E/C au très jeune âge (âge où l'hydratation est peu avancée) n'influence pas vraiment les déformations de fluage [36]. Après quelques jours d'âge du béton, à rapport E/C croissant, il constitue un facteur d'affaiblissement de la résistance en traction et d'accroissement du fluage spécifique [37].



**Figure 2.2 :** Influence du rapport (E/C) sur le fluage spécifique du béton.

Les bétons à fort ratio E/C contiennent un pourcentage élevé de pores et possèdent donc une capacité de rétention importante de l'eau dans le béton. Or, plus la teneur en eau (évaporable) est importante, plus les déformations de fluage en compression comme en traction (fluage propre, en particulier) vont croître [38] ; [39]. Cette amplitude dépend aussi de la qualité du ciment et de la quantité de pâte effective du béton [36]. A ratio E/C constant, par exemple, on note une légère diminution des déformations avec un plus fort dosage en ciment [35].

A l'inverse, à quantité d'eau équivalente mais pour des dosages en ciment plus faibles, les déformations de fluage augmentent (figure 2.3).



**Figures 2.3 :** Dépendance du fluage spécifique  $C(t, t')$  en traction du ratio E/C (série 5 : E/C=0,55 ; série 4 : E/C=0,40) [40].

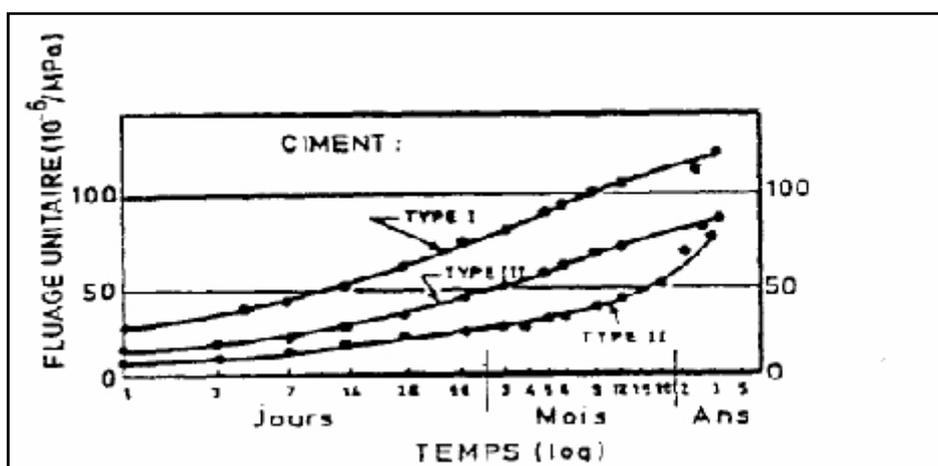
### 2.2.3 Influence de la composition et de la structure de la pâte de ciment :

La nature du ciment constitue un facteur important sur le fluage. Ce dernier dépend des propriétés physico-chimiques du ciment ainsi que de son degré d'hydratation et sa vitesse d'hydratation.

Au début des travaux expérimentaux sur l'influence de la composition et de la structure de la pâte de ciment, les chercheurs ont commencé par utiliser des éprouvettes en béton avec différents types de ciment, tout en fixant les autres paramètres (quantités et rapports des constituants, modalités de fabrication, conservation du chargement). Les résultats obtenus étaient différents avec un rapport entre les déformations de 1 à 3 (figure 2.4). La question qui vient directement à l'esprit : est ce que cette différence est liée aux changements des résistances entre les différentes éprouvettes ?

La différence constatée est due essentiellement au fait que la résistance du béton, à un âge donné, est différente selon la nature du liant (proportionnelle à la vitesse de durcissement). L'accélération du fluage du ciment alumineux après un an de chargement contredit l'idée d'une évolution asymptotique du fluage. L'ajout d'autres types de liants comme de la résine ou des polymères, augmente les déformations de fluage.

D'autres expérimentateurs se sont efforcés de maintenir le rapport contrainte/résistance constant pendant toute la durée du chargement, en augmentant la contrainte au fur et à mesure que la résistance augmente du fait de l'hydratation. La corrélation entre fluage et résistance mécanique est alors assez bonne tant qu'on ne fasse varier que l'âge des éprouvettes et le rapport eau/ciment.



**Figure 2.4 :** Fluages de bétons confectionnés avec différents types de ciment. Epreuves de béton chargées à 90 jours au tiers de leurs résistances. Rapport eau/ciment et granulats/ciment constants (respectivement 0,55 et 0,40) [1].

### **2.2.4 Influence du volume et de la teneur de la pâte :**

Certains résultats sont contradictoires. En effet, Domone (1971) a observé un comportement en traction similaire à celui en compression. Par contre, El-Baroudy (1940), ainsi que Ward et Cook (1969) ont constaté un accroissement du fluage en traction avec une diminution du volume de pâte. Ces dernières observations sont confirmées par les essais de Bissonnette (1996).

Dans les bétons, le fluage provient de la pâte de ciment, les granulats utilisés dans les bétons ordinaires ne présentent pas, ou que très peu, de fluage. Les granulats, comme pour le séchage, jouent un rôle de retenue. Le fluage d'un béton représente 10 à 15% du fluage de la pâte de ciment qui le constitue [1].

Il a été démontré, pour un même rapport eau/ciment, que le fluage en compression augmente lorsque la teneur en pâte augmente [1]. *Neville* propose la relation suivante où  $\varepsilon_f$  représente le fluage du béton,  $\varepsilon_f^p$  le fluage de la pâte qui le constitue,  $g$  la fraction volumique de granulats, et  $u$  la fraction volumique de ciment non hydraté.

$$\log \frac{\varepsilon_f^p}{\varepsilon_f} = \alpha \log \frac{1}{1-g-u} \quad \text{avec} \quad \alpha = \frac{3(1-\mu)}{1+\mu+2(1-2\mu_g)\frac{E}{E_g}}$$

$\mu_g$  et  $\mu$  sont respectivement les coefficients de Poisson du granulat et du béton et  $E_g$  et  $E$  leurs modules élastiques.

Ne perdons pas de vue que la variation de la fraction volumique en granulats d'un béton ordinaire varie peu. Lorsqu'elle passe de 65% à 75%, le fluage décroît seulement de 10% [1]. Par contre cette propriété peut être importante pour des bétons spéciaux tels que les bétons projetés ou les bétons autonivelants ou autoplaçants qui sont caractérisés par une plus faible teneur en granulats. Ils présenteront donc un fluage et un retrait en principe plus importants.

### **2.2.5 Influence des granulats :**

Le domaine des contraintes causant le fluage des granulats n'est pas le même que celui du béton. En considérant le béton comme un matériau composite à deux phases : pâte de ciment d'une part, granulats d'autre part, on peut prévoir que l'influence de ceux-ci sur les déformations différées sera double :

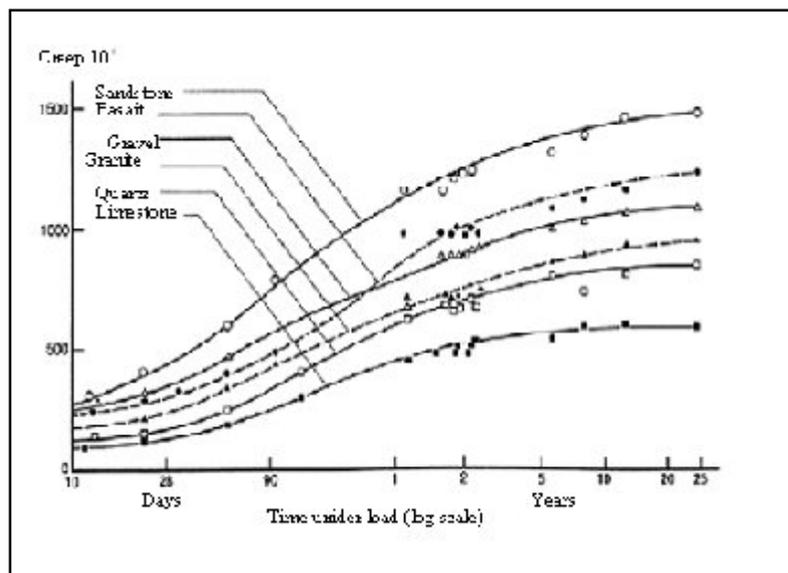
- Par la qualité : rigidité surtout, mais aussi forme, dimension, porosité et adhérence.
- Par la quantité qui modifie la part viscoélastique que constitue la pâte de ciment.

La fonction des granulats vis-à-vis du fluage est de restreindre les déplacements de la pâte de ciment [39] ; [41]. Leur taille et leur qualité sont particulièrement influentes sur l'état de déformation et de fissuration.

Souvent négligée, la qualité des grains influence véritablement l'évolution de la déformation de fluage. Il est remarqué que le fluage du béton peut augmenter du simple au double ou plus, suivant le type de granulats utilisés dans sa composition. Par exemple, pour un béton de basalte, la déformation correspond environ au double de celle d'un béton de quartz (figure 2.5). L'interface entre granulats et pâte de ciment peut aussi affecter le fluage à travers la production de microfissures à ce niveau, surtout lors d'une sollicitation en traction.

L'augmentation de la taille des granulats améliore la raideur du matériau en réduisant la capacité de déformation [42]. Pour exemple, le béton de sable développe des déformations de fluage environ deux fois plus larges que le béton de granulats [43]. Une granulométrie plus étalée (représentation de la gamme des poudres, en particulier) permet d'augmenter d'autant plus la raideur mais aussi la résistance. La dimension des poudres, de taille plus faible que le ciment (la fumée de silice, par exemple), contribue à une baisse de la porosité à l'interface entre la pâte de ciment et le grain restituant ainsi une meilleure cohésion d'ensemble à maturité.

A l'opposé, les granulats grossiers bloquent la déformation du liant, l'initiation de fissures et la vitesse de séchage. Leur rigidité étant très grande devant celle de la pâte de ciment, ils vont constituer une part importante de la raideur du matériau [Mc Creath & al., 1969]. Il est à noter que le fluage ne dépend pas uniquement de la déformabilité des granulats mais également de leur porosité. La présence des pores dans les granulats exerce une influence sur l'état hygrométrique interne du béton, et sur les mouvements de migration d'eau.

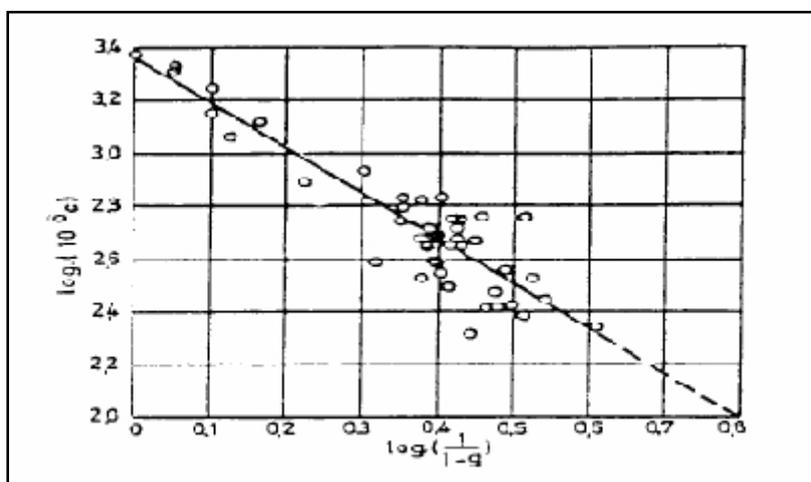


**Figure 2.5 :** Evolution du fluage dans le temps pour plusieurs types de granulats [1].

Logiquement, l'augmentation du pourcentage des granulats dans la composition du béton constitue aussi un facteur restrictif au développement du fluage. Pour étudier l'influence de ce facteur, et parmi les paramètres intrinsèques à retenir pour le fluage (en traction, en particulier), on choisit le ratio granulats/pâte de ciment dont la diminution entraîne un fort fluage spécifique [44] ; [36] ; [45] et parce que la source majeure de microfissuration du fluage en traction se situe au niveau des auréoles de transition. En opérant à E/C constant, pour ne pas modifier les caractéristiques de la pâte (ce qui réduit la plage de variation de g), on a pu retrouver la loi établie par PICKETT (1956) :

$$\log \frac{C_p}{C} = a \cdot \log \frac{1}{1-g}$$

Où  $C_p$  et  $C$  sont respectivement le fluage de la pâte pure et celui du béton (figure 2.6).



**Figure 2.6 :** Relation entre le fluage C et le dosage en granulats g.

Notons aussi que le fluage est d'autant plus faible que le module d'élasticité des granulats est élevé comme le démontre la (figure 2.7).

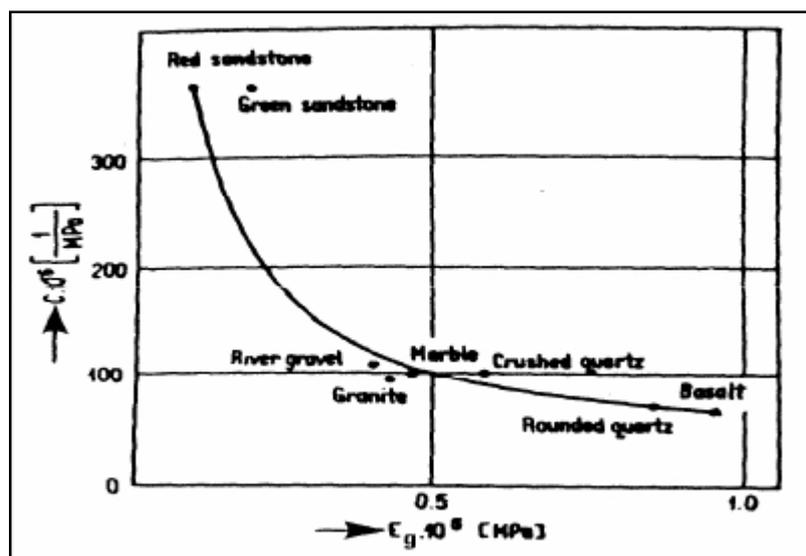


Figure 2.7 : Relation entre le fluage et le module d'élasticité des granulats [46].

### 2.2.6 Influence des ajouts :

Les ajouts sont reconnus comme des améliorants de la résistance du béton à long terme. Ce gain de résistance semble dépendre de l'implication des déformations différées (notamment de fluage) qui sont réduites par rapport au béton sans ajout [47]. Plusieurs types d'ajouts (laitier de haut - fourneau, cendres volantes, plastifiants et super plastifiants, fumée de silice, etc.) ont été testés et présentent des propriétés diverses vis-à-vis du comportement du béton.

Le tableau 2.1 résume l'influence des principaux ajouts sur le fluage et retrait des variétés de bétons.

**Tableau 2.1.** Influence des ajouts du béton sur le fluage et le retrait [48]

R : Pourcentage en masse de l'ajout par rapport à la masse du ciment.

Ingrédient	Fluage à même rapport contrainte – résistance		Retrait
	Propre	Total	
Laitier de haut-fourneau	Diminue avec l'augmentation de R	N'influe pas	Augmente avec augmentation de R
Cendres volantes	Diminue avec l'augmentation de R	Diminue pour R > 10 %	N'influe pas
Plastifiant et superplastifiant	Augmente de 20 %	Augmente de 20 %	Augmente de 20 %
Fumée de silice	Augmente pour R > 7,5 % N'influe pas pour R < 7,5 %	Augmente pour R > 15 % Diminue pour R < 15 %	diminue pour R > 7,5 % N'influe pas pour R < 7,5%

En ce qui concerne les fibres métalliques, tout le monde sait qu'elle peuvent couvrir les microfissures en retardant les macro fissures (cas de la traction), et les fissures obliques (cas de la compression), tout en assurant la capacité portante et la ductilité à influencer sur les

caractéristiques mécaniques de béton durci, parce que les fibres sont alignées favorablement à l'échelle de structure.

## 2.3 Paramètres résultants de la conservation du béton :

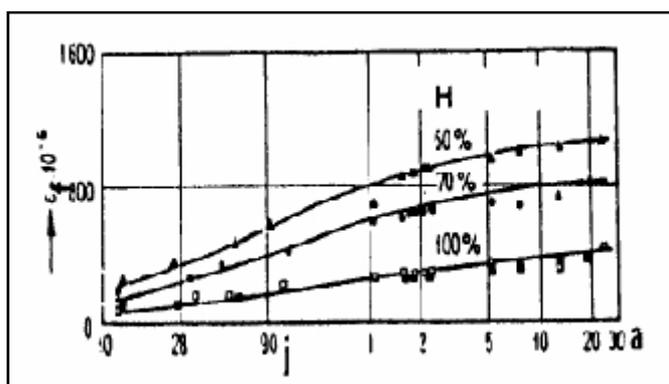
### 2.3.1 Influence de l'hygrométrie :

Le fluage d'un béton dans une ambiance sèche est supérieur à celui d'un béton conservé dans l'eau (figure 2.8).

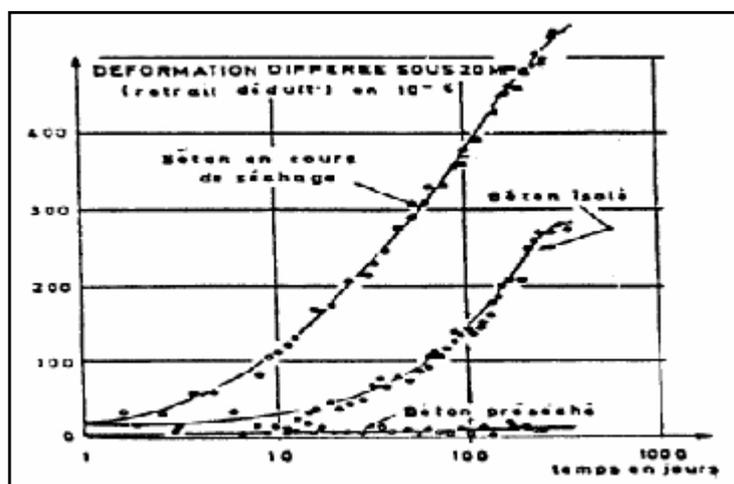
Le rapport de fluage est de 2 à 3 entre un béton conservé à 50 % d'humidité relative et un béton conservé à 100 % d'humidité.

Selon les expériences, le fluage est proportionnel à l'humidité ambiante relative pour une durée de chargement supérieure à 200 jours.

Le fluage dépend essentiellement des conditions de conservation des éprouvettes avant leur chargement : il est plus faible si les éprouvettes sont séchées avant l'essai de fluage, et d'autant plus fort qu'il leur reste à accomplir un séchage important comme le montre la (figure 2.9) [8].



**Figure 2.8 :** Influence de l'humidité relative sur le fluage du béton.



**Figure 2.9 :** Evolution du fluage suivant différents modes de conservation avant et en cours du chargement.

Initialement, le béton est quasiment saturé d'eau. Suivant les conditions d'environnement de ce dernier (atmosphère non saturée et atmosphère saturée), sa teneur en eau peut évoluer différemment. Donc, nous aurons deux cas de chargement d'éprouvette :

### **2.3.1.1 Chargement d'une éprouvette en équilibre hygrométrique avec son milieu :**

Le fluage obtenu dans des conditions d'équilibre hygrométrique est appelé fluage propre (basic creep). Moins d'eau donc moins de fluage.

En enlevant 40 % de l'eau évaporable, le fluage est divisé par 5. En séchant jusqu'à 105°C pour la durée de 7 jours on a obtenu un fluage nul en torsion pour les cylindres creux en mortier, dont l'épaisseur de la paroi est de 2 mm [49].

Plus l'hygrométrie est basse, plus le fluage propre est faible. En plus, pour deux hygrométries différentes, le rapport des recouvrances est égal au rapport des fluages [50].

*Bazant* a montré qu'au bout de 24 heures, des cylindres de pâtes ne sont pas encore en équilibre hygrométrique avec leur ambiance. Lorsque l'humidité relative passe de 100 % à 50 %, le fluage est divisé par deux.

### **2.3.1.2 Chargement d'une éprouvette en déséquilibre hygrométrique avec son milieu :**

La différence entre le fluage mesuré dans les conditions de déséquilibre hygrométrique et le fluage propre qui aurait eu lieu si l'hygrométrie initiale avait été maintenue, est appelée fluage de dessiccation (drying creep).

Dans la pratique, ce type de fluage l'emporte souvent devant le fluage propre.

Il y a fluage de dessiccation dès qu'il y a baisse d'hygrométrie, que ce soit avant (tant que le séchage n'est pas terminé), pendant ou après la mise en charge. Ceci est illustré dans le tableau 2.2 [51].

**Tableau 2.2.** Influence des conditions de conservation sur le fluage.

(Prismes de béton de section  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ , chargés à 6 MPa à l'âge de 60 jours)

<b>Conditions de conservation</b>		<b>Fluage relatif</b>
<b>Avant chargement</b>	<b>Après chargement</b>	
(a) Eau	Eau	1
(b) Air sec 45 – 50 % H.R.	Eau	2
(c) Air humide 65 – 70 % H.R.	Air humide	2,4
(d) Air sec	Air sec	3,2
(e) Eau	Air sec	4,2

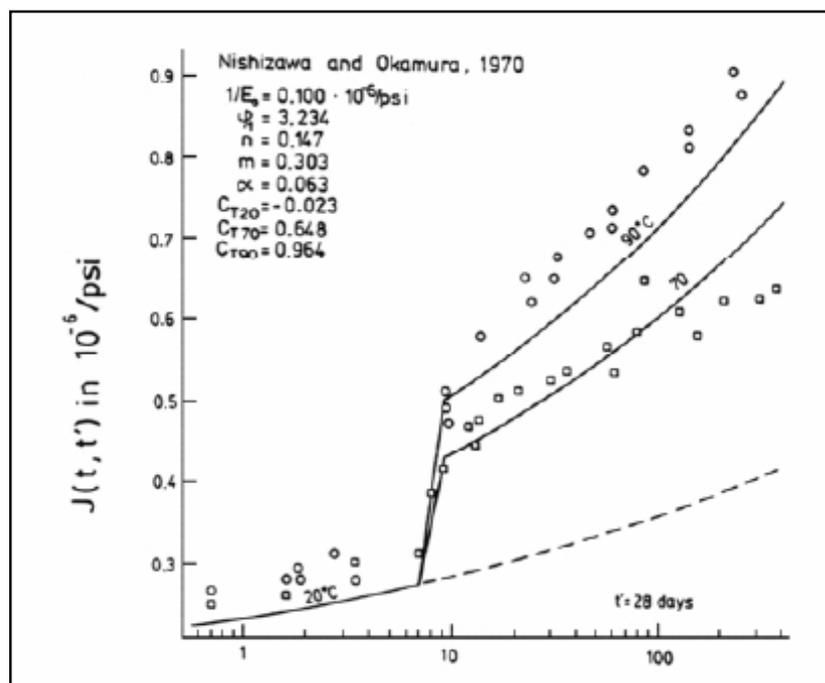
Ce qu'on peut dire à ce sujet c'est : ce n'est pas le pourcentage d'humidité relative, c'est à dire le degré de saturation de l'atmosphère – qui peut donner une idée sur l'intensité du fluage mais c'est la durée de conservation de la pièce dans le milieu à humidité relative variable ou constante avant et après le chargement, donc laisser le temps pour l'élément d'être en déséquilibre ou en équilibre hygrométrique avec son milieu.

### **2.3.2 Influence de la température :**

La température possède un effet non négligeable sur le mécanisme de fluage. On choisit généralement une amplitude et une cinétique de fluage de référence pour des températures analogues à celles de l'environnement, à savoir 10 à 20°C.

Si la température chute, les variations de comportement sont le plus souvent mises à défaut si la structure est sollicitée par les cycles gel-dégel. Si la température augmente la déformation de fluage est amplifiée sauf au jeune âge ou, une température élevée accélère le processus d'hydratation du ciment pour produire un durcissement plus rapide en ralentissement ainsi le taux de déformation.

Dans un cas de fortes sollicitations, l'élévation de température, associée à l'énergie de pression dans le domaine non-linéaire de comportement, produit une accélération des déformations d'autant plus élevée (figure 2.10) [29]. Si on atteint de très hautes températures, les ruptures des ponts cristallins qui sont responsables d'un plus grand fluage du béton se produisent en plus grande quantité [52]. Ces variations d'amplitude dépendent essentiellement de la variation de viscosité de la pâte de ciment. Une viscosité minimale de la pâte est obtenue à des températures avoisinant 30°C, voire 40°C.



**Figure 2.10 :** Etude de l'augmentation de la complaisance  $J(t, t')$  par élévation de température par Bažant & Panula en 1978 [29].

#### **2.4 Paramètres de définition du produit fini (Dimension du spécimen) :**

La quantité du fluage du béton est d'autant plus élevée que la dimension du spécimen est faible (figure 2.11). Le facteur déterminant est la surface du béton exposée à l'environnement à travers laquelle se produit l'échange d'eau. La différence du fluage entre éléments de dimensions différentes s'explique par un échange d'eau plus intense dans le cas d'une petite éprouvette.

La notion de l'épaisseur fictive  $d_f$  est souvent utilisée comme élément de comparaison entre spécimens de dimensions différentes.  $d_f$  est donné par :

$$d_f = \frac{2A}{O}$$

Avec :

A : est l'air de la section

O : est le périmètre en contact avec l'atmosphère

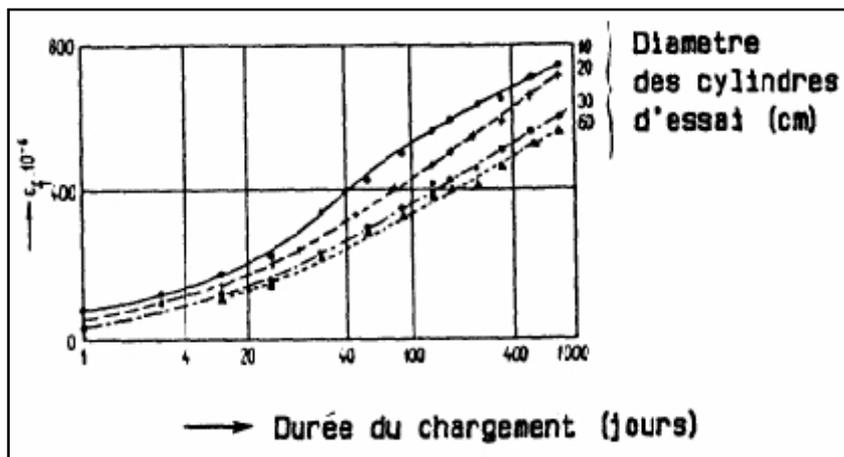


Figure 2.11 : Influence de la dimension des éprouvettes sur le fluage du béton.

## 2.5 Paramètres en relation avec le mode d'application de la charge :

### 2.5.1 Influence du rapport ( $\sigma/f_c$ ) :

Des bétons de composition différente développent des déformations de fluage dont l'amplitude peut être reliée à leur résistance (figure 2.12 (a)) [39]. Globalement, le taux de fluage comme la déformation, semble plus important pour des bétons de plus faible résistance. En revanche, à ratios de contrainte égaux  $x = \sigma / f_c$ , la déformation totale du béton est supérieure pour de plus fortes résistances (figure 2.12 (b)).

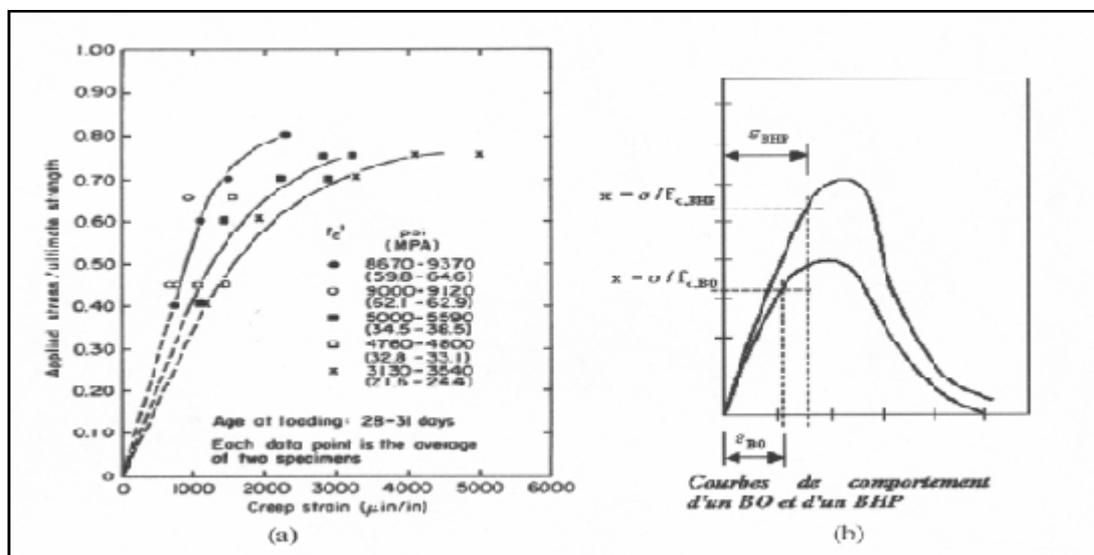


Figure 2.12 : (a) Amplitude des déformations de fluage en fonction de la résistance du béton – (b) Déformation d'un béton ordinaire (BO) et d'un BHP à rapport équivalent de contrainte [39].

D'autres auteurs estiment que, pour un béton donné, le fluage est proportionnel à la contrainte appliquée  $\sigma$ , et inversement proportionnel à la résistance du béton  $f_c$  à l'instant de la mise en charge.

La relation entre  $\sigma/f_c$  et la déformation de fluage est montrée sur la figure (2.13) pour différentes durées de chargement.

L'hypothèse de linéarité entre contrainte appliquée et déformation de fluage est valable pour  $\sigma/f_c < 0,4$  à  $0,5$ . Ce seuil est fonction de l'âge. Au-delà de 75 % de la résistance, l'essai sous chargement permanent conduit, à terme, à la rupture.

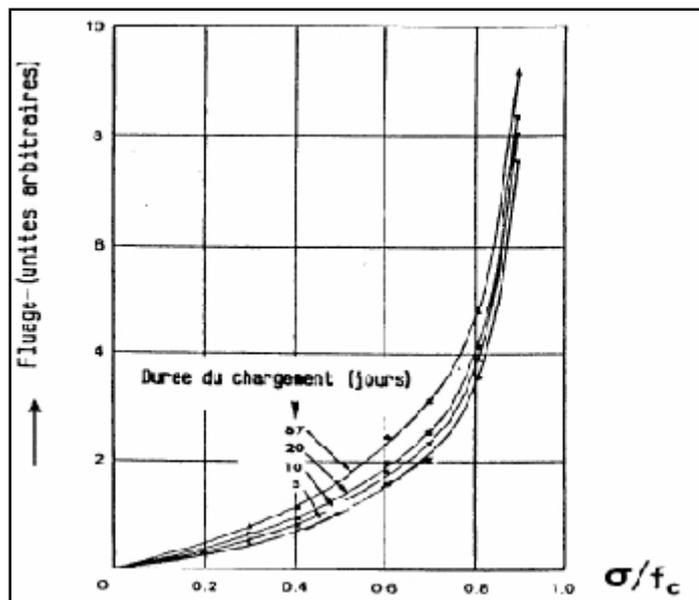


Figure 2.13 : Relation entre le rapport  $\sigma/f_c$  et la déformation de fluage.

### 2.5.2 Age du béton à la mise en charge :

Selon certains chercheurs, 80% à 90 % du fluage total se développe à la première année, et s'arrête au bout de la cinquième.

Certaines expérimentations montrent au contraire, qu'il y a fluage même au-delà de la vingtième année. Plus l'âge du béton à la mise en charge est avancé, moins est la valeur finale du fluage ainsi que son évolution dans le temps comme le montrent les résultats expérimentaux de la (figure 2.14) :

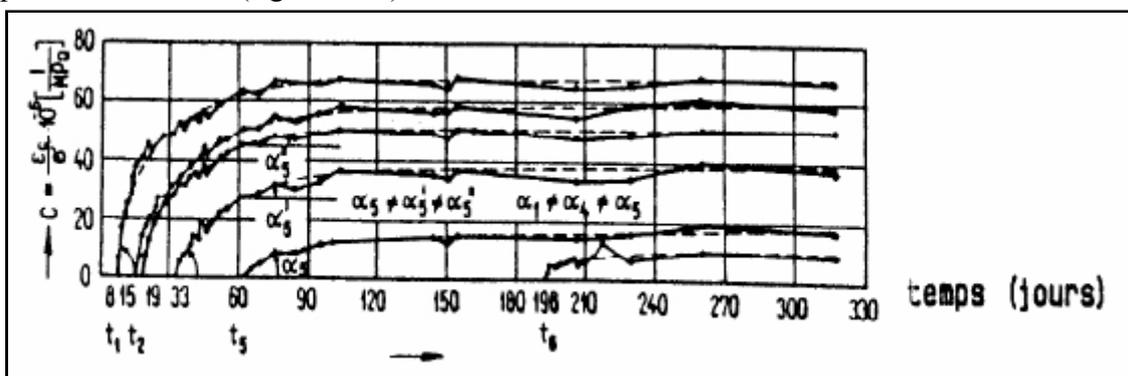
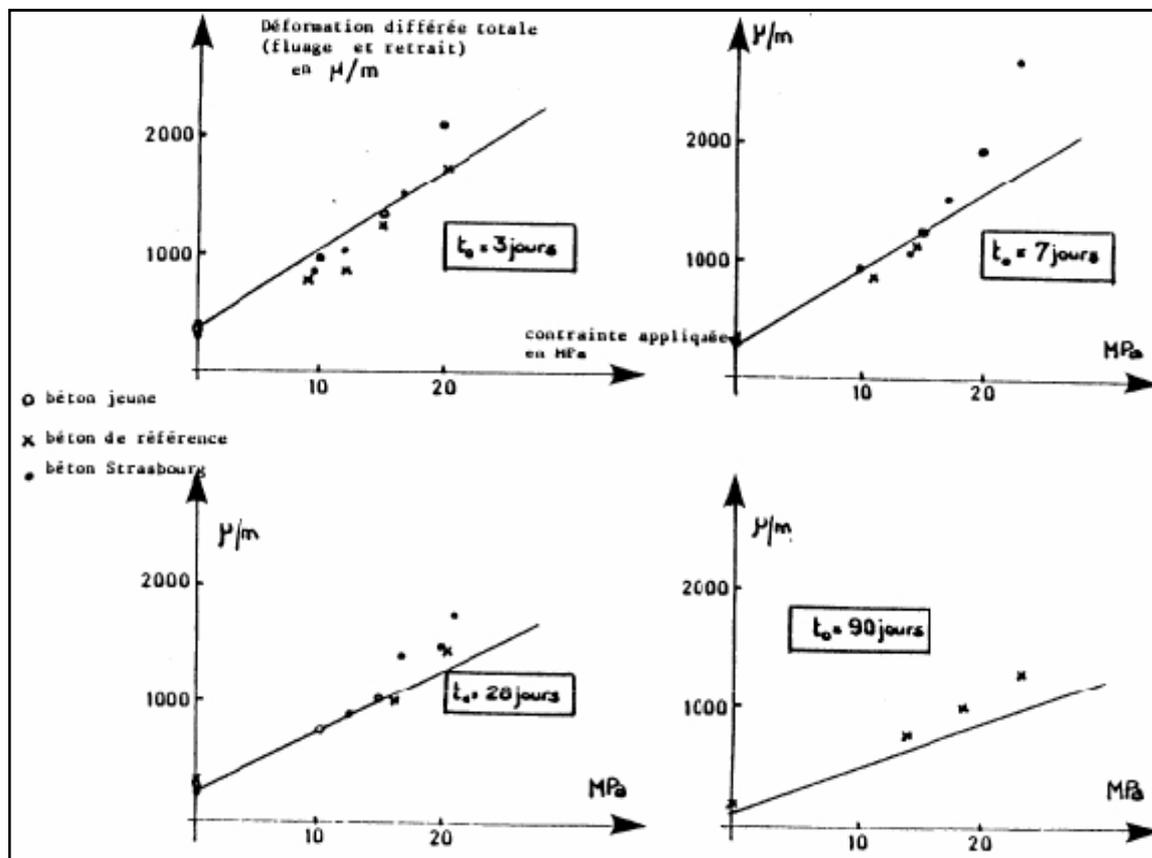


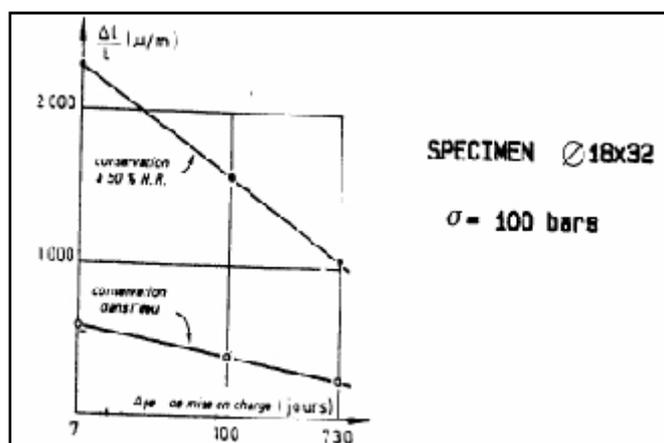
Figure 2.14 : Influence de l'âge du béton à la mise en charge sur le fluage.

Les essais de fluage et de retrait effectués au LCPC par Acker et Barral [53] sur des éprouvettes cylindriques ( $\phi 16 \times 100$ ) chargées en compression à différents âges, montrent une diminution des déformations différées totales avec l'augmentation de l'âge du béton à la mise en charge comme l'illustre la (figure 2.15) :



**Figure 2.15 :** Variation de la déformation différée totale avec l'augmentation de l'âge de trois bétons différents à la mise en charge.

Ce même constat est confirmé par les résultats de L'Hermite [35] montrés sur la (figure 2.16) :



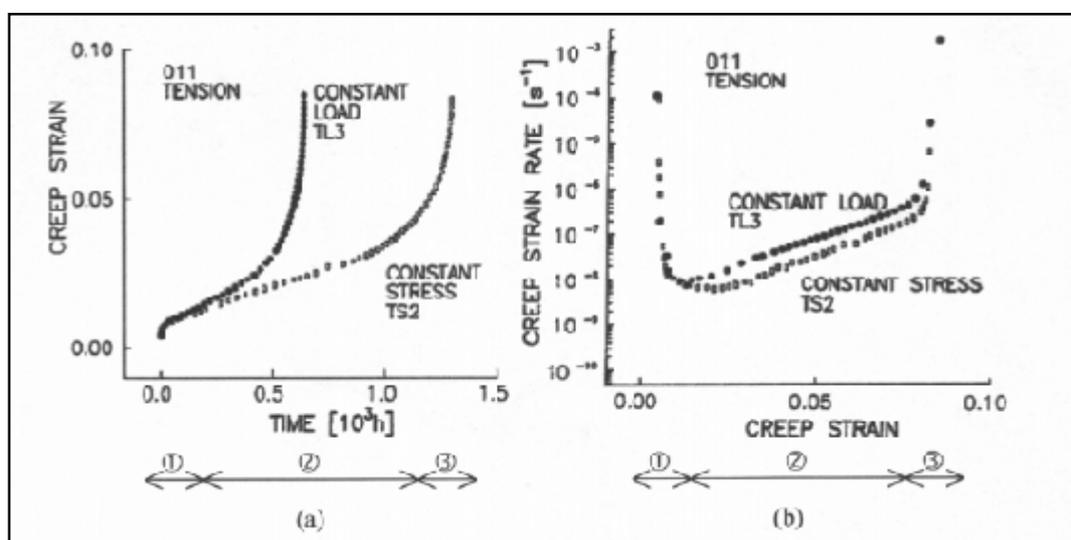
**Figure 2.16 :** Influence de l'augmentation de l'âge du béton sur le fluage avec différents modes de conservation.

### 2.5.3 Les déformations de fluage sous contraintes croissantes :

La déformation de fluage se décompose suivant trois phases d'évolution (primaire, secondaire et tertiaire) qui possèdent des caractéristiques différentes en termes de déformation (Creep strain), de vitesse de déformation (Creep strain rate) et d'accélération de la déformation. (Creep strain accélération) [54].

La cinétique de déformation de fluage présente des différences selon si on maintient constante une charge ou une contrainte (figure 2.17 (a)). Principalement, un écart visible sur la valeur de la vitesse de déformation de la phase de fluage secondaire est constaté. Les phases de fluage primaire et tertiaire restent peu sensibles à la distinction de contrainte constante ou de charge constante (figure 2.17 (b)) [55].

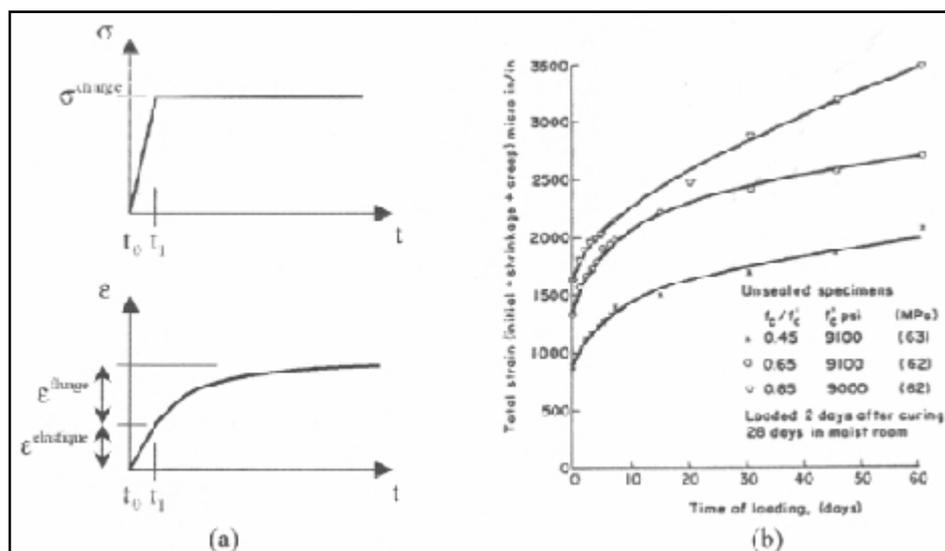
Généralement dans le cas réel des structures, la plupart des essais expérimentaux sur le fluage est conduite à charge constante et non à contrainte constante [53]. C'est pourquoi, même si les déformations de fluage sont obtenues sous charge constante, elles pourront provenir de certaines croissantes, dans le domaine non linéaire de comportement notamment. Sous charge élevée, la déformation peut conduire à la rupture par des contraintes excédent la résistance du matériau.



**Figure 2.17 :** (a) Evolution de la déformation de fluage sous charge et contrainte constante de traction, (b) Evolution du taux de déformation de fluage sous charge et contrainte constante de traction [55].

La mise en évidence des trois évolutions est possible par un test de fluage maintenant un niveau de charge élevé et constant, après une montée en charge rapide (instantanée) (figure 2.18 (a)).

Le plus souvent, l'état de contrainte global au sein d'une structure, reste relativement faible et n'engendre que les phases de fluage primaire à secondaire. Les déformations de fluage sont alors approximativement deux à trois fois plus importantes que la déformation « instantanée » (figure 2.18 (a)) [56]. Dans cette gamme de contraintes, le mécanisme de fluage a tendance à modifier le matériau en le compactant (figure 2.18 (b)) [57] ; ce qui lui confère un gain de résistance [34].



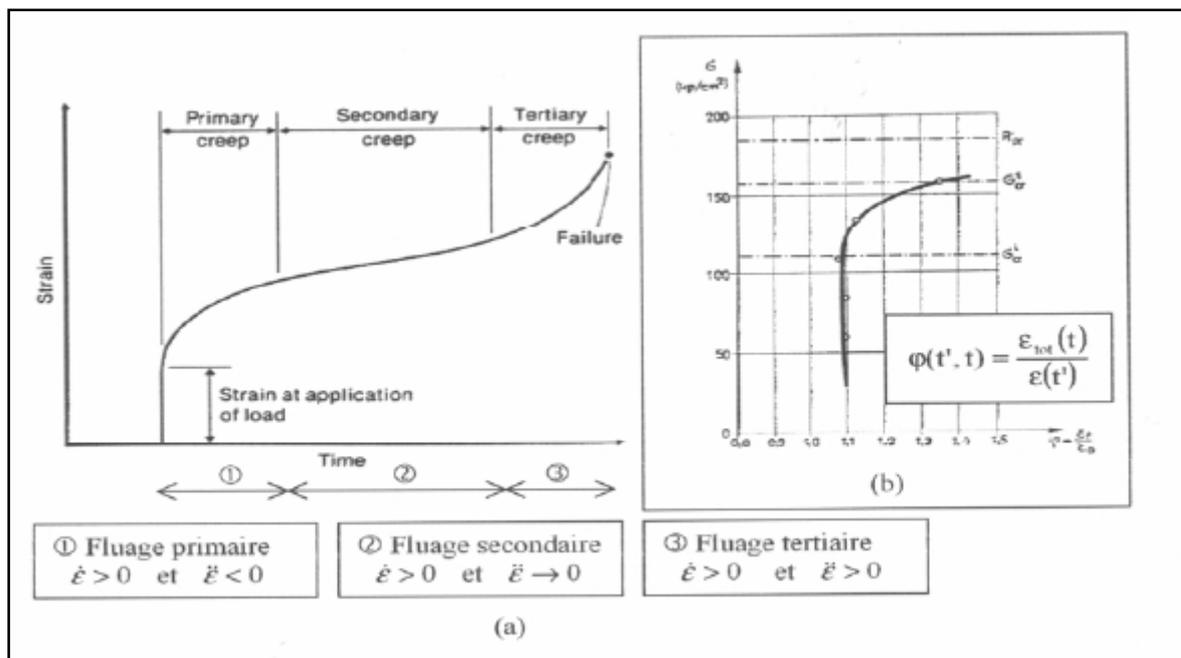
**Figure 2.18 :** (a) Test mécanique de fluage – (b) Déformation de fluage primaire à secondaire [58].

La déformation de fluage complète, c'est-à-dire, avec ses trois phases (primaire, secondaire et tertiaire) (figure 2.19 (a)) n'est observée que lorsque le palier de contrainte est établi pour des niveaux proches de la résistance [29]; [45].

Quel que soit la phase enclenchée, on remarque que la vitesse de déformation reste toujours positive. En revanche, pour ces trois phases de fluage, différentes accélérations de la déformation sont identifiées :

- Phase primaire : l'accélération est négative et influence la déformation à se stabiliser.
- Phase secondaire : l'accélération oscille autour d'une valeur nulle entraînant une évolution de la déformation à vitesse constante.
- Phase tertiaire : l'accélération devient positive. La déformation augmente rapidement en générant la rupture du matériau. On observe que les forts niveaux de contrainte génèrent une fissuration du matériau dont la progression modifie de manière

significative la déformation de fluage et notamment dans sa dernière phase (80% de déformation en plus par rapport à la valeur de déformation de fluage secondaire) [39] ; [59]. L'accélération positive dans cette ultime phase s'associe à un mécanisme de déformation dilatante du béton par croissance rapide de la microfissuration [29]. Les travaux de [57] confirment cette ultime cinétique de déformation par la représentation du coefficient de fluage  $\varphi(t', t)$  défini à partir de la déformation totale  $\varepsilon_{\text{tot}}(t)$  (au temps  $t$ , à l'observation) et de la déformation instantanée  $\varepsilon(t')$  (au temps  $t'$ , au chargement) (figure 2.19 (b)). A un niveau de contrainte proche de la rupture, la bifurcation de  $\varphi(t', t)$  indique le seuil de non-linéarité qui varie en fonction de la résistance du béton [39]. L'observateur du coefficient de Poisson dans la phase de fluage fournit une indication intéressante de la valeur de ce seuil. Lorsqu'il vaut  $\nu = 0.5$ , le niveau de contrainte est suffisamment élevé pour initier des zones de fissure au sein même de la pâte de ciment. Pour un béton, la présence de granulats semble différer, voire arrêter ces premières fissures à l'interface « pâte de ciment – granulat ». Dans le cas d'une pâte de ciment, cette barrière à l'ouverture de fissure est inexistante et la fissuration se propage plus rapidement en générant la perte de cohésion matérielle et l'instabilité de l'élément [29].



**Figure 2.19 :** (a) Evolution de déformation de fluage complète [60] – (b) Variation de coefficient de fluage  $\varphi(t', t)$  en fonction de niveau de contrainte [57].

#### **2.5.4 Influence du type de sollicitation (contrainte) :**

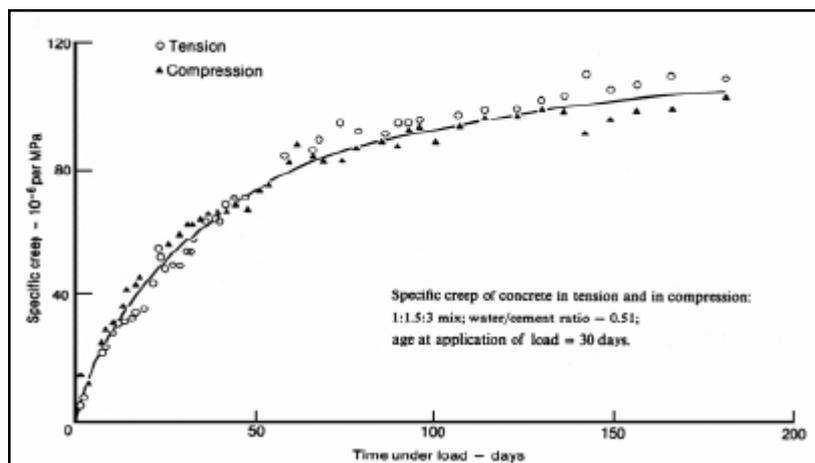
Le fluage du béton ne se manifeste pas seulement dans les essais de compression. Seulement, par difficulté de la réalisation des essais avec d'autres sollicitations, ces derniers

sont beaucoup moins nombreux. C'est pour cette raison que la plupart des essais de fluage que nous avons rencontré dans cette recherche sont des essais de compression simple.

#### 2.5.4.1 Cas de la traction :

Dans le cas de la traction simple, ceux en petit nombre qui existent, sont relativement contradictoires. Pour certains auteurs, le fluage en traction est pratiquement le même qu'en compression. Pour le fluage spécifique du béton  $C(t, t')$  (Specific creep) possède des valeurs très proches en compression et en traction (figure 2.20).

En revanche, en terme de déformation de fluage, la vitesse de déformation en traction est plus rapide qu'en compression (figure 2.21) [60] ; [45] ; [47]. L'amplitude finale des déformations en traction est pratiquement atteinte durant les premiers jours après l'application du chargement. En compression, cette évolution est nettement plus lente et progressive. A long terme, les déformations de fluage de traction et de compression tendent à se rejoindre pour obtenir des valeurs similaires.



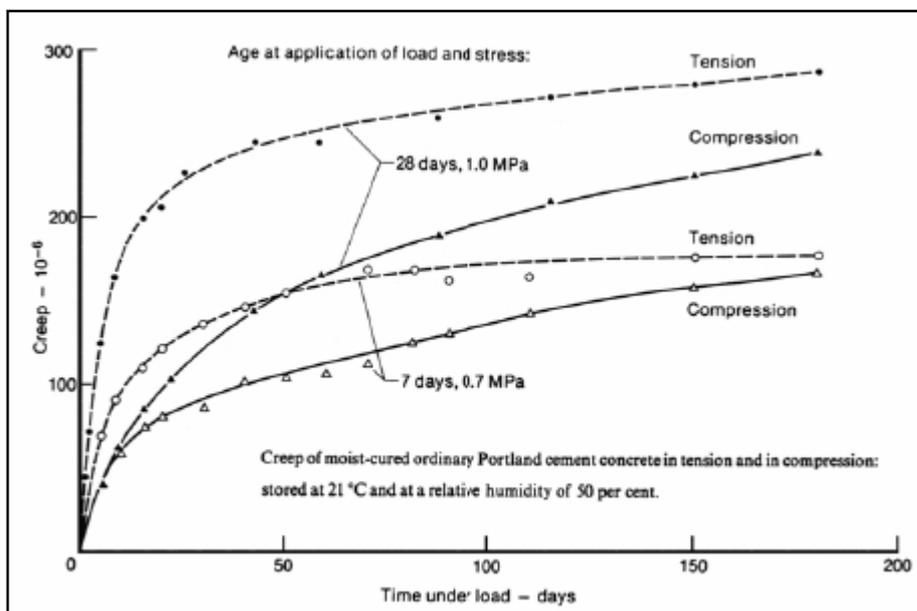
**Figure 2.20 :** Fluage spécifique  $C(t, t')$  en traction et compression [60].

Pour d'autres auteurs, le fluage en traction diffère sensiblement (20 à 30 %) du fluage en compression, voire même drastiquement.

Ces contradictions peuvent s'expliquer en partie par la difficulté des expériences en traction, ainsi que par la faiblesse des déformations à mesurer. L'origine de celle-ci revient à la déformation de rupture instantanée du béton qui est beaucoup plus faible que sa rupture instantanée en compression et n'excède pas 0.2 mm/m [60]. Il en résulte que le retrait libre, qui doit cette fois être ajouté à la déformation mesurée pour donner la déformation

mécanique, l'emporte en ordre de grandeur sur celle-ci aux contraintes modérées.

En relaxation, les résultats d'essais de traction sont pratiquement inexistant.



**Figure 2.21 :** Déformation de traction et compression à différents âges [60].

#### 2.5.4.2 Cas de la flexion et de la torsion :

Les relations entre traction et compression peuvent être tirées des essais de flexion. Certains auteurs ont trouvé qu'il existe de très grandes différences entre les déformations des faces tendues et comprimées (les sections planes avant déformation ne restent pas planes après déformation). Alors que d'autres confirment l'hypothèse connue.

Les essais de torsion sont les plus simples à réaliser. Déjà le signe de la sollicitation, importe peu contrairement dans le cas de traction et compression. Voir aussi que les déformations non mécaniques réellement n'affectent pas les résultats de la torsion, car celle-ci ne concerne que la partie isotrope du tenseur de déformation. Les résultats en torsion sont cependant très peu nombreux. On mentionnera particulièrement la méthode d'essai sur tube creux, définie par [61] et qui permet d'appliquer (simultanément ou non), des sollicitations de torsion et des sollicitations axiales. Cette méthode, destinée avant tout à l'étude de l'influence de l'humidité (voir l'influence des conditions de l'environnement) ne s'applique toutefois (du fait de la minceur de la paroi du tube : 0,7 mm) qu'à la pâte pure de ciment [50].

## **2.6 Les différents modèles de prédiction codifiés :**

Les structures en béton sont inspectées tout au long de leur durée de vie et présentent souvent des états importants de fissuration qui peuvent évoluer. Les ouvrages de confinement dont la fonction principale est celle de barrière de protection, sont très sensibles à la fissuration et à son évolution. La progression des fissures dans le temps constitue une pathologie de vieillissement qui est liée aux interactions du fluage avec le comportement non-linéaire du béton.

Le fluage de béton représente une partie de ces fissurations. Pour déterminer l'évolution de ce phénomène, il existe plusieurs modèles codifiés cités dans la littérature. On distingue les modèles américains et les modèles européens comme suit :

### **2.6.1 Les modèles américains :**

#### **2.6.1.1 Le modèle de fluage ACI 209 :**

Le modèle de fluage Américain ACI 209 possède peu de limites d'application. Il tient compte des caractéristiques du matériau. Néanmoins, il ne distingue pas les déformations de fluage propre et le fluage de dessiccation. (Annexe 1).

La fonction de fluage est sous la forme suivante :

$$J(t, t_0) = \frac{1 + \varphi(t, t_0)}{E(t_0)}$$

Où  $E(t_0)$  est la raideur tangente instantanée à l'âge  $t_0$  du béton au chargement.

$\varphi(t, t_0)$  est le coefficient de fluage.

#### **2.6.1.2 Le modèle de fluage SAKATA :**

Ce modèle a été développé par Mr *Sakata Shōichi* en 1933 puis d'autres chercheurs américains ont adopté ce modèle et ils ont introduit des modifications de forme afin d'obtenir en 1993 le modèle actuel. (Annexe 1).

La fonction de fluage est sous la forme suivante :

$$J(t, t_0) = \frac{1}{E_c(t_0)} + \varepsilon'_{cc}(t, t', t_0)$$

Et  $E_c(t_0)$  est calculé à partir du modèle CEB 90.

### **2.6.1.3 Le modèle de fluage GZ (GARDNER):**

Le modèle GARDNER est peu utilisé. Le module d'élasticité  $E_{c_{mto}}$  et la force de compression  $F_{c_{mto}}$  sont déterminés par des formules empiriques ce qui réduit l'exactitude des résultats, (annexe 1).

La fonction de fluage pour ce modèle est sous cette forme:

$$J(t, t_0) = \frac{1}{E_{c_{mto}}} + \frac{\varphi(t, t_0)}{E_{c_{mto}}}$$

Où  $E_{c_{mto}}$ : module d'élasticité du béton au chargement (MPa).

### **2.6.1.4 Le modèle de fluage B3 :**

Le modèle B3, développé par Bazant et Baweja s'applique exclusivement aux bétons fabriqués avec du ciment Portland. Le modèle concerne les bétons de résistances mécaniques modérées (17 - 67 MPa) et contenant des quantités de ciment comprises entre 160 et 720 kg/m<sup>3</sup>. Le rapport E/C (eau / ciment) et le rapport G/C (granulats/ciment) sont limités à des valeurs ( $0,3 \leq E/C \leq 0,85$ ); ( $2,5 \leq G/C \leq 13,5$ ). Ensuite le modèle est valable pour des conditions de chargement de service pour lesquelles le fluage est supposé dépendre linéairement de la contrainte ( $\sigma \leq 0,4F_{c28}$ ). La forme de la fonction de fluage est la suivante :

$$J(t, t') = q_1 + C_0(t, t') + C_d(t, t', t_0)$$

Où  $C_0(t, t')$  est le fluage spécifique fondamental (fluage propre) ;  $C_d(t, t', t_0)$  est le fluage spécifique de dessiccation dû au séchage.

## **2.6.2 Les modèles européens :**

### **2.6.2.1 Le modèle de fluage Eurocode2 :**

Le modèle de fluage européen Eurocode 2 est réglementairement, le code de calcul à appliquer à tout élément en béton plein ou armé dans des conditions d'états limites de service.

La déformation totale du béton  $\varepsilon(t)$  inclut la déformation sous charge  $\varepsilon_c(t)$  et les déformations induites hors chargement (retrait  $\varepsilon_{sh}(t)$  ou effet thermique  $\varepsilon_{th}(t)$ , par exemple).

La déformation de fluage  $\varepsilon_{fl}(t)$  est obtenue d'après le coefficient de fluage  $\varphi(t, t')$  et la raideur tangente conventionnelle à 28 jours du béton  $E_{i28}$ , (Annexe 1).

La fonction de fluage est de la forme suivante :

$$J(t, t_0) = \frac{1}{E_i(t_0)} + \frac{\varphi(t, t_0)}{E_{i28}}$$

Le coefficient de fluage  $\varphi(t, t_0)$  dépend d'un coefficient de fluage fictif  $\phi_0$  et d'une fonction  $\beta_c(t - t_0)$  quantifiant l'amplitude de la déformation en fonction de la durée du chargement.

### **2.6.2.2 Le modèle de fluage BPEL 91 :**

Le modèle de fluage du règlement de Béton Précontraint aux Etats Limites [RèglesBPEL91, 1999] est largement employé. Les nombreuses structures construites avec ce mode de construction admettent une forte proportion de contraintes maintenues constantes. De larges déformations de fluage apparaissent au sein d'ouvrages en béton précontraint qui représentent généralement des structures non courantes.

La fonction de fluage de ce modèle est donnée par la formule suivante :

$$J(t, t_0) = \frac{1}{E_i(t_0)} + \frac{\varphi(t, t_0)}{E_{i28}}$$

### **2.6.2.3 Modèle de fluage CEB 90 (version 99) :**

Dans le modèle de fluage du code (**CEB 90**), la déformation du béton  $\varepsilon$  à l'instant  $t$  suivi par l'application d'une contrainte  $\sigma$  à l'âge  $t'$  s'écrit en fonction du module élastique à 28 jours, du module élastique à  $t'$ , et de la fonction de fluage  $J$ , (Annexe 1).

La fonction de fluage est sous la forme suivante :  $J(t, t_0) = \frac{1}{E_{ci}} + \frac{\varphi(t, t_0)}{E_{i28}}$

## **CHAPITRE 3**

### **PROPOSITION D'UN MODÈLE DE PREDICTION**

#### **3.1 Introduction :**

Il est délicat de fournir une définition unique de la notion de modèle. Un modèle consiste en une présentation formalisée d'un phénomène sous forme d'équations, son objectif est de représenter les traits les plus marquants d'une réalité qu'on cherche à styliser. Le modèle est donc l'outil que le modélisateur utilise lorsqu'il cherche à comprendre et à expliquer des phénomènes [62].

Dans les divers domaines de la science, on a souvent à expliquer et /ou à analyser des phénomènes dont on ne connaît le comportement qu'à partir de mesures expérimentaux. Pour cette raison, il est intéressant de synthétiser un modèle mathématique dont le comportement est analogue au phénomène réel. Cette manière de faire permet, en outre, de montrer l'influence de certains paramètres mal connus.

Dans certains cas, la connaissance des paramètres du modèle et des conditions de l'expérience des phénomènes permettent de proposer un modèle mathématique nommé modèle déterministe. Mais, dans la plupart des cas, on ignore le mécanisme précis du phénomène. On peut alors concevoir un modèle statistique dont on estimera les paramètres à partir des échantillons de mesures [63].

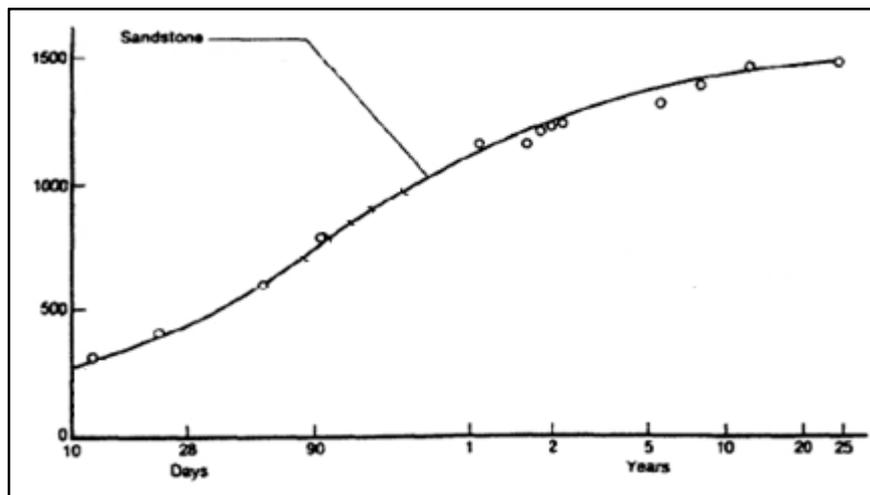
#### **3.2 Modélisation :**

L'analyse des différents modèles de fluage montre que ces derniers ont une relation linéaire avec un facteur nommé « coefficient de fluage ».

En effet, c'est le coefficient de fluage qui tient compte des principaux paramètres géométriques et de conservation.

En General, l'évolution du fluage est décrite par des courbes qui débutent par une forme exponentielle puis s'infléchissent pour atteindre, à la fin, un seuil asymptotique.

En mathématiques, ce type de courbes correspond à la courbe de la fonction de répartition de probabilité  $F(t, t_0)$ . La figure 3.1 donne l'allure générale de la fonction de fluage.



**Figure 3.1:** allure type de la fonction de fluage.

Ce type de courbes s'obtient par l'intégration directe par rapport au temps (t) de la fonction de densité de probabilité  $f(t,t_0)$ . Dans le cas étudié, La fonction de densité de probabilité  $f(t-t_0)$  est de la forme mathématique suivante :

$$f(t, t_0) = \frac{c}{t - t_0} \times \left( \frac{t - t_0}{t - t_0} \right)^{c-1} \times \exp \left\{ - \left( \frac{t - t_0}{t - t_0} \right)^c \right\} \dots\dots\dots (eq.1)$$

Tel que  $t - t_0 > 0$ .  
 $t_0$  : temps de la mise en charge.

Pour la résolution de cette équation, posons :

$$b = (t - t_0)^{-c} \quad \Rightarrow \quad b = \frac{1}{(t - t_0)^c} \quad \text{et} \quad y = t - t_0$$

D'où l'équation (1) devient comme suit :

$$f(t, t_0) = \frac{c}{(t - t_0)} \times \frac{(t - t_0)^{c-1}}{(t - t_0)^{c-1}} \times \exp \left\{ - \frac{(t - t_0)^c}{(t - t_0)^c} \right\}$$

$$f(t, t_0) = c \times \frac{(t - t_0)^{c-1}}{(t - t_0)^c} \times \exp \left\{ - \frac{(t - t_0)^c}{(t - t_0)^c} \right\}$$

$$f(t, t_0) = c \times b \times y^{c-1} \times \exp(-b \times y^c)$$

La fonction de répartition de probabilité est donnée par :

$$F(t, t_0) = \int f(t, t_0) dt \dots\dots\dots (eq.2)$$

Procédons au développement de l'équation (2) :

$$F(t, t_0) = \int_{-\infty}^0 f(t, t_0) dt + \int_0^t f(t, t_0) dt \quad \text{tel que} \quad \int_{-\infty}^0 f(t, t_0) dt = 0$$

Remplaçons la fonction  $f(t, t_0)$  par son équation dans l'intégrale comme suit :

$$F(t, t_0) = \int_0^t (c \times b \times (t - t_0)^{(c-1)} \times \exp(-b \times (t - t_0)^c)) dt \dots\dots\dots (eq.3)$$

Posons :  $v = b \times (t - t_0)^c \Rightarrow v' = c \times b \times (t - t_0)^{c-1}$

Remplaçons  $v$  et  $v'$  dans (eq.3) on obtient  $\int v' \times e^{-v} = -e^{-v} \dots\dots\dots (eq.4)$

D'où  $F(t, t_0) = -e^{-b(t-t_0)^c} \Big|_0^t = 1 - e^{-b(t-t_0)^c} \dots\dots\dots (eq.5)$

Pour tenir compte de l'évolution de la fonction de répartition de probabilité  $F(t, t_0)$  afin d'atteindre un seuil asymptotique, on multiplie l'équation (5) par un nombre positif non nulle ( $a$ ) ce qui donne la forme finale suivante :

$$F(t, t_0) = a \times (1 - e^{-b(t-t_0)^c})$$

dans notre cas, la fonction  $F(t, t_0)$  représente le coefficient de fluage  $\varphi(t, t_0)$ .

D'où :

$$\varphi(t, t_0) = a \times (1 - e^{-b(t-t_0)^c})$$

### **3.3 Estimation des paramètres du modèle:**

Pour l'identification des paramètres du modèle nous avons utilisé les résultats expérimentaux donnés dans la littérature.

Les expressions retenues sont données par les relations suivantes :

$$a = \beta_1 + \beta_2 \cdot (HR)^2 + \beta_3 \left( \frac{V/S}{HR} \right)$$

$$b = \beta_4 + \beta_5 \cdot (V/S) + \frac{\beta_6}{HR}$$

$$c = \beta_7 + \beta_8 \cdot ((V/S)^2 \cdot (HR))$$

Avec : V/S : rapport volume surface (V/S) en (mm).

HR : humidité relative en %

Les tests et les constantes correspondantes à ces expressions sont résumés dans les tableaux 3.1, 3.2 et 3.3.

**P(S)\*** : Probabilité de signification de chaque coefficient estimé.

**P(F)\*\*** : Probabilité de signification à la valeur  $T_{Fisher}$ .

**Tableau 3.1** : tests du paramètre « a ».

Coefficient du modèle		Ecart type	Test de Student		Test de Fisher		Coeff. De corrélation	
			$T_{Student}$	P(S)*	$T_{Fisher}$	P(F)**	$R^2$	$\overline{R}^2$
$\beta_1$	1.250042	0.0155	80.6407	0.0000	682.517	0.0000	0.9572	0.9558
$\beta_2$	-0.842352	0.0267	-30.8289	0.0000				
$\beta_3$	-0.000320	0.0001	9.6071	0.0000				

**Tableau 3.2** : tests du paramètre « b ».

Coefficient du modèle		Ecart type	Test de Student		Test de Fisher		Coeff. De corrélation	
			$T_{Student}$	P(S)*	$T_{Fisher}$	P(F)**	$R^2$	$\overline{R}^2$
$\beta_4$	0.236297	0.0027	85.8150	0.0000	1071.38	0.0000	0.9723	0.9714
$\beta_5$	-0.001000	8.7 E-05	-45.8909	0.0000				
$\beta_6$	0.002927	0.0004	6.0662	0.0000				

**Tableau 3.3** : tests du paramètre « c ».

Coefficient du modèle		Ecart type	Test de Student		Test de Fisher		Coeff. de corrélation	
			$T_{Student}$	P(S)*	$T_{Fisher}$	P(F)**	$R^2$	$\overline{R}^2$
B <sub>7</sub>	0.540869	0.0037	144.6832	0.0000	682.517	0.0000	0.7901	0.7202
B <sub>8</sub>	1.96E-06	5.5E-07	3.5082	0.0127				

### 3.4 Amélioration du modèle :

Le paramètre « c » varie très peu comme indique le tableau 3.4 et est voisin de 0,5. En fixant  $c = 0,5$ , l'équation donnant le coefficient de fluage est réduite à une expression à deux paramètres :

$$\varphi(t, t_0) = a \times (1 - e^{-b(t-t_0)^{0.5}})$$

**Tableau 3.4:** Les valeurs de coefficient (c) prédites pour notre modèle.

V/S	HR	C	V/S	HR	C	V/S	HR	C
76mm	20%	<b>5.90E-01</b>	102mm	20%	<b>5.36E-01</b>	152mm	20%	<b>5.99E-01</b>
	50%	<b>4.48E-01</b>		50%	<b>5.08E-01</b>		50%	<b>5.76E-01</b>
	75%	<b>5.13E-01</b>		75%	<b>5.25E-01</b>		75%	<b>6.53E-01</b>

### 3.5 Fonction de fluage :

Dans la pratique on se sert de la fonction de fluage pour apprécier les déformations de fluage. Dans notre cas nous adaptons la même expression pour la fonction que celle préconisés par l'eurocode2 et le BPEL.

La différence entre les fonctions fluage de l'eurocode2, le BPEL et notre modèle réside dans l'expression du coefficient fluage  $\varphi(t, t_0)$ . Ce qui nous amène à proposer une fonction de fluage de la forme suivante:

$$J(t, t_0) = \frac{1}{Ei(t_0)} + \frac{\varphi(t, t_0)}{E_{i28}}$$

$$\Rightarrow \boxed{J(t, t_0) = \frac{1}{Ei(t_0)} + \frac{a \times (1 - e^{-b(t-t_0)^{0.5}})}{E_{i28}}}$$

$$E_i(t_0) = 9975 \times \sqrt[3]{f_{cj}(t_0)}$$

Où  $E_i(t_0)$  est la raideur tangente instantanée à l'âge  $t_0$  du béton au chargement.

$$f_{cj}(t_0) = \bar{f}_c \times e^{s(1 - \sqrt{28/t_0})} \quad \text{Avec } s = \begin{cases} 0.38 \\ 0.25 \\ 0.20 \end{cases}$$

Avec :

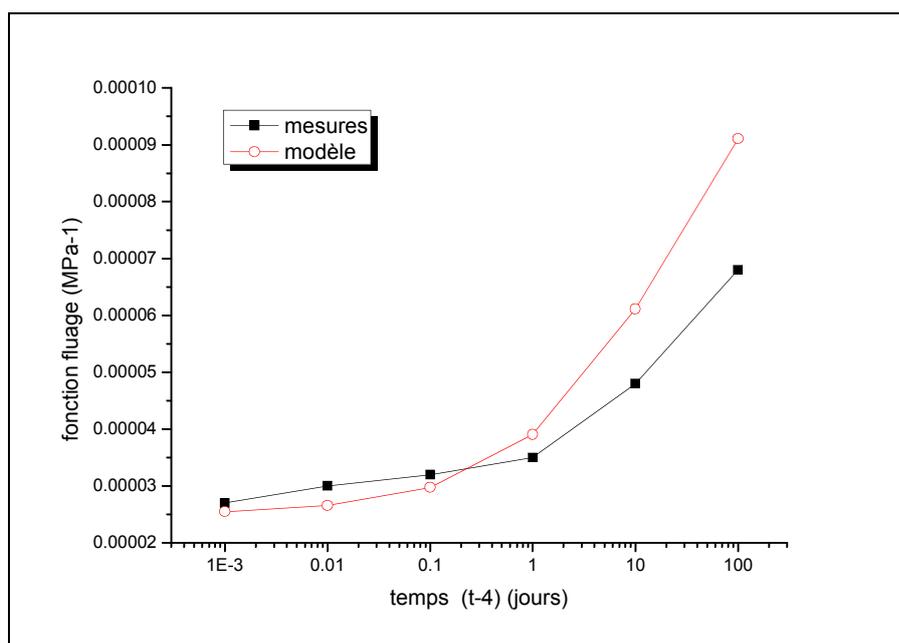
- 0.38 pour les ciments à prise lente.
- 0.25 pour les ciments à prise normale ou rapide.
- 0.38 pour les ciments à prise rapide et haute résistance.

### 3.6 Validation du modèle :

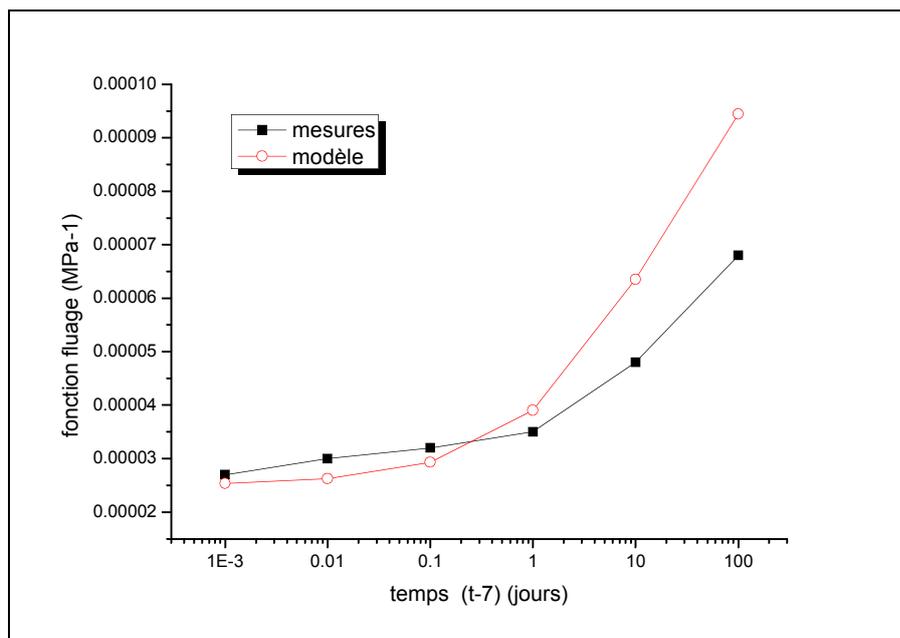
Pour valider notre modèle nous nous sommes référés à des résultats expérimentaux tels que, les résultats expérimentaux obtenus par STAQUET [30], aux résultats expérimentaux obtenus par MEYERSON [64] et aux résultats expérimentaux obtenus par Mang Tia [67], Ceci dans un premier temps. Puis, dans un second temps, nous comparons les prédictions de notre modèle avec celles des modèles de fluage codifiés les plus usités.

#### 3.6.1 Comparaison du modèle avec les résultats expérimentaux obtenus par STAQUET[30] :

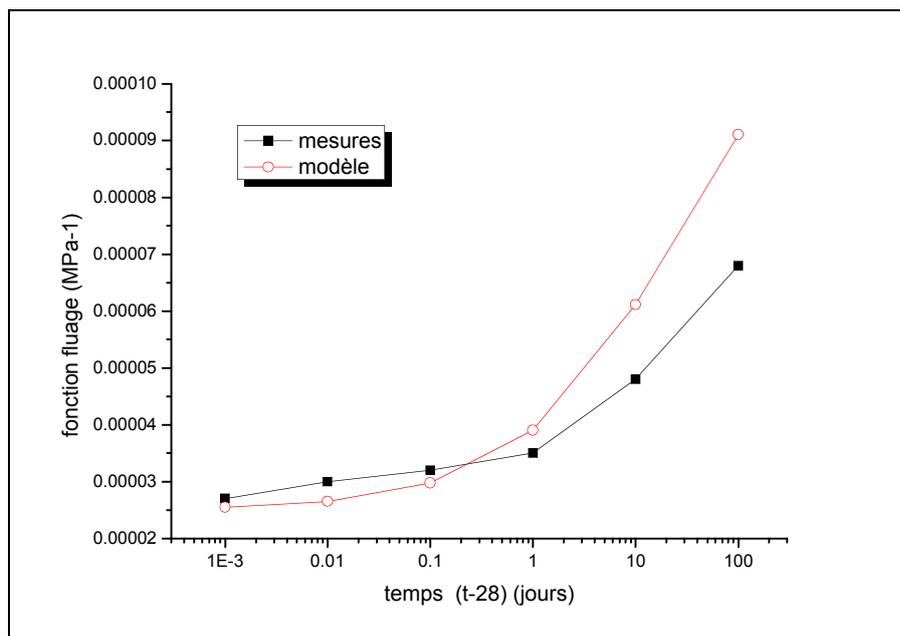
Les résultats expérimentaux obtenus par STAQUET [30] sont des mesures effectués sur un tablier de pont déjà construit pour de différents temps de mise en charge ( $t_0$ ). Les résultats sont rapportés aux figures Figure 3.2.a, b et c



**Figure 3.2.a :** comparaison des prédictions du modèle et les résultats expérimentaux obtenus par STAQUET [30] ( $t_0=4$  jours).



**Figure 3.2.b** : comparaison des prédictions du modèle et les résultats expérimentaux obtenus par STAQUET [30] ( $t_0=7$  jours).

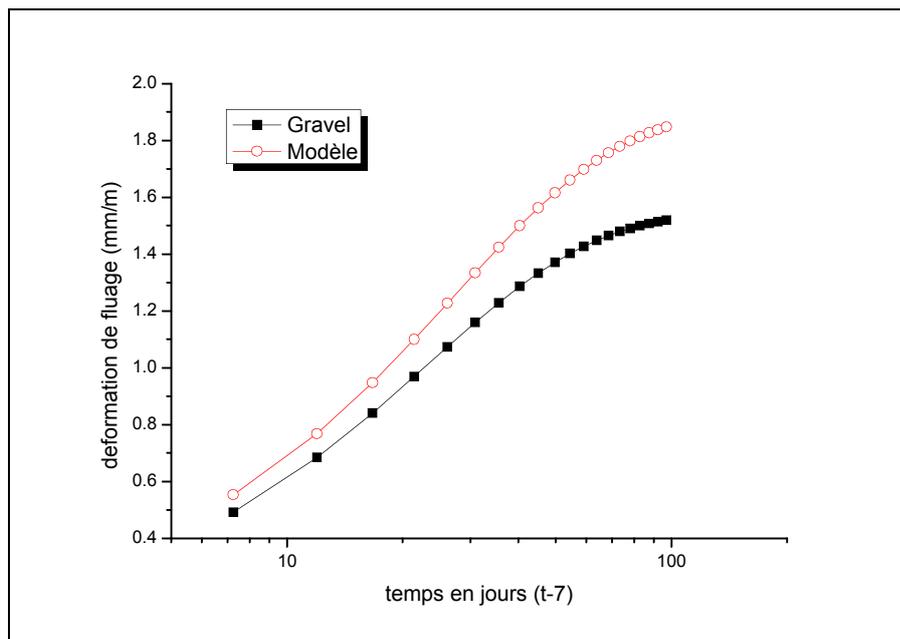


**Figure 3.2.c** : comparaison des prédictions du modèle et les résultats expérimentaux obtenus par STAQUET [30] ( $t_0=28$  jours).

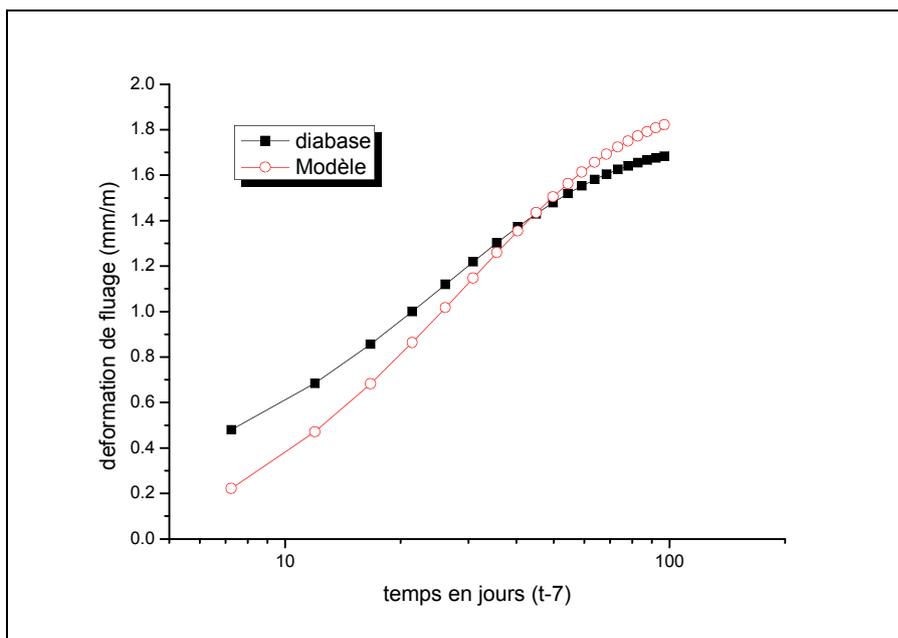
Ces courbes montrent bien la concordance qui existe entre les résultats expérimentaux et ceux prévus par notre modèle. Toutefois, un léger écart est observé aux âges avancés, lequel serait due aux variations hygrométriques du milieu ambiant non contrôlés dans les essais.

### **3.6.2 Comparaison avec les résultats expérimentaux obtenus par MEYERSON [64]:**

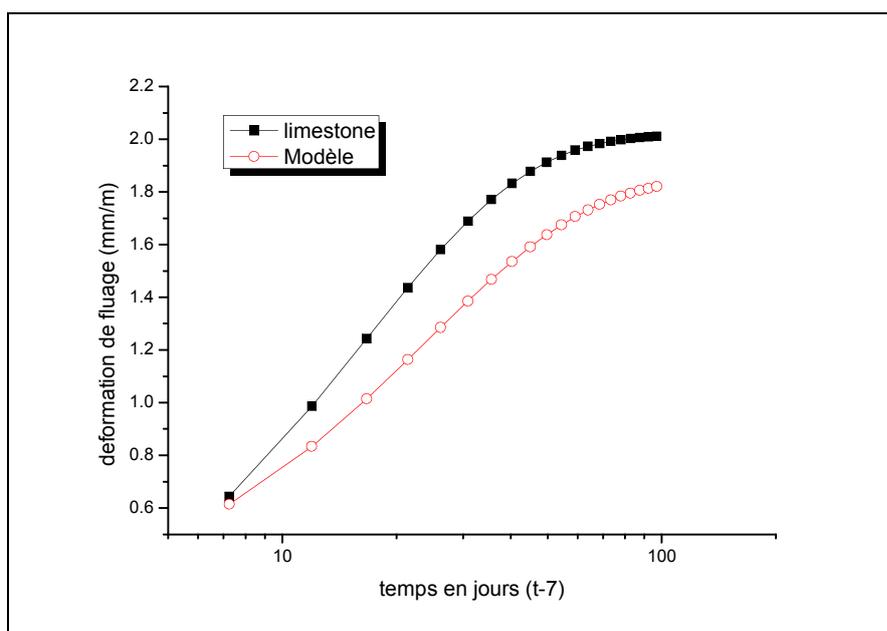
Nous comparons, ici, les prédictions du modèle développé et les résultats expérimentaux obtenus par MEYERSON [64] (résultats de laboratoire) pour de différents types d'agrégats, à savoir: gravier, diabase et limestone pour un même temps de début de chargement ( $t_0=7$  jours). Les résultats sont rapportés aux figures (figures 3.3 a, b et c).



**Figure 3.3.a** : comparaison des déformations obtenus expérimentalement par MEYERSON [64] et celles prévues par le modèle.



**Figure 3.3.b** : comparaison des déformations obtenus expérimentalement par MEYERSON [64] et celles prévues par le modèle.



**Figure 3.3.c** : comparaison des déformations obtenus expérimentalement par MEYERSON [64] et celles prévues par le modèle.

On constate que notre modèle décrit bien le phénomène de fluage des bétons utilisant différents types d'agrégats.

### **3.6.3 Comparaison avec les résultats expérimentaux obtenus par Mang Tia [67]:**

Cette comparaison a pour but de juger de l'étendue de l'application du modèle développé. A cet effet, nous donnons aux figures 3.4, 3.5, 3.6 et 3.7. une comparaison des prédictions du modèle avec les différents résultats obtenus par Mang Tia [67] sur des bétons utilisant différents types de ciments et pourcentages d'ajouts.

Pour pouvoir interpréter les résultats, nous avons comparé 4 mélanges utilisant différents types de ciment et pourcentages d'ajouts mais ayant une même durée de cure et un même niveau de chargement. Les compositions de chaque mélange sont données dans le tableau 3.5.

**Tableau 3.5 :** propriétés des mélanges utilisés par Mang Tia [67].

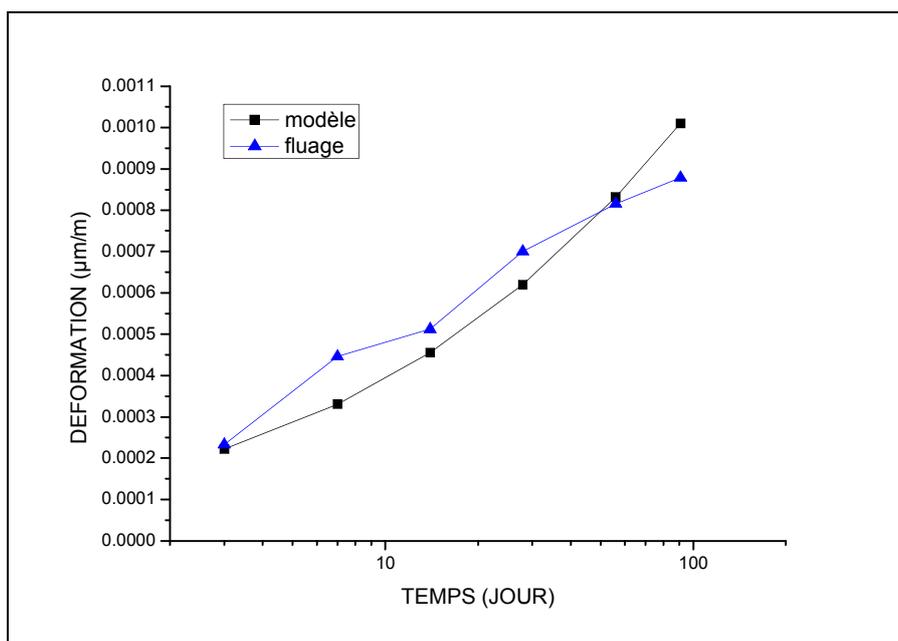
	Durée de cure	E/C	Niveau de chargement	$\frac{\text{Cendres volantes}}{\text{Cendres volantes} + \text{ciment}}$	$\frac{\text{Slag}}{\text{Slag} + \text{ciment}}$
Mélange 3	7 jours	0.33	40 %	20%	-
Mélange 4	7 jours	0.33	40 %	-	50%
Mélange 5	7 jours	0.41	40 %	20%	-
Mélange 9	7 jours	0.44	40 %	-	50%

Ces bétons utilisent des liants aux caractéristiques très différentes. C'est pourquoi un ajustement du modèle a été nécessaire pour prédire de façon satisfaisante l'évolution de leur fluage. L'ajustement consiste à affecté au modèle une valeur numérique dépendante des caractéristiques de la phase liante du matériau. Les termes correctifs  $\alpha$  retenues sont rapportés au tableau 3.6.

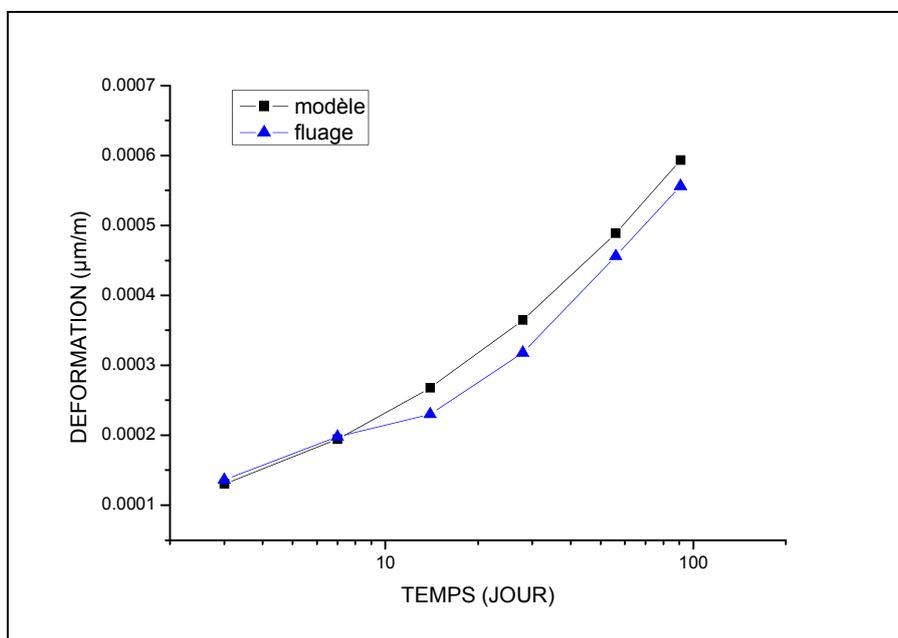
**Tableau 3.6:** valeurs du coefficient  $\alpha$  pour chaque mélange de béton.

	coefficient $\alpha$	E/C	$\frac{\text{Cendres volantes}}{\text{Cendres volantes} + \text{ciment}}$	$\frac{\text{Slag}}{\text{Slag} + \text{ciment}}$
Mélange 3	4	0.33	20%	-
Mélange 4	2.35	0.33	-	50%
Mélange 5	3.5	0.41	20%	-
Mélange 9	3.2	0.44	-	50%

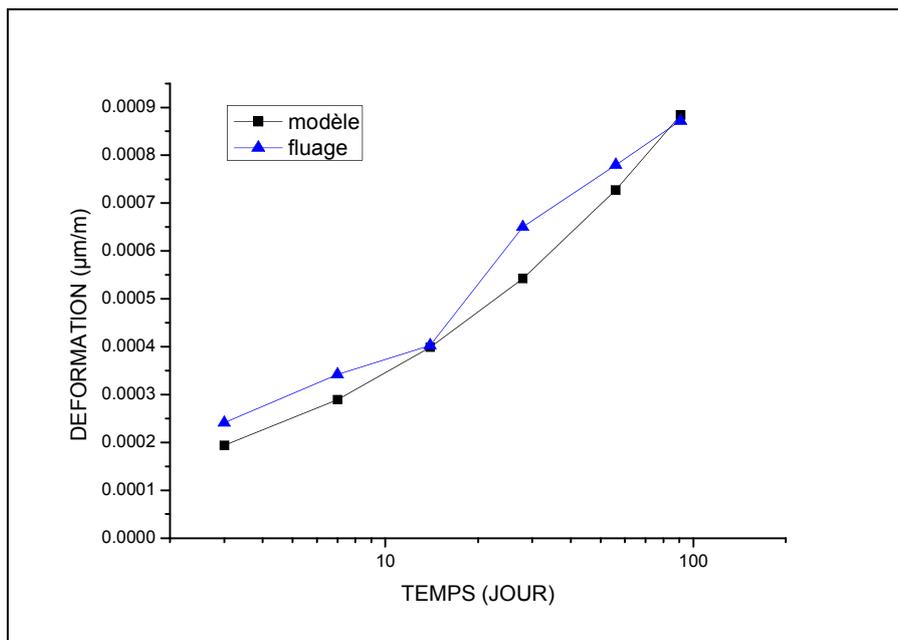
Nous remarquons que pour un même type et pourcentage d'ajout, nous n'avons pas la même valeur du coefficient  $\alpha$ . Cela est dû à la différence de compositions de la phase active des mélanges et aux rapports E/C.



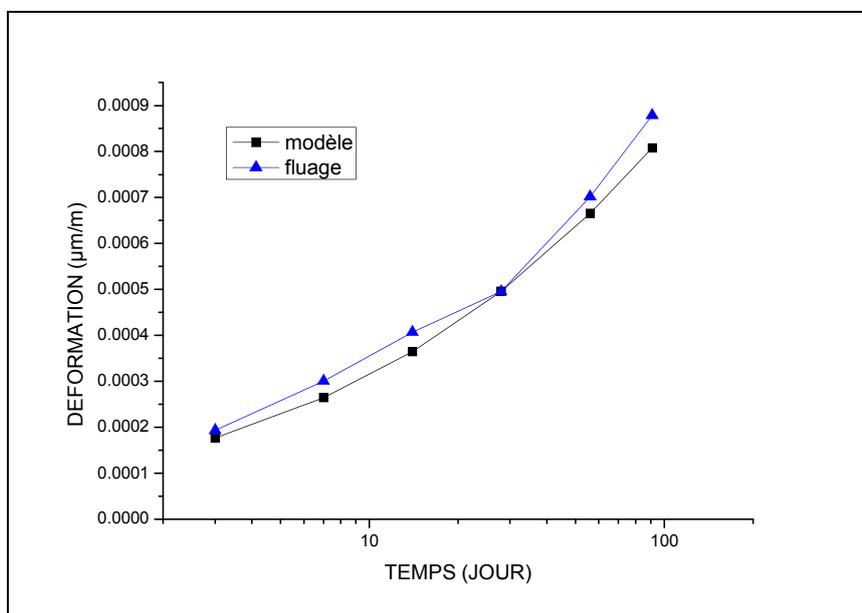
**Figure 3.4** : comparaison des déformations obtenus expérimentalement par Mang Tia [67] et celles prévues par le modèle (mélange 3).



**Figure 3.5** : comparaison des déformations obtenus expérimentalement par Mang Tia [67] et celles prévues par le modèle (mélange 4).



**Figure 3.6 :** comparaison des déformations obtenus expérimentalement par Mang Tia [67] et celles prévues par le modèle (mélange 5).

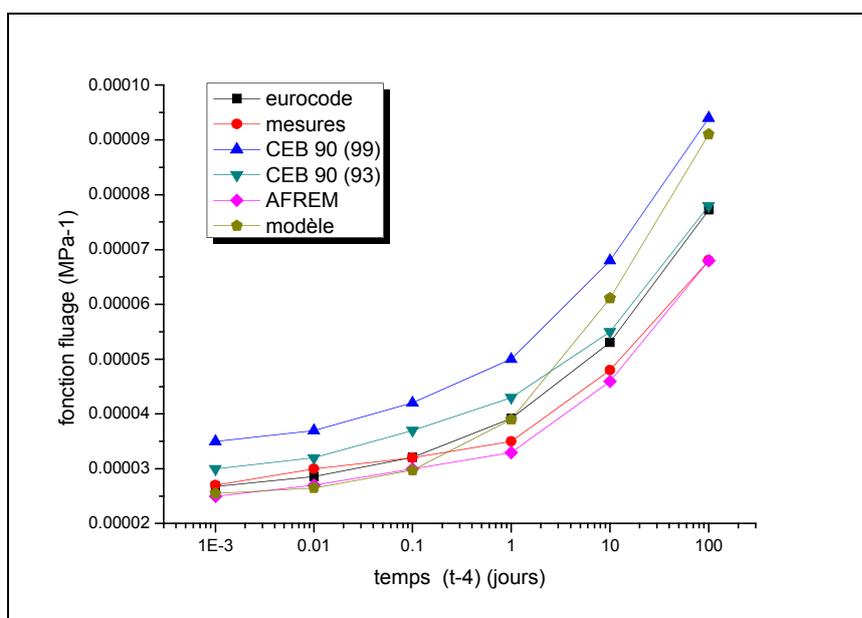


**Figure 3.7:** comparaison des déformations obtenus expérimentalement par Mang Tia [67] et celles prévues par le modèle (mélange 9).

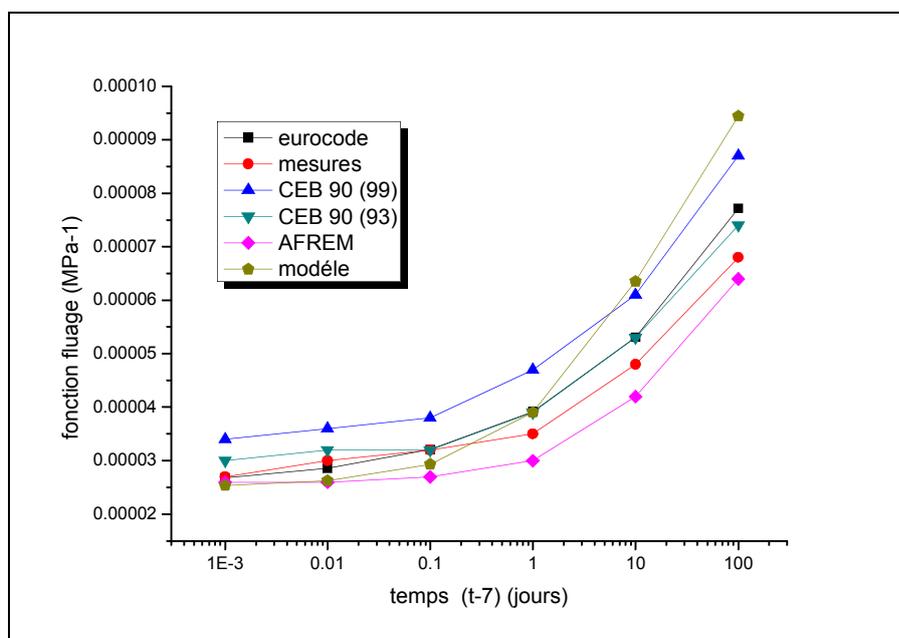
### 3.6.4 Comparaison du modèle avec les modèles codifiés :

#### 3.6.4.1 Comparaison par rapport aux résultats expérimentaux obtenus par STAQUET [30] :

Nous avons comparé les prédictions de notre modèle avec les modèles européens (figures 3.8 a, b et c) et les modèles américains (figures 3.9 a, b et c) pour des différentes durées de mise en charge ( $t_0=4, 7$  et 28 jours).



**Figure 3.8.a** : évolution du fluage prévu par le modèle et par les différents codes,  $t_0 = 4$  jours.



**Figure 3.8.b** : évolution du fluage prévu par le modèle et par les différents codes,  $t_0 = 7$  jours.

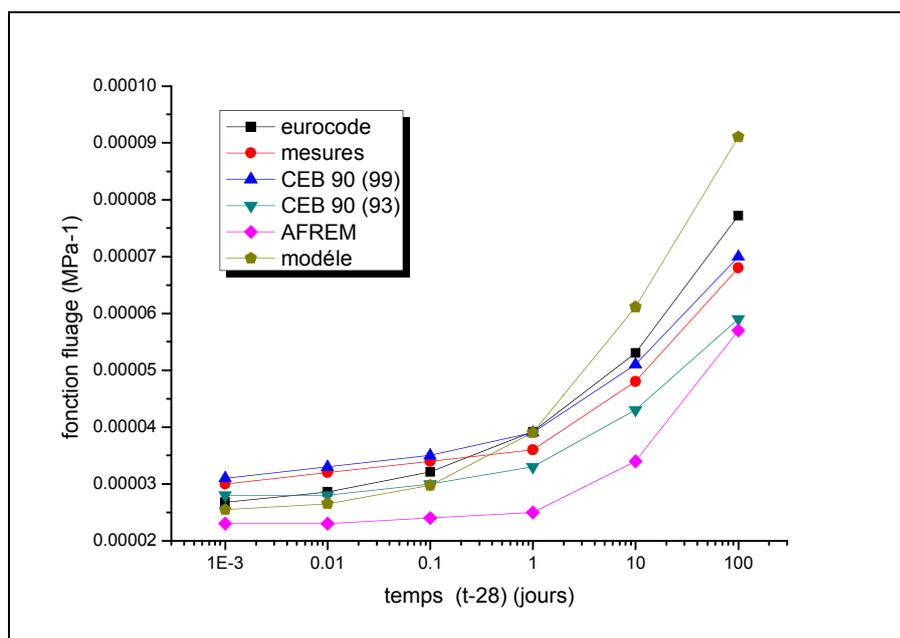


Figure 3.8.c : évolution du fluage prévu par le modèle et par les différents codes,  $t_0=28$ jours.

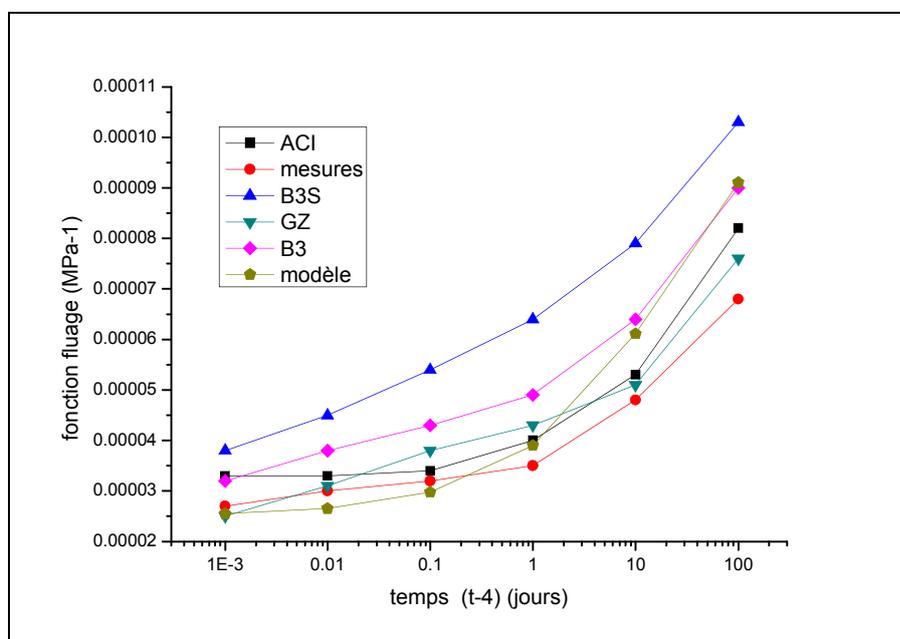


Figure 3.9.a : évolution du fluage prévu par le modèle et par les différents codes,  $t_0=4$ jours.

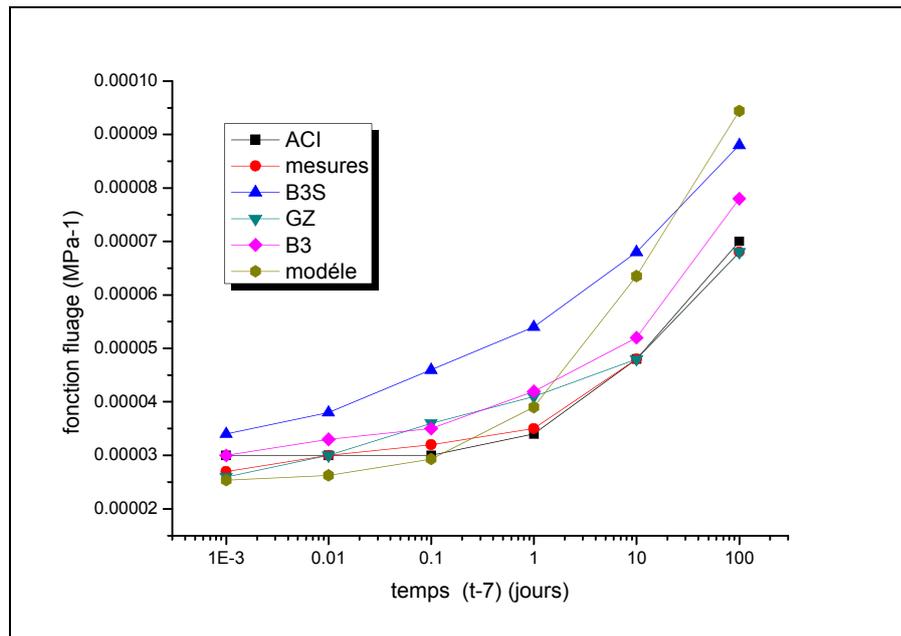


Figure 3.9.b : évolution du fluage prévu par le modèle et par les différents codes,  $t_0=7$  jours.

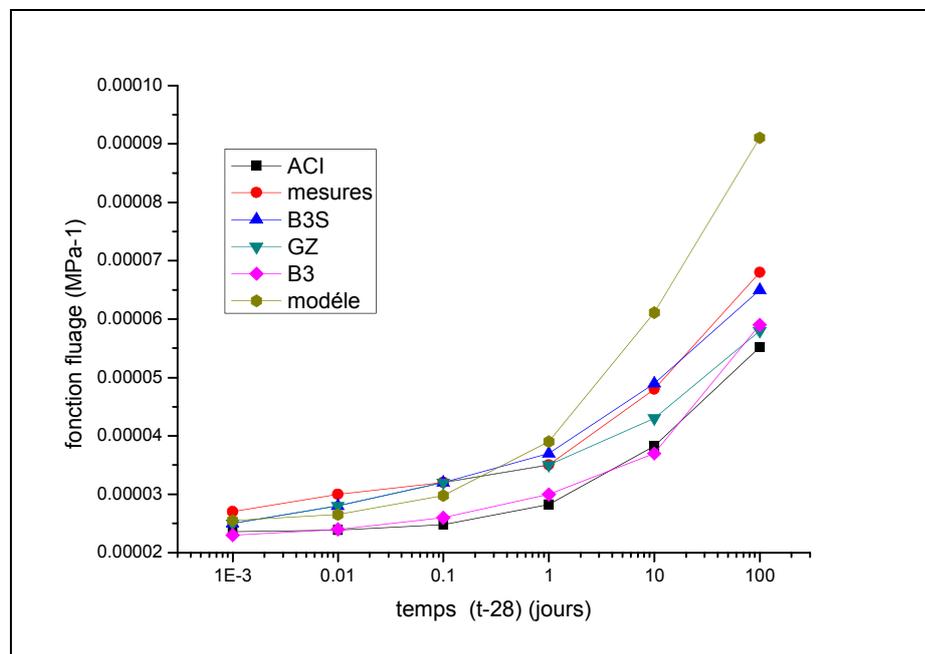
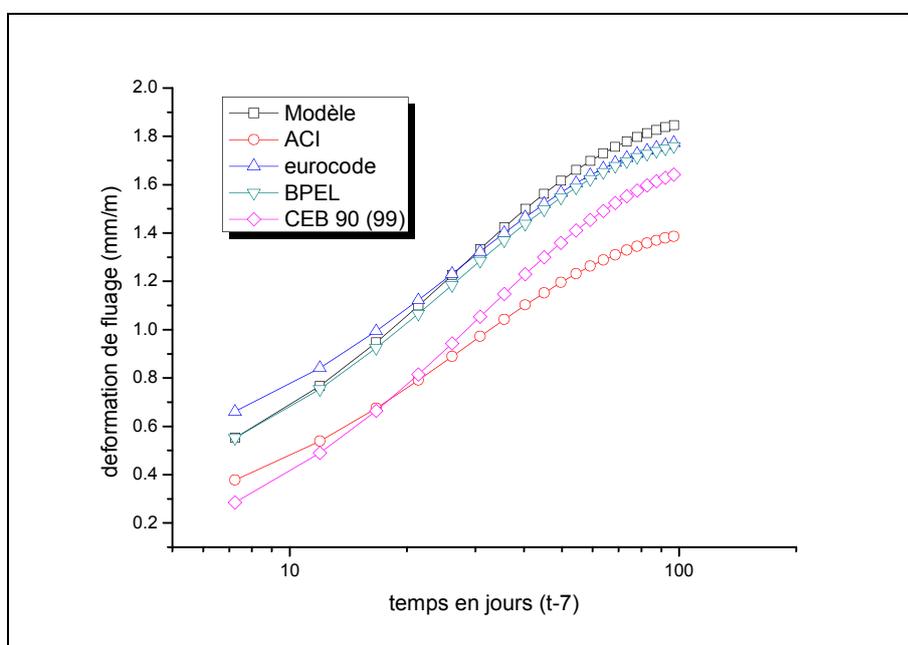


Figure 3.9.c : évolution du fluage prévu par le modèle et par les différents codes,  $t_0=28$  jours.

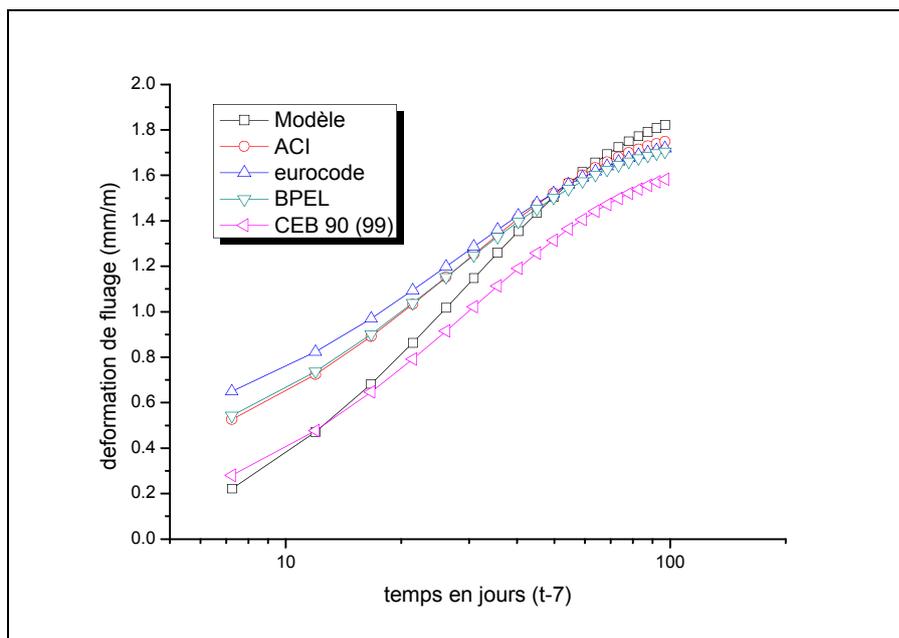
Ces courbes montrent bien que le modèle conçu concorde parfaitement avec l'ensemble des modèles codifiés les plus usités de par le monde. En outre, le modèle développé est plus simple d'utilisation et permet d'estimer aussi le temps nécessaire pour atteindre une valeur de déformation donnée.

### **3.6.4.2 Comparaison par rapport aux résultats expérimentaux obtenus par MEYERSON [64] :**

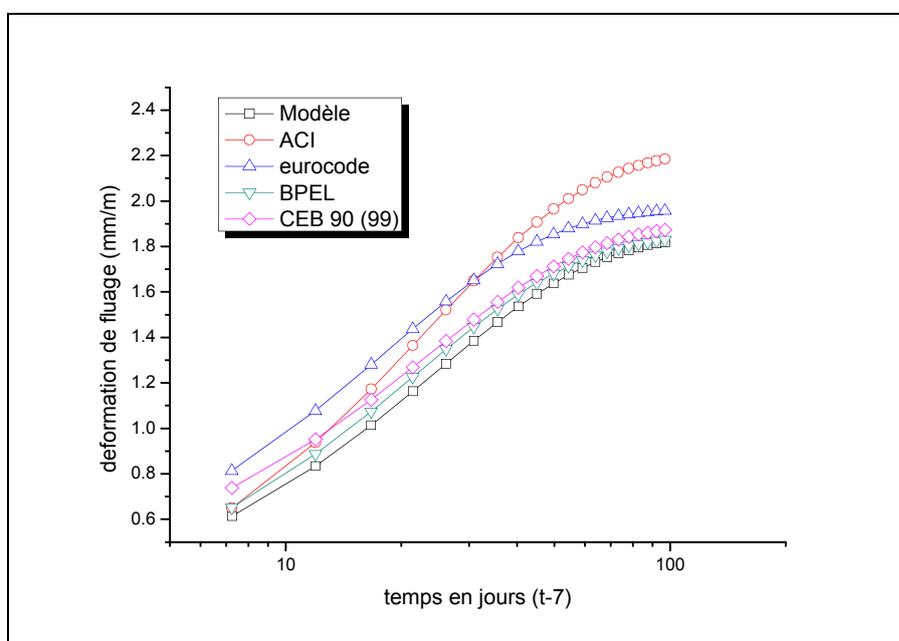
Les (figures 3.10 a, b et c) sont des confrontations de notre modèle avec les modèles codifiés les plus fréquemment utilisés tel que l'eurocode2, ACI, CEB 90 (99) et le BPEL toujours en utilisant les résultats expérimentaux obtenus par MEYERSON pour les bétons utilisant différents types d'agrégats et une mise en charge de 7 jours.



**Figure 3.10.a** : évolution du fluage prévu par le modèle et par les différents codes, Cas du gravier.



**Figure 3.10.b** : évolution du fluage prévu par le modèle et par les différents codes, Cas du diabase.



**Figure 3.10.c** : évolution du fluage prévu par le modèle et par les différents codes, Cas du limestone.

### **3.7 Conclusion :**

Le modèle que nous avons développé est bien adapté pour décrire l'évolution du fluage des différents types des bétons. Ceci a été justifié précédemment par comparaison, d'une part, aux données expérimentaux et d'autre part, aux différents modèles codifiés.

Le modèle développé conduit aux mêmes résultats que l'Eurocode2, BPEL et le CEB90 et même les modèles américains tels que l'ACI.

Le modèle conçu est plus simple d'utilisation et offre, en outre, la possibilité d'apprécier le temps nécessaire pour atteindre une valeur de fluage donnée. Ce qui n'est pas le cas des modèles actuellement disponibles.

## CONCLUSION GENERALE

Le fluage est un phénomène qui affecte les éléments de structures en service et conduit à la réduction de leurs propriétés potentielles.

Le fluage est généralement influencé par le séchage, par le niveau de chargement et par le temps de mise en chargement.

L'analyse de la fonction de fluage montre que cette dernière évolue linéairement par rapport au coefficient de fluage.

Ce sont les diverses expressions du coefficient de fluage qui différencient les fonctions de fluage des codes existants.

Dans le cadre de notre travail nous mettons au point une expression donnant le coefficient de fluage. Cette expression est plus simple étant comparée à celle de différents codes existants.

Le modèle développé pour évaluer la fonction de fluage, présente en plus l'avantage de pouvoir apprécier le temps nécessaire pour atteindre une déformation de fluage donnée.

L'expression du coefficient de fluage adopté tient compte des principaux paramètres influençant le fluage à savoir le rapport (V/S) et l'hygrométrie du milieu de conservation (HR).

Les prédictions du modèle développé ont été très satisfaisantes étant comparées avec différents résultats expérimentaux et différents modèles codifiés.

Enfin, on peut dire que le fluage est principalement influencé par :

- Niveau de chargement.
- Temps de la mise en charge.
- Rapport (V/S) et l'hygrométrie du milieu de conservation (HR).

## REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

1. NEVILLE A. M. "Propriétés des bétons", Editions Eyrolles, Paris 2000.
2. WITTMANN F.H., ROELFSTRA P. "Total deformations of loaded drying creep", Cement and Concrete Research, 10 p.601-610, 1980.
3. DREUX G. ET GORISSE F., «Fluage des bétons soumis jeunes à un gradient de contrainte», Annales de l'ITBTP, N° 326, mars 1975.
4. BERRA. CASTELLANI, 1995.
5. ROSSI P., «Fissuration du Béton : du Matériau à la Structure application de la mécanique Linéaire de la Rupture », Rapport de Recherche LCPC, Na 150, Juin 1988.
6. LEROY R., « Déformations Instantanées et Différées des Bétons à Hautes performances », Série Ouvrages d'Art - OA 22, LCPC, France, Septembre 1996.
7. AITCIN P.C., NEVILLE A., ACKER P., « Les Différents Types de Retrait du Béton », Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, N° 215, pp.41-51, Mai ; Juin, 1998.
8. ACKER P., « Comportement Mécanique du Béton : Apports de l'approche physicochimique », Rapport de Recherche, LCPC N° 152, Décembre 1988.
9. NEVILLE A.M, BROOKS J.J, « Concrete Technology », copublished in the United States with John Wiley, Longman Group UK Limited, 1987.
10. BERTHIER P.M., « Physique des bétons et des Aciers pour Ouvrages en Béton Précontraint », Annales ITBTP, N° 389, pp. 35-66, Décembre 1980.
11. BOUKENDAKDJI M., « Cours : Technologie du Béton », Université Saad- BAHLAB Blida, 1999-2000.
12. DETRICHE C.H., «La Maîtrise de la Fissuration Précoce : Condition de la Durabilité des Ouvrages », Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1992.
13. GCI-714. « Cours : Durabilité et Réparations du Béton », Université de Sherbrooke, CANADA, Mai 1998.
14. WITTMANN F.H., LUNK P., MULLER T., « Feuchtigkeits- und Ionentransport bei gerissenen Stahlbetonbauteilen », Eidgenössisches Verkehrsund Energiewirtschaftsdepartement, Bundesamt für Strassenbau, Heft 538, 1998.

15. CEB, « Durable Concrete structures », Bulletin d'information, N°183, 1992.
16. BRAHMA A., « Le Béton », Office des Publications Universitaires, Octobre 1992.
17. ROSSI P., « Couplaging Between the Crack Propagation Velocity and the Vapour Diffusion in Concrete », Materials and Structures, N° 22, pp. 91-97, 1989.
18. BAZANT Z.P., « F'ourth Rilem International Symposium on Creep and Shrinkage of Concrete: Mathematical Modeling », Nourthwestern University, Evanston, 1986.
19. BAZANT Z.P., JOONG-KOO K., « Conséquences of Diffusion Theory for Shrinkage of Concrete », Materials and Structures, N° 24, pp. 323-326, 1991.
20. REGOURD M., « L'eau », le Béton Hydraulique : Connaissance et Pratique, BARON J., SAUTEREY R., Paris, Presse de l'ENPC, pp. 59-68, 1982.
21. GRANGER L., « Comportement Différé du Béton dans les Enceintes Nucléaires : Analyse et Modélisation », Série Ouvrages d'Art - OA 21, LCPC, Avril 1996.
22. FOLLIOT A., BUIL M., « La Structure Progressive de la Pierre de Ciment» le Béton Hydraulique : Connaissance et Pratique , BARON J., SAUTEREY R., Paris, Presse de l'ENPC, pp.223-236, 1982.
23. VENUAT M., «La Pratique des Ciments et des Bétons », Editions du Moniteur des Travaux Publics et du Bâtiment, Janvier 1992.
24. BENBOUDJEMA F, «Modélisation des déformation différées du béton sous sollicitations biaxiales. Application aux enceintes de confinement de bâtiments réacteurs des centrales nucléaires » Thèse de doctorat de l'université de MARNE LA VALLEE, 258 p., 2002
25. BAZANT Z.P, KIM J.K., WITTMANN F.11, and ALOU F., « Statistical Extrapolation of Shrinkage Data-Part I; Bayesian Updating », ACI Materials Journal, N° 84-M1 0, pp. 83-91, Mardi-April 1987.
26. ALOU F., I;ERRARIS C.F., WITTMANN F.H., « Etude Expérimentale du Retrait du Béton », Materials and Structures, N° 20, pp. 323-333, 1987.
27. CATED « Guides des Techniques du Bâtiments : Fissuration », Copyright, Septembre 1994.
28. BAZANT Z.P., BAWEJA S., « Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and Design of Concrete Structures : Model B3 », ACI International SP-194-1, Editor Akthen-i Al-Manaseer, Farmington Hills, Mitchigan, SP-194, pp. 1-83, 2000.

29. BERTHOLET, « Contribution à la modélisation du béton vis-à-vis du vieillissement et de la durabilité : interaction des déformations de fluage et du comportement non linéaire du matériau », Thèse de doctorat de l'INSA de Lyon, 299 p., Octobre 2003
30. STAQUET S, analyse et modelisation du comportement differe du beton, 2004.
31. L'VOVSKIJ E.N., BORDEYANOU G.V. "Une méthode statistique nouvelle pour le calcul des caractéristiques de fluage des bétons", Bulletin de Liaison du Laboratoire des Ponts et Chaussées, N° 91, Sept-Oct, 1977.
32. BERTHIER R.M. "Physique des bétons et des aciers pour ouvrages en béton précontraint", Annales de l'ITBTP, N° 389, Décembre 1980.
33. SMERDA Z., KRISTEK V. "Creep and shrinkage of concrete elements and structures", Elsevier Science Publishers p. 296 , Amsterdam, 1988
34. HOUARI.H. " Contribution à l'étude du comportement des bétons renforcés des fibres métalliques soumis à l'action des charge maintenues et cycliques ", Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, 244 p, 1993.
35. L'HERMITRE J., MAZARS J. " I. Note sur le changement de volume au cours de la déformation plastique du béton. II. Quelque complément à l'étude expérimentale de fluage du béton en compression simple ", Annales de l'ITBTP, N ° 363, Juillet- août 1978
36. BISSONNETTE., PIGEON, "Tensile creep at early ages of ordinary, silica fume and fibre reinforced concretes" Cement and Concrete Reseach., Volume25, No.5 pp.1075-1085, 1995.
37. OSTERGAARD L. ET AL. "Tensile basic creep of early – age concrete under constant load", cement and concrete research, volume 31 N° 12, p. 1895-1899, 2001.
38. KOVLER K, «Interdependence of creep and shrinkage for concrete under tension», Journal of Material in Civil Engineering., No.2, p96-101, 1995.
39. SMADI M.M., SLATE F.O.AND NILSON A.H. «Shrinkage and creep of high – medium – and low – strength concretes, including overloads», CI Materials Journal. Volume84, No.3, p.224 -234, 1987.
40. WARD M.A. ET COOCK D.J. «The mecanism of tensile creep in concrete», magazine of concrete research, volume 21 N° 168, p. 151-158, 1969.
41. KHAN ET AL. «Creep, shrinkage and thermal strains in normal, medium and high strength concretes during hydratation», ACI Materials Journal, volume 94 N°2, p 156-163, 1997.

42. HARSH ET AL. «Strain-rate sensitive behavior of cement paste and mortar in compression», ACI Materials Journal, volume 87 N° 5, p. 508-516, 1990.
43. BENAÏSSA ET AL. «Fluage et retrait du béton de sable», Materials and Structures, volume 26, pp. 333-339, 1993.
44. DOMONE P.L. «Uniaxial tensile creep and failure of concrete» Magazine of concrete research, volume 26 N° 88, pp. 144-152, 1974.
45. BISSONNETTE B. ET PIGEON M. " Le comportement viscoélastique du béton en traction et la compatibilité déformationnelle des réparations " Matériaux et Constructions/Materials and Structures, Volume 33, pp.108-118, Mars 2000.
46. NEVILLE A. M. "Properties of concrete", editions J. Wiley and Sons, p. 398-405, London 1981.
47. PANE I. AND HANSEN W. "Early age creep and stress relaxation of concrete containing blended cements", Matériaux et Constructions/ Materials and Structures, volume 35, p. 92-96, 2002.
48. AL-MANASEER A.A. "Creep and Shrinkage: structural design effect", The Adam Neville symposium Atlanta USA, ACI-Michigan, 424 p. , 2000.
49. CHABANE A. ET HOUARI H. " Influence du type de granulats sur le fluage du béton", Revue sciences et technologie B- Constantine, N° 27, pp 7-15, Juin 2008.
50. HUET C., ACKER P., BARON J. «Fluage et autres effets rhéologiques différés du béton» cité dans «Le béton hydraulique», Presses de l'école nationale des ponts et chaussées p. 335-364, Paris 1982.
51. BARON J. ET SAUTEREY R. "Le béton hydraulique: Connaissance et pratique", Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, pp. 335-364, 1995.
52. BAZANT Z.P. ET WANG T.S. "Mathematical model for creep and thermal shrinkage of concrete at high temperature", Nuclear Engineering Design, N° 76, pp.183-191, 1983.
53. ACKER P., BARRAL A. "Déformations différées du béton durci : étude critique des modèles analytiques de comportement", Rapport de recherche, LCPC, 5 sept 1980.
54. POH K.H. "General creep-time equation", Journal of Materials in Civil Engineering, volume 10 N° 2, pp. 118-120, 1998.

55. LUKAS P. ET AL. "Creep of CMSX – 4 single crystals of different orientations in tension and compression", *Materials Science & Engineering A. Structural Materials: properties, microstructure and processing*, volume A208 N° 2, pp. 149-157, 1996.
56. ACKER P., EYMARD R., AND PLUM J .M"Structural analysis of concretes: accounting for thermal and hygral effects". *Annales des Ponts et Chaussées*, pp.1- 11, 1991.
57. BERES L. " La macrostructure et le comportement de béton sous l'effet de sollicitation de longue durée ". *Matériau ET Constructions/ Materials and Structures*, Volume 2 No.8, pp.103-110, 1969.
58. NGAB A.S., NILSON A.H. ET SLATE F.O. "shrinkage and creep of high strength concrete", *ACI Journal*, volume 78 N° 4, pp. 255-261, 1981.
59. GETTU R. ET GARCIA- ALVAREZ V.O. "Interaction of creep and fracture in concrete", *Creep and shrinkage of concrete proceeding of fifth international RILEM symposium Barcelone- London: E & Fn spon.*, pp. 413-420, 1993.
60. NEVILLE A. M., DILGER W. H. "Creep of plain and structural concrete», *construction press, essex, England* 1983.
61. BAZANT Z.P. ASGHARI A. SCAMIOT J. "Experimental study of creep of hardened Portland cement paste at variable water content", *Material and Structures*, volume 9 N°52, pp.279-290, 1976.
62. BOURBONNAIS R., « Econométrie », *Manuel et Exercices Corrigés*, 3eme édition, Paris, 2000.
63. MEGUENNI K., «Modélisation du Degré d'hydratation des Liants Hydrauliques », *Mémoire de Magister, Université Saad - DAHLAB Blida*, Avril 1999.
64. MEYERSON R. *Compressive creep of prestressed concrete mixtures with and without mineral admixtures*, Virginia Polytechnic and State University, February 2001.
65. Weibull W. *Statistical Theory of the Strength of Materials*, Stockholm, 1939
66. ALOU F., ILERRARIS C.F., WITTMANN F.H., « Etude Expérimentale du retrait du Béton », *Materials and Structures*, N° 20, pp. 323-333, 1987.
67. MANG T., YANJUN L., «Modulus of elasticity, creep and shrinkage of concrete», *Department of Civil and Coastal Engineering College of Engineering University of Florida Gainesville, Florida*, 2005
68. ZREIKI J., «Comportement du béton au jeune âge dans les structures massives. Application au cas de réparation des ouvrages», *Laboratoire de Mécanique et Technologie ENS Cachan / CNRS / Université Paris 6*.

## Le modèle de fluage ACI 209 :

### Notations et unités :

$t$ :âge du béton (jours)  
 $t_0$  :âge du béton au chargement (jours)  
 $t_s$ :âge du béton au début du retrait (jours)  
 $E_{cm(t_0)}$ :module d'élasticité du béton au chargement (MPa)  
 $f'_{c(28)}$ :résistance du béton à 28 jours (MPa)  
 $\gamma_c$ :masse spécifique du béton (kg/m<sup>3</sup>)  
 $K_{SH}$ :facteur tenant compte de l'effet de l'humidité relative sur le retrait  
 $K_{SS}$ :facteur tenant compte de l'effet des dimensions de la pièce sur le retrait  
 $K_{CP}$ :facteur tenant compte de l'effet de la durée de la cure sur le retrait  
 $K_{CS}$ :facteur tenant compte de l'effet des dimensions de la pièce sur le fluage  
 $K_{CH}$ :facteur tenant compte de l'effet de l'humidité relative sur le fluage  
 $K_{CA}$ :facteur tenant compte de l'effet de l'âge au chargement sur le fluage  
 $\epsilon_{sh}$ :déformation de retrait ultime  
 $\epsilon_s(t)$ :déformation de retrait au temps  $t$   
 $C_{cu}$ :coefficient de fluage ultime  
 $C_c(t)$ :coefficient de fluage au temps  $t$   
 $V/S$ :rapport du volume à la surface en contact avec l'atmosphère (mm)  
 $H$ :humidité relative (%)  
 $J(t,t_0)$ :valeur de la fonction de fluage au temps  $t$  (MPa<sup>-1</sup>)  
[ACI 209 R-92, 1992]

### Calcul du fluage :

$$C_c(t) = \left[ \frac{(t - t_0)^{0,6}}{(t - t_0)^{0,6} + 10} \right] \cdot K_{CS} \cdot K_{CA} \cdot K_{CH} \cdot C_{cu}$$

$$K_{CS} = (2/3) \cdot [1 + 1,13 \cdot \exp[-0,0213 \cdot (V/S)]]$$

$$K_{CH} = 1,27 - 0,0067 \cdot H$$

$$C_{cu} = 2,35$$

$$K_{CA} = 1,25 t_0^{-0,118} \text{ si cure humide}$$

$$1,13 t_0^{-0,064} \text{ si cure vapeur}$$

$$f'_{c(t)} = f'_{c(28)} \cdot \left[ \frac{t_0}{b + c \cdot t_0} \right]$$

pour les ciments ASTM type I :  $b = 4$  et  $c = 0,85$  pour les cures humides

$b = 1$       $c = 0,95$  pour les cures vapeurs

pour les ciments ASTM type II :  $b = 2,3$  et  $c = 0,92$  pour les cures humides

$b = 0,7$       $c = 0,98$  pour les cures vapeurs

$$E_{cm(t)} = 0,043 \cdot \gamma_c^{3/2} \cdot f'_{c(t)}^{0,5}$$

$$J(t, t_0) = \frac{1 + C_c(t)}{E_{cm(t)}}$$

### Le modèle de fluage SAKATA :

Calcul du fluage :

$$\varepsilon'_{cc}(t, t', t_c) = (\varepsilon'_{bc} + \varepsilon'_{dc}) \times [1 - \exp\{-0.09(t-t')^{0.6}\}] \times 10^{-10}$$

$$\varepsilon'_{bc} = 15 (c + w)^{2.0} (w/c)^{2.4} \{\ln(t')\}^{-0.67} \times 10^{-10}$$

$$\varepsilon'_{dc} = 4500 (w/c)^{4.2} (c + w)^{1.4} [\ln\{(v/s)/10\}]^{-2.2} \{1 - (RH/100)\}^{0.36} (t_0)^{-0.30} \times 10^{-10}$$

La fonction de fluage :

$$J = \varepsilon'_{cc}(t, t', t_0) + (1 / E_c(t_0))$$

Avec  $E_c(t_0)$  est calculé a partir du code CEB 90 .

### Le modèle de fluage GZ (GARDNER):

Notations et unités :

t:âge du béton (jours)

t<sub>0</sub>:âge du béton au chargement (jours)

t<sub>c</sub>:âge du béton au début du retrait (jours)

$E_{cm(t_0)}$ :module d'élasticité au chargement (MPa)

$E_{cm28}$ :module d'élasticité moyen à 28 jours

$f_{ck28}$ :résistance caractéristique du béton à 28 jours

$f_{cm28}$ :résistance moyenne à 28 jours (MPa)

$f_{cm,t}$ :résistance moyenne au temps t (MPa)

$f_{cm,t_0}$ :résistance moyenne au chargement (MPa)

$f_{cm,t_c}$ :résistance moyenne au début du retrait (MPa)

h:humidité relative (décimal)

K:facteur tenant compte de l'effet du type de ciment sur le retrait

$\beta(h)$ :terme de correction tenant compte de l'effet de l'humidité relative sur le retrait

$\beta(t)$ :terme de correction tenant compte de l'effet du temps sur le retrait

V/S:rapport volume sur surface en contact avec l'extérieur (mm)

J(t-t<sub>0</sub>):valeur de la fonction de fluage au temps t (MPa<sup>-1</sup>)

$\varepsilon_{sh}$ :déformation de retrait

$\varepsilon_{sh,u}$ :déformation de retrait ultime

### Calcul du fluage :

$$\text{Coefficient de fluage} = [\phi(t)] [\phi(t_c)] \sqrt{\frac{f_{cm28}}{f_{cm10}}} \left[ 1.5 + (2.86) \sqrt{\frac{4000}{f_{cm10}}} \frac{(1 - 1.086h^2)(t - t_a)}{t - t_a + 32(V/S)^2} \right]$$

$$\text{Avec : } \phi(t) = \frac{7.27 + \ln(t - t_a)}{17.18}$$

$$\phi(t_c) = 1 \quad \text{si } t_0 = t_c$$

$$= \left[ 1 - \frac{\epsilon_{sh}(t_0 - t_c)}{\epsilon_{sh}(20000 - t_c)} \right]^{0.5} \quad \text{si } t_0 > t_c$$

### Le modèle de fluage B3 :

#### Calcul du fluage :

La déformation de fluage se divise suivant un terme de complaisance de fluage propre et de fluage de dessiccation comme suit :

$$\epsilon_{fl}(t) = [C_o(t, t') + C_d(t, t', t_0)] \sigma(t)$$

- La complaisance de fluage propre :

$$C_o(t, t') = q_2 Q(t, t') + q_3 \ln(1 + (t - t')^n) + q_4 \ln(t / t')$$

- La complaisance de fluage de dessiccation :

$$C_d(t, t', t_0) = q_5 [\exp\{-8H(t)\} - \exp\{-8H(t')\}]^{1/2}$$

Avec :

$$q_1 = \frac{0.6 * 10^6}{E_{28}}$$

$$q_2 = 185.4 \times \sqrt{c} \times (\bar{f}_c)^{-0.9}$$

$$q_3 = 0.29 \times (\omega / c)^4 \times q_2$$

$$q_4 = 20.3 \times (a / c)^{-0.7}$$

$$q_5 = 7.57 \times 10^5 \times (\bar{f}_c)^{-1} |\epsilon_{sh\infty}|^{-0.6}$$

#### La fonction de fluage :

$$j(t, t') [\mu\epsilon / \text{psi}] = q_1 + C_o(t, t') + C_d(t, t', t_0)$$

### Le modèle de fluage Eurocode2 :

Le modèle de fluage européen Eurocode 2 est réglementairement, le code de calcul à appliquer à tout élément en béton plein ou armé dans des conditions d'états limites de service . Pour les structures courantes, la vérification des déformations différées de fluage et de retrait ne semble pas toujours nécessaire. A l'inverse, lorsqu'il s'agit de structures particulièrement sensibles aux mécanismes différés, ces règles de calcul ne semblent pas toujours suffisantes.

#### Calcul du fluage :

La déformation de fluage  $\varepsilon_{fl}(t)$  est obtenue d'après le coefficient de fluage  $\phi(t, t')$  et la raideur tangente conventionnelle à 28 jours du béton  $E_{i28}$ .

$$\varepsilon_{fl}(t) = \frac{\phi(t, t')}{E_{i28}} \sigma(t)$$

Le coefficient de fluage  $\phi(t, t')$  est de la forme suivante :

$$\phi(t, t') = \phi_0 \times \beta_c(t - t')$$

Avec :

$$\phi_0 = \phi_{RH} \times \beta(\bar{f}_c) \times \beta(t')$$

Le facteur  $\phi_{RH}$  tient compte de l'humidité relative RH en fonction du rayon moyen de la pièce  $h_0$  (en mm) qui est calculé par le rapport de la section transversale  $A_c$  sur le périmètre en contact avec l'air ambiant  $\mu$ . Pour un cylindre, le rayon moyen est déterminé par l'équation suivante :

$$h_0 = \frac{2 \times \pi \times r^2}{2 \times \pi \times r} = r$$

$$\phi_{RH} = 1 + \frac{1 - RH/100}{0.10 \times \sqrt[3]{h_0}} \quad \text{pour } \bar{f}_c \leq 35 \text{MPa}$$

$$\phi_{RH} = \left[ 1 + \frac{1 - RH/100}{0.10 \times \sqrt[3]{h_0}} \times \alpha_1 \right] \times \alpha_2 \quad \text{pour } \bar{f}_c > 35 \text{MPa}$$

### Le modèle de fluage BPEL 91 :

#### Calcul du fluage :

La déformation de fluage  $\varepsilon_{fl}$  est calculée sur la base de la déformation instantanée conventionnelle à 28 jours  $\varepsilon_{ic}$  et du coefficient de fluage  $\phi$  comme suit :

$$\varepsilon_{\bar{n}}(t) = \varepsilon_{ic} \phi(t, t') \quad \text{et} \quad \varepsilon_{ic} = \frac{\sigma(t)}{E_{i28}}$$

Le coefficient de fluage  $\phi$  résulte du produit du coefficient de fluage  $K_{\bar{n}}(t)$  avec une fonction de fluage  $f(t-t_0)$  qui quantifie l'amplitude de la déformation en fonction de la durée de maintien du chargement.

Avec :

$$\phi(t, t') = K_{\bar{n}}(t') f(t - t')$$

$$K_{\bar{n}}(t') = k_s [k_c + k_c \times k(t')]$$

$$f(t - t') = \frac{(t - t')^{1/2}}{(t - t')^{1/2} + 5\sqrt{\tau_m}}$$

### **Modèle de fluage CEB 90 (version 99)**

Calcul du fluage :

Le coefficient de fluage se calcul comme suit :

$$\phi(t, \tau_0) = \phi_s \cdot \beta_c(t, \tau_0) = (\phi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0)) \cdot \left[ \frac{\frac{t - t_0}{t_1}}{\beta_{RH} + \frac{t - t_0}{t_1}} \right]^{0,5}$$

$$\phi_{RH} = \left[ 1 + \frac{1 - \frac{RH}{RH_0}}{\sqrt[3]{0,1 \cdot \frac{h}{h_0}}} \right] \alpha_1 \alpha_2 \quad \text{avec} \quad \alpha_1 = \left( \frac{3,5}{\frac{f_{cm}}{f_{cm0}}} \right)^{0,7} \quad \text{et} \quad \alpha_2 = \left( \frac{3,5}{\frac{f_{cm}}{f_{cm0}}} \right)^{0,2}$$

$$\beta(f_{cm}) = \frac{5,3}{\sqrt{\frac{f_{cm}}{f_{cm0}}}}$$

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0,1 + \left( \frac{t_0}{t_1} \right)^{0,7}}$$

$$\beta_{RH} = 150 \cdot \frac{h}{h_0} \left( 1 + \left[ 1,2 \cdot \frac{RH}{RH_0} \right]^{18} \right) + 250 \alpha_3 < 1500 \alpha_3 \quad \text{avec} \quad \alpha_3 = \left( \frac{3,5}{\frac{f_{cm}}{f_{cm0}}} \right)^{0,5}$$