

**UNIVERSITE SAAD DAHLAB. BLIDA**

**Faculté des Sciences de l'Ingénieur**

**MEMOIRE DE MAGISTER**

**En Génie Civil**

**Spécialité : Construction**

**ÉTUDE DES VARIATIONS DIMENSIONNELLES  
SPONTANNEES DES MATERIAUX TRAITES AUX  
LIANTS HYDRAULIQUES**

**Par**

**BELHADJI KHALIDA**

**Devant le jury composé de**

|                              |                             |                   |                   |
|------------------------------|-----------------------------|-------------------|-------------------|
| <b>ABED Mohamed</b>          | <b>Professeur</b>           | <b>U.S.D.B</b>    | <b>Président</b>  |
| <b>OUDJIT Mohamed Nadjib</b> | <b>Maître de conférence</b> | <b>U.S.T.H. B</b> | <b>Examineur</b>  |
| <b>SLITAINE Mohamed</b>      | <b>Charge de cours</b>      | <b>U.S.D.B</b>    | <b>Invité</b>     |
| <b>BRAHMA Abdelmalek</b>     | <b>Professeur</b>           | <b>U.S. D.B</b>   | <b>Rapporteur</b> |

**Blida année 2012**

## RESUME

Le retrait de la pâte de ciment est souvent à l'origine de nombreuses fissurations observées dans les structures en béton. Dans le cadre de cette étude nous nous sommes intéressés uniquement à l'étude du retrait endogène aux jeunes et très jeunes âges.

Le retrait endogène, conséquence de la contraction « Le Chatelier », est un phénomène bien connu de l'industrie cimentière. Le développement et l'utilisation de plus en plus fréquente des bétons posent de nouveaux problèmes sur l'apparition et la mesure du retrait endogène.

Sous certaines conditions (climatiques, structurales...), ces déformations, causées par l'évolution structurale du matériau et l'exothermie du processus d'hydratation du ciment, sont suffisantes pour provoquer la fissuration prématurée des ouvrages en béton.

Le présent travail porte sur l'étude du développement des déformations des pâtes de ciment en conditions endogènes, durant, pendant les premières 24 heures d'hydratation.

Dans le présent travail nous proposons une modélisation du retrait endogène de pâte de ciment. Les paramètres du modèle développé sont par la suite identifiés par rapport aux résultats expérimentaux très représentatifs disponibles dans la littérature.

En fin nous procédons à la validation du modèle de prédiction conçu par confrontation aux résultats expérimentaux et par sa comparaison avec d'autres modèles de prédiction. Nous traitons aussi des relations qui existent entre le modèle de prédiction conçu et d'autres phénomènes liés à l'hydratation de ces liants.

Mots clés : Retrait endogène, pâte de ciment, microstructure, contraction Le Chatelier, modélisation mathématique.

## ABSTRACT

The shrinkage of cement paste is often the main origin of numerous cracking that have been observed in structures made of concrete. In this research we were interested only to study the autogenous shrinkage at early ages.

Autogenous shrinkage is a physical consequence of the deformation called Le Chatelier contraction, and it is a phenomenon well known in the industry of cements. In concretes development and the use more and more frequent of concretes pose new problems on the apparition and the measure of the autogenous shrinkage.

Under certain conditions (climatic, structural...), these deformations, caused by the structural evolution of material and the exothermy of the cement hydration process, are sufficient cause early cracking in concrete structures.

This work is studying the development of deformation of cement paste in endogenous conditions, at early and very early age, during the 24 first hours of hydration.

In This work we propose a model of Autogenous shrinkage of cement paste. The model parameters are developed identified as a result compared to experimental results very representative available in the literature.

As a résultat we proceed to validate the model prédiction obtained by comparison with expérimental results and its comparison with other prédiction models. We also discuss the relations between model prédiction and other parameters.

Key words: Autogenous shrinkage, cement paste, microstructures, chemistry, physical, hydrostatic weighing, le Chatelier contraction, mathematical model.

## ملخص

إن ظاهرة الانكماش في عجائن الاسمنت ، في غالب الأحيان تؤدي إلى تشققات ملحوظة على مستوى هياكل الخرسانات.

في إطار هذه الدراسة اهتمنا بدراسة ظاهرة الانكماش الداخلي على مدى الأعمار القصيرة والقصيرة جدا

الانكماش الداخلي وكنتيجة لظاهرة انكماش لوشاتولييه ، ظاهرة معروفة عند صناعة الخرسانات ، وتطور استعمالاته بطرح مشاكل صناعية في ظهور وتقدير الانكماش الداخلي , تحت تأثير عدة عوامل -مناخية هيكلية- ، فإن هذه التشوهات قادرة على خلق عدة تشققات تؤثر على هيكل الخرسانة ومدى متانتها على المدى الطويل.

في هذه الدراسة نقتراح نموذج توقعي لدراسة تطور هذه التشوهات خلال 24 ساعة الأولى من عملية امتصاص الماء، ثم مقارنتها مع النتائج التجريبية التي تم الوصول إليها في دراسات سابقة

## DEDICACE

Je dédie ce modeste travail à mon *père* que dieu tout-puissant accorde à sa défunte sa sainte miséricorde et l'accueille dans son vaste paradis.

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

A toute ma famille.

A mes ami (es) sans exception.

A tous ceux et celles qui ont collaboré de près ou de loin a achever ce travail.

## REMERCIEMENT

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

Je présente mes sincères remerciements à Mr/CHEMLAL NOURDINN Directeur de l'institut de génie civil à l'université de Blida.

Je tiens à remercier le professeur A. BRAHMA de l'institut de Génie Civil de l'université de Blida, pour m'avoir dirigé et suivi, et pour ses précieux conseils, qu'il n'a cessé de me prodiguer et pour toute son aide pour la réalisation de ce mémoire.

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 a aidé à la réalisation de ce mémoire.

## TABLE DES MATIERES

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| RESUME .....               | I   |
| ABSTRACT.....              | II  |
| REMERCIEMENTS.....         | IV  |
| TABLE DES MATIERES.....    | VI  |
| LISTE DES FIGURES.....     | IX  |
| LISTE DES TABLEAUX .....   | XI  |
| INTRODUCTION GENERALE..... | XII |

### CHAPITRE 1. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

|  |    |
|--|----|
| 1.1 Introduction .....   | 2  |
| 1.2 Les caractéristiques de la pâte de ciment... ..                    | 2  |
| I.2.1 Structure et morphologie du gel de C-S-H.....                    | 2  |
| I.2.2 Les pores de la pâte de ciment .....                             | 3  |
| I.2.3 L'eau dans la pâte de ciment.....                                | 4  |
| 1.3 Déformation de la pâte de ciment.....                              | 6  |
| 1.3.1 Le retrait.....  | 6  |
| 1.3.2 Cinétique d'hydratation.....                                     | 7  |
| 1.3.3 Le degré d'hydratation.....                                      | 8  |
| 1.4 Les variations volumiques.....                                     | 8  |
| 1.4.1 Changements autogènes de volume et ciments expansifs.....        | 8  |
| 1.4.2 Variation de volume due au changement de teneur en humidité..... | 9  |
| 1.4.3 Effets de la teneur en ciments et en eau sur le retrait.....     | 10 |
| 1.5 Les différents types de retrait.....                               | 10 |
| 1.5.1 Le Retrait plastique.....  | 10 |

|   |    |
|---|----|
| 1.5.2 Le Retrait thermique.....                     | 11 |
| 1.5.3 Le retrait par carbonatation .....            | 11 |
| 1.5.4 Le retrait de dessiccation .....              | 12 |
| 1.5.5 Le retrait d'autodessiccation .....           | 12 |
| 1.5.6 Le retrait endogène .....                     | 13 |
| 1.5.6.1 Le retrait endogène d'origine chimique..... | 13 |
| 1.5.6.2 Le retrait endogène d'origine physique..... | 15 |
| 1.5.6.3 La contraction « Le Chatelier ».....        | 16 |
| 1.6 Paramètres influençant le retrait endogène..... | 18 |
| 1.6.1 Le rapport E /C .....                         | 18 |
| 1.6.2 Les propriétés du ciment .....                | 19 |
| 1.6.3 Les types et classification du granulat ..... | 19 |
| 1.6.4 Les effets des adjuvants .....                | 20 |
| 1.6.5 vitesses de séchages.....                     | 20 |
| I.7. Conclusion.....                                | 21 |

## **CHAPITRE 2. METHODES DE PREDICTIONS**

|   |    |
|---|----|
| 2. 1 Introduction .....   | 23 |
| 2.2 Quelques tentatives de modélisation du retrait endogène.....  | 23 |
| 2.2.1 Principe de maturité sur le retrait volumique endogène..... | 24 |
| 2.2.2 Approche basée sur la dépression capillaire.....            | 26 |
| 2.2.3 Approche basée sur la tension superficielle .....           | 29 |
| 2.3 Conclusion .....  | 29 |

## **CHAPITRE 3. MODELISATION ET VALIDATION**

|  |    |
|--|----|
| 3.1 Introduction .....                       | 31 |
| 3.2 Estimation des paramètres du modèle..... | 33 |
| 3.3 Test des constantes.....                 | 35 |

|  |           |
|--|-----------|
| 3.4 Validation du modèle.....  | 35        |
| 3.5 Validation du modèle para port à d'autre résultats donnés dans la littérature..... | 44        |
| 3.6 Comparaison avec d'autres modèles donnée dans la littérature.....                  | 44        |
| 3.7 Application du modèle développé.....   | 45        |
| 3.7.1 Influence de la présence d'adjuvants.....  | 45        |
| 3.7.2 Influence du type de ciment.....   | 46        |
| 3.8 Application du modèle sur l'évolution du degré d'hydratation avec le modèle.....   | 48        |
| 3.9 Evolution du Retrait endogène .....  | 48        |
| Conclusion .....   | 49        |
| <br>   |           |
| <b>CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS.....</b>                                     | <b>50</b> |
| <b>ANNEXE</b>  |           |

## LISTE DES FIGURES

|  |    |
|--|----|
| Figure 1.1: Représentation schématique de la microstructure du gel de C-S-H selon le modèle de Feldman et Sereda (1968).....                               | 3  |
| Figure 1.2: État de l'eau dans le gel de C-S-H selon Sierra(1974 cité par Regourd 1982).....   | 5  |
| Figure1.3: Description idéalisée de l'eau dans les zones d'adsorption empêchée et de la transition avec les pores capillaires (Bazant 1972).....           | 6  |
| Figure 1.4 : Mesure du retrait endogène d'origine chimique dans une pâte de ciment.....  | 13 |
| Figure 1.5 : Retrait endogène de dessiccation ou d'autodessiccation.....   | 16 |
| Figure 1.6 : Evolution de la contraction Le Chatelier et du retrait Endogènes volumique pour une pâte de ciment de $E/C= 0.40$ . Extrait de (SELL 94)..... | 17 |
| Figure 1.7 : Influence du Rapport E/C sur la valeur du retrait .....   | 19 |
| Figure 2.1 : Application du principe de maturité sur le retrait volumique endogène (Turcry et al.) .....   | 24 |
| Figure 2.2 : Application du principe de maturité sur le retrait volumique endogène (Mounanga et al.. 2006).....  | 25 |
| Figure2.3: Comparaison entre le modèle et les mesures expérimentaux Hua .....  | 27 |

|   |    |
|---|----|
| Figure 3.1 : Allure de l'évolution du retrait endogène .....  | 31 |
| Figure 3.2 : Courbe représentative de l'image par une transformation affine de la sigmoïde du modèle à développer.....                                      | 32 |
| Figure 3.3 : Comparaison des valeurs du retrait prévu par le modèle et celles obtenues expérimentalement par [38] à E/C =0.25.....                          | 37 |
| Figure 3.4 : Comparaison des valeurs du retrait prévu par le modèle et celles obtenues expérimentalement par [38] à E/C =0.30.....                          | 39 |
| Figure 3.5 : Comparaison des valeurs du retrait prévu par le modèle et celles obtenues expérimentalement par [38] à E/C =0.35.....                          | 41 |
| Figure 3.6 : Comparaison des valeurs du retrait prévu par le modèle et celles obtenues expérimentalement par [38] à E/C =0.40.....                          | 43 |
| Figure 3.7 : Comparaison du modèle avec résultats expérimentaux de Bouasker [56] et Mounanga [38] pour t= 20°Cet E/C = 0.30.....                            | 44 |
| Figure 3.8 : Comparaison du modèle avec ceux de Bouasker [56] et Mounanga [38] ....   | 45 |
| Figure 3.9 : Comparaison du modèle avec résultats expérimentaux de pâtes de ciment à E/C= 0.25, avec ou sans adjuvant et conservées à 20°C [38].....        | 46 |
| Figure 3.10 : Comparaison du modèle avec Evolution du retrait chimique en fonction de l'âge d'hydratation des trois types de Ciments (E/C = 0,30) [56]..... | 47 |
| Figure 3.11 Corrélation entre le modèle et l'évolution du degré d'hydratation obtenue Par [38] à t = 20°C ,30°C et 40°C (E/C = 0,25).....                   | 48 |
| Figure 3.12 Corrélation entre le modèle et l'évolution du retrait endogène obtenue Par[38] (t= 20°C et E/C = 0,25).....                                     | 49 |

## LISTE DES TABLEAUX

|   |    |
|---|----|
| Tableau 1.1 : Valeurs de « A » pour différents ciments d'après BRESSON J..... | 7  |
| Tableau 3.1.a : Valeurs des paramètres k, a, r, pour E/C=0.25 .....           | 34 |
| Tableau 3.1.b : Valeurs des paramètres k, a, r, pour E/C=0.30.....            | 34 |
| Tableau 3.1.c : Valeurs des paramètres k, a, r, pour E/C=0.35.....            | 34 |
| Tableau 3.1.d : Valeurs des paramètres k, a, r, pour E/C=0.40.....            | 34 |
| Tableau 3.2. a : Tests du paramètre « k».....                                 | 35 |
| Tableau 3.2. b : Tests du paramètre « a».....                                 | 35 |
| Tableau 3.2. c : Tests du paramètre « r».....                                 | 35 |

## INTRODUCTION GENERALE

Les structures en béton se retrouvent parfois soumises à de fortes sollicitations avant même la fin de leur mise en œuvre. Ces sollicitations sont liées aux conditions de chantiers (exemple : décoffrage rapide pour une vitesse de rotation des banches, reprise de bétonnage, conditions climatiques...). Ces sollicitations aboutissent souvent, à long terme, à la fissuration et quelque fois à la ruine de l'ouvrage.

Les dommages, ainsi observés, se produisent souvent à deux échéances différentes dans le temps. A long terme, elles sont plutôt liées à une perte de durabilité qui peut provenir des variations volumiques du matériau pendant la vie de l'ouvrage, dues aux attaques extérieures ou aux sollicitations mécaniques extrêmes liées à l'exploitation de l'ouvrage. Le second type de dommage peut avoir lieu, avant même la mise en service de l'ouvrage et peut avoir des conséquences directes sur le comportement de la structure à long terme. L'apparition de macro et de micro fissures au jeune âge est la manifestation la plus directe de ce type de dommage.

Les causes de ce type de dommage font encore de nos jours l'objet d'études (Monge, 2007 ; Moon *et al.*, 2006 ; Radlinska *et al.*, 2006). C'est ce second type de défaillance auquel nous nous intéressons lors de cette présente étude.

Au jeune et très jeune âge, c'est-à-dire au cours de la prise et des premiers jours qui suivent, les matrices cimentaires manifestent d'importantes variations volumiques d'origines différentes (thermique, hydrique ou physico-chimique). Ces déformations (le retrait endogène et le retrait chimique) ces déformations induisent au jeune âge un risque élevé de fissuration précoce (Turcry, 2004).

Le retrait endogène est lié au fait que le volume des hydrates issus des réactions d'hydratation est inférieur à la somme des volumes du ciment et de l'eau qui réagissent : c'est la contraction Le Chatelier. A cela s'ajoute une progressive désaturation de l'espace poreux capillaire causée par la consommation de l'eau pendant le processus d'hydratation.

Cette autodessiccation engendre une dépression capillaire interne qui se traduit par la contraction du matériau : ce retrait, dit d'autodessiccation, correspond à la phase de retrait endogène mesuré après la prise du matériau.

L'objectif premier de la présente étude est d'analyser et modéliser les déformations spontanées des pâtes de ciment au très jeune âge.

Nous avons développé un modèle mathématique donnant l'évolution des variations dimensionnelles spontanées (retrait endogène) des pâtes de ciment. Ce modèle prend en compte les paramètres les plus influents à savoir les différents rapports E/C et différentes températures de conservation. Nous avons scindé notre travail en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique sur la structuration de la pâte de ciment à différentes étapes, les mécanismes d'hydratation, les différents types de retraits, les techniques de mesure associées et les facteurs qui influencent ces derniers.

Dans le deuxième chapitre, nous commentons quelques méthodes de prédiction disponibles dans la littérature

Dans le troisième chapitre, nous procédons à la modélisation du retrait endogène (chimique) de la pâte de ciment. Les paramètres du modèle développé sont comparés aux résultats expérimentaux disponibles dans la littérature. Nous procédons à la validation du modèle de prédiction conçu par confrontation aux résultats expérimentaux et par sa comparaison avec d'autres modèles de prédiction existants.

**CHAPITRE 1**  
**ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

## **CHAPITRE 1**

### **ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

#### **1.1 Introduction**

Dans ce chapitre, une analyse bibliographique du comportement hydromécanique des matériaux à matrice cimentaire est menée ; la pâte de ciment étant le siège des déformations différées observées sur les bétons .Il nous paraît important, on premier lieu, de rappeler brièvement les principales propriétés des pâtes de ciment en cours d'hydratation .en deuxième lieu le comportement expérimental et une analyse des mécanismes à l'origine des déformations endogène sont effectuées. Cette étude permettra de mettre en évidence les propriétés importantes du comportement hydromécanique à prendre en compte dans la modélisation.

#### **1.2 Caractéristiques de la pâte de ciment**

La connaissance de la structure de la pâte de ciment est essentielle pour comprendre le comportement et les propriétés du béton. La pâte de ciment joue le rôle de «colle », qui confère au matériau béton ses propriétés de rigidité et de résistance. Elle est constituée de différents composés chimiques, dont le gel de C-S-H (silicate de calcium hydraté), à l'origine de son pouvoir adhérent. Elle se compose aussi de pores à différentes échelles, contenant de l'eau et/ou de l'air.

L'eau en est un élément essentiel, elle lui confère en effet ses propriétés de maniabilité (pour le transport et le moulage avant la prise) et de résistance mécanique (après avoir réagi avec le clinker). Mais elle est aussi responsable de ses principaux défauts (augmentation de la porosité et diminution de la résistance mécanique, présence inhérente d'agents agressifs, possibilité de transport d'agents agressifs, retrait et fluage).

##### **1.2.1 Structure et morphologie du gel de C-S-H**

Le C-S-H (ou gel de C-S-H) est l'hydrate principal du ciment Portland. Il est responsable de la structuration de la pâte de ciment durcie. Il est composé de particules solides (composition  $(CaO)(SiO_2)_x(H_2O)_y$  où les valeurs de x et y dépendent de la teneur en calcium et en silicates dans la phase aqueuse, (Viallis-Terrisse 2000)[1].

Il présente une grande surface spécifique (caractéristique des gels colloïdaux) et une porosité d'environ 28%. La morphologie du gel serait peu influencée par le type de ciment utilisé ou le rapport E/C (Hansen 1986, Baroghel Bouny 1994) [7]. Les surfaces du gel de ciment sont très attractives. Elles adhèrent entre elles et avec les autres éléments constitutifs du béton (sable, granulats, portlandite ...), ce qui explique le rôle de « colle » du ciment.

De nombreux modèles existent dans la littérature scientifique pour décrire sa structure et sa morphologie. Toutefois il semble que le modèle proposé par Feldman et Sereda (1968) [3] soit le plus à même de justifier la plupart des comportements différés de la pâte de ciment (Guénot Delahaie 1997) [4]. Dans ce modèle, les C-S-H se présentent sous la forme de fibres formées de lamelles enroulées sur elles-mêmes. La lamelle de C-S-H est considérée de forme prismatique et ses dimensions sont environ de  $100\ 000 \times 5000 \times 300\ \text{nm}^3$  (estimées à partir de mesures au microscope électronique à balayage, (Hansen T.C 1986) [6]. Chaque lamelle est constituée de 2 à 4 feuilletts simples mal cristallisés (Figure I-1), séparés par des espaces interfoliaires de 150 à 300 nm environ (Regourd M 1982) [8]. Ces feuilletts sont capables d'avoir un mouvement relatif et la pénétration ou le départ de l'eau des espaces interfoliaires est possible.

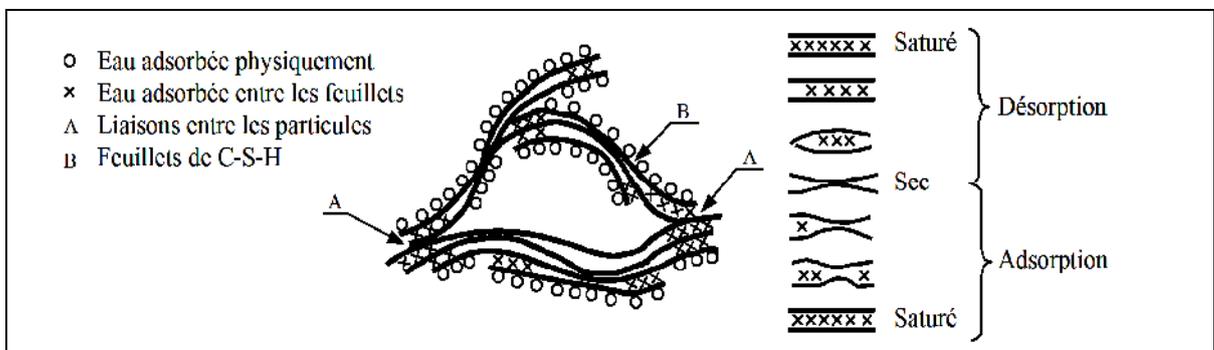


Figure 1.1 : Représentation schématique de la microstructure du gel de C-S-H selon le modèle de Feldman et Sereda (1968) [3].

### **1.2.2 Pores de la pâte de ciment**

La pâte de ciment présente une porosité à différentes échelles d'observation. Sa caractérisation expérimentale nécessite alors l'emploi de différentes techniques d'investigation selon l'échelle désirée. Bien que ces techniques nécessitent souvent un remaniement de l'échantillon (par exemple un séchage préalable dans le cas de l'essai de

porosimétrie au mercure), elles permettent de donner un ordre de grandeur de la taille et de la distribution des pores. On distingue généralement (les bulles d'air ont été omises) :

□ La porosité capillaire: vestige de la porosité initiale du clinker, sa dimension caractéristique se situe dans la plage 0,01 — 50  $\mu\text{m}$ . Il semble que les différences structurales entre des pâtes de ciment, de type ou de rapports E/C différents, proviennent essentiellement des différences entre les porosités capillaires (Hansen 1986[2], Baroghel Bouny 1994) [7];

□ La porosité du gel de C-S-H: porosité intrinsèque aux hydrates (environ 0,28), sa dimension caractéristique, de l'ordre du nanomètre, est beaucoup plus faible que celle de la porosité capillaire.

### **1.2.3 Eau dans la pâte de ciment**

L'eau est généralement classifiée selon la nature de sa liaison avec la pâte de ciment hydratée. Les différentes classes sont dans l'ordre croissant de liaison (Regourd 1982[5], Guénot-Delahaie 1997): [4]

□ L'eau libre : elle n'est pas soumise aux forces d'attraction des surfaces solides. Elle se trouve principalement dans les pores capillaires de dimension supérieure à 10  $\mu\text{m}$ ;

□ L'eau adsorbée : elle est adsorbée sur les surfaces solides

Physiquement: les forces d'attraction sont de type Van Der Waals d'intensité faible (énergie de l'ordre d'une dizaine de  $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ ). Le nombre de molécules d'eau adsorbée est compris entre un et cinq (en fonction de l'humidité relative des pores), où l'énergie de liaison avec le solide décroît lorsque l'on s'éloigne de la surface adsorbante. La structure de l'eau adsorbée et de la surface adsorbante n'est pas affectée par cette adsorption;

□ Chimiquement: des électrons sont mis en commun entre l'eau et la surface solide. L'intensité des forces mises en jeu est moyenne (énergie de l'ordre d'une centaine de  $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ ).

Ainsi, la structure de la molécule d'eau est modifiée (dissociation par rupture de la liaison covalente O-H). Contrairement à l'adsorption physique, celle-ci a lieu uniquement dans des sites privilégiés (défauts cristallins par exemple) sur une couche d'eau au maximum;

□ L'eau chimiquement combinée : elle a réagi chimiquement avec le ciment pour former un nouveau produit, comme le C-S-H, l'étringite etc.....

Ainsi, l'eau est présente dans différents états de liaison dans la pâte de ciment hydratée. Nous verrons plus loin que l'eau présente dans le gel de C-S-H et l'eau présente dans les

zones d'adsorption empêchée semblent jouer un rôle majeur dans le comportement différé du béton. Les caractéristiques des eaux concernées sont présentées brièvement

- Eau dans les C-S-H: a partir de multiples méthodes expérimentales, Sierra (1974 cité par (Regourd M1982 [8]) a pu identifier dans la structure des C-S-H, la présence de l'eau sous trois formes, classées ici par ordre décroissant d'énergie de liaison avec le solide (Figure 1.2)

- L'eau hydroxylique (groupe OH): elle est liée aux atomes de silicium et de calcium à la surface des feuillets
- L'eau interfoliaire (ou interfeuille): elle est liée aux feuillets par des groupes hydroxyles. Elle intervient dans la cohésion intrinsèque de la lamelle;
- L'eau interlamellaire : elle est soit fixée à la surface des lamelles par un hydroxyle, soit liée à d'autres molécules d'eau.

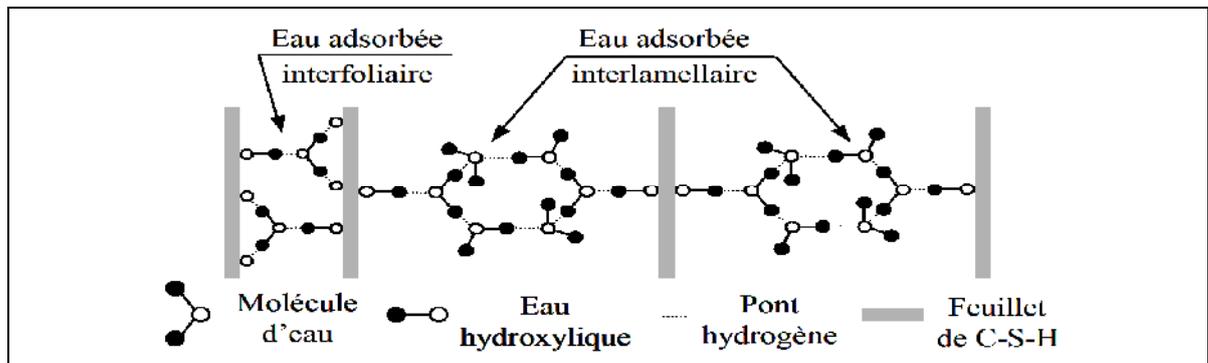


Figure 1.2 : État de l'eau dans le gel de C-S-H selon Sierra (1974 cités par Regourd 1982) [05].

- Eau dans les zones d'adsorption empêchée

Sur une surface plane, l'eau est librement adsorbée jusqu'à une épaisseur de 5 molécules pour une humidité relative proche de l'unité. La molécule d'eau a un diamètre d'environ  $2,6 \text{ \AA}$  ce qui donne une épaisseur de la couche d'adsorption de  $13 \text{ \AA}$ . La distance inter foliaire doit donc être supérieure à  $26 \text{ \AA}$  pour que l'adsorption se produise librement. Or, cette distance est en moyenne proche de  $17 \text{ \AA}$ . L'adsorption libre ne peut donc avoir lieu, puisque les surfaces adsorbantes sont trop proches. On est alors en zone dite d'adsorption empêchée (Figure 1.3). Dans ces zones, l'eau fortement adsorbée, est sous une pression, dite de disjonction, de l'ordre de  $130 \text{ MPa}$  (Bazant 1972) [10].

Cette pression s'oppose aux forces d'attraction, qui existent entre les particules de C-S-H et qui maintiennent la structure du squelette. Cette eau est ainsi un élément structural à part entière du matériau, capable de transmettre localement les contraintes.

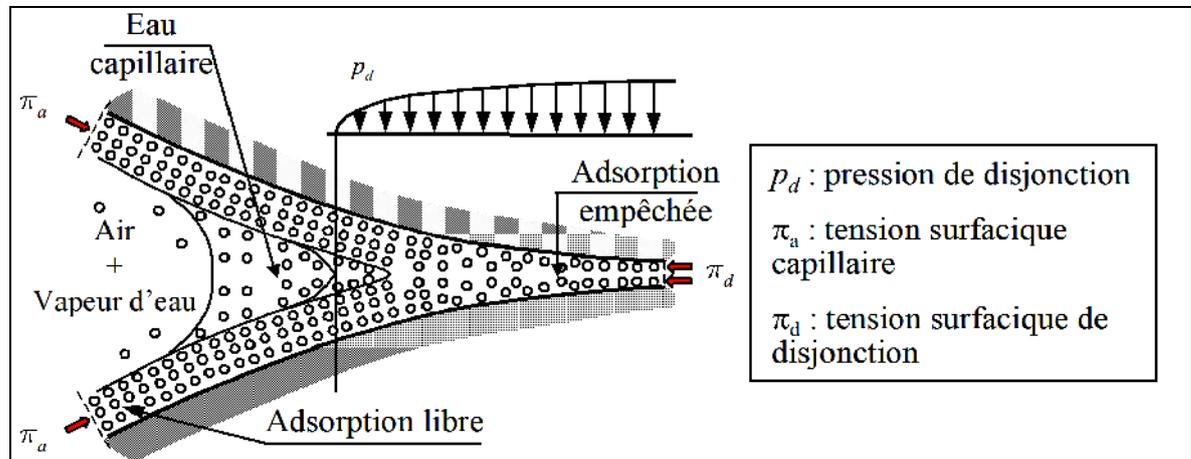


Figure 1.3 :Description idéalisée de l'eau dans les zones d'adsorption empêchée et de transition avec les pores capillaires (Bazant 1972) [10].

### **1.3 Déformation de la pâte de ciment**

La pâte de ciment et donc le béton manifestent des variations dimensionnelles en l'absence de chargement ; ces variations sont surtout en relation avec sa dessiccation (évaporation de l'eau libre) et sa structuration progressive (par hydratation du ciment).

Les dimensions des pièces augmentent ou diminuent, on distingue alors les gonflements et les retraits. Les effets de ces derniers, sont en pratique les plus importants.

#### **1.3.1 Retrait**

Le phénomène du retrait a été observé globalement dès les premières utilisations du ciment, du béton puis du béton armé. Il a fait l'objet depuis 1935, de nombreuses recherches, de par le monde. Les études se poursuivent dans de nombreux laboratoires jusqu'à présent vu la complexité de ce phénomène.

Le retrait du béton peut être défini comme étant la déformation d'un élément de béton libre de toute sollicitation mécanique extérieure et dans une ambiance thermodynamique constante. Autrement dit, c'est un phénomène de raccourcissement qui accompagne la prise et le durcissement de ciment d'un élément de béton libre de toute sollicitation mécanique externe.

Cette variation de volume est causée par l'évaporation de l'eau de gâchage ce qui se traduit par une réduction du volume du béton dans son ensemble.

### **1.3.2 Cinétique d'hydratation**

La cinétique d'hydratation des ciments est très complexe, car les divers composants du ciment présentent des différences importantes à cette égard.

La température joue un rôle important dans la cinétique de l'hydratation, elle favorise les réactions entre l'eau et les constituants anhydres du ciment.

Une loi générale, établie au siècle dernier par ARRHENIUS, montre que toutes les transformations chimiques sont accrues lorsque la température croit. Cette loi est de la forme suivante :

$$K = A \cdot e^{-E/RT} \quad (1.1)$$

K : vitesse de la réaction

A : constante

E : énergie d'activation (j/mol)

R : constante des gaz parfaits (j/k.mol)

T : température (°k)

Pour les réactions d'hydratation des liants hydrauliques, la constante des gaz parfaits est de l'ordre de 8.31 j/k.mol.

La constante A est un facteur qui dépend de la nature du ciment utilisé, elle se détermine expérimentalement à partir d'un grand nombre d'essais, on peut retenir les valeurs suivantes données au tableau 2.1

Tableau 1.1 : Valeurs de « A » pour différents ciments d'après BRESSON J

| Type de ciment | Valeur de A |
|----------------|-------------|
| THR            | 1.20        |
| CPA55R         | 1.30        |
| CPA55          | 1.40        |
| CPJ45R         | 1.50        |
| CPJ45          | 1.70        |
| CLK            | 2.05        |

L'énergie d'activation E peut être mesuré à partir de la loi d'ARRHENIUS en déterminant expérimentalement les vitesses de réaction « k » eq (1.1) à différente température.

L'énergie d'activation peut être aussi considérée comme fonction de température, elle est donnée par les expressions suivantes proposées par HENSSEN ET PEDERSEN (1977).

$$E = 33.5 + 1.47 \times (20 - T) \quad \text{KJ/ mole} \quad \text{pour } T < 20^\circ\text{C}$$

$$E = 33.5 \quad \text{KJ/ mole} \quad \text{pour } T \geq 20^\circ\text{C}$$

### **1.3.3 Degré d'hydratation**

L'hydratation du ciment est un phénomène complexe au cours duquel les différentes phases du matériau s'hydratent selon des cinétiques très différentes (SCHW 97 ; LEA 98). Le degré d'hydratation du ciment est le rapport de la quantité de ciment hydraté à la quantité totale de ciment, défini par la relation suivante :

$$\alpha(t) = \frac{m_{hyd}(t)}{m_c} \times 100\%$$

Avec :

- $\alpha(t)$  : le degré d'hydratation du ciment à l'instant t [%]
- $m_{hyd}(t)$  : la masse de ciment hydraté à l'instant t [kg]
- $m_c$  : la masse initiale de ciment anhydre [kg]

Expérimentalement, le degré d'hydratation se détermine :

- Soit à partir de la quantité de ciment ayant réagi à l'instant t. On parle alors de méthode directe.
- Soit à partir du suivi de l'évolution d'une propriété commune aux différentes réactions d'hydratation (exothermie, accroissement de la quantité d'eau liée, etc.). Ces méthodes sont dites indirectes.

## **1.4 Les variations volumiques**

### **1.4.1 Changements autogènes de volume et ciments expansifs**

Il convient, avant d'examiner les variations de volume résultant du séchage ou de l'humidification du béton durci, de mentionner les changements autogènes de volume.

Ils se produisent, en effet, là ou peu ou pas de changement de la teneur totale en humidité est possible, et jouent un rôle particulièrement important à l'intérieur d'une masse du béton. Deux effets opposés peuvent se produire. Tandis que la réaction entre eau et ciment non hydraté suit son cours, le volume réel du solide augmente. Il en résulte dans la structure des contraintes et, par suite, une dilatation. Par la suite, la quantité d'eau disponible pour la réaction diminue, la pâte de ciment se dessèche d'elle-même et le retrait varie de 0.001 à plus de 0.015 %.

On utilise l'augmentation de volume qui se produit, au cours de leur formation, dans quelques composants, comme principe de mise au point de ciments expansifs.

Quelques-uns d'entre eux, spécialement préparés, subissent à un stade peu avancé des dilatations relativement importantes; si on les utilise dans un béton soumis à des restrictions d'expansion, ils développent le siège des contraintes en compression. Plus tard, lors du séchage, le retrait qui se serait produit est, en tout ou en partie, compensé, de sorte qu'il n'existe plus de contraintes en compression dans le béton.

#### **1.4.2 Variation de volume due au changement de teneur en humidité**

Le mécanisme de la variation de volume qui intervient lors du changement de teneur en humidité n'est pas complètement connu. Lors du séchage du béton la première eau à être évaporée n'engendre aucun changement de volume. On estime qu'il s'agit de l'eau libre contenue dans des "pores" de grandes dimensions. A mesure que le séchage progresse, le retrait devient plus important et à l'état d'équilibre et pour une humidité relative de 50%, on a noté, pour certains bétons, des valeurs de teneur en humidité excédant 0.10 pour cent. Ce comportement est, dans une certaine mesure, qualitativement similaire à celui du bois.

Sur la pâte de ciment pure, on peut observer des retraits excédant 0.40 %; la différence existant entre cette valeur et celle obtenue pour le béton est due à diverses contraintes. Une importante partie du béton est composée d'agrégat relativement inerte (de 3 à 7 fois le poids du ciment), et ceci joint à l'acier d'armature réduit le retrait. En plus des contraintes internes, une certaine contrainte provient du fait de la non uniformité de la contraction de l'élément de béton lui-même.

La perte d'humidité se produit à la surface et engendre un gradient d'humidité. La contraction différentielle qui en résulte est associée à des efforts internes, en traction près de la surface et en compression vers le centre, il peut en résulter des gauchissements ou des fissures.

Si on laisse sécher du béton dans de l'air où l'humidité relative (H. R). s'élève à 50 %, et qu'on le place ensuite dans l'eau, il gonflera. Même après entreposage prolongé, cependant, le béton ne récupérera pas la totalité du retrait initial. Pour la plupart des bétons courants, la partie irréversible du retrait s'élève à environ 30% à 60% de la contraction total dû au durcissement; la plus basse de ces deux valeurs est la plus fréquemment rencontrée. Parce que le retrait exerce une forte influence sur le comportement des constructions en béton on a exécuté des travaux de recherche considérables pour obtenir plus de connaissances sur les facteurs dont il dépend.

### **1.4.3 Effets de la teneur en ciments et en eau sur le retrait**

La teneur en eau est probablement le facteur isolé le plus important exerçant une influence sur le retrait de la pâte et du béton. Pour les échantillons de béton présentant un rapport granulats ciment de 5 à 1, les valeurs typiques de retrait sont 0.04, 0.06, 0.075, et 0.085 % pour des rapports eau ciment de 0.4, 0.5, 0.6 et 0.7 respectivement.

Une des raisons de ces variations consiste dans le fait que la densité et la composition du silicate de calcium formé avec différents rapports eau-ciment peuvent varier légèrement.

D'une manière générale, une teneur plus élevée en ciment augmente le retrait du béton; la relation entre les retraits de la pâte de ciment pure, du mortier et du béton est de l'ordre d'environ 5, 2, et 1. Pour des matériaux donnés, cependant, et pour une teneur uniforme en eau, le retrait du béton varie peu pour un large écart de teneurs en ciment; un mélange plus riche présente un rapport eau-ciment plus faible, et ces facteurs se compensent mutuellement.

## **1.5 Les différents types de retrait**

### **1.5.1 Retrait plastique**

Le retrait plastique se développe dans des bétons qui perdent de l'eau alors qu'ils sont encore à l'état plastique (évaporation rapide de l'eau en surface)

Lorsque la vitesse d'évaporation excède celle du ressuage, et que la période de tassement libre est terminée, une tension hydrostatique commence à prendre naissance dans l'ensemble de la masse à cause de la formation de ménisques à la surface de l'eau des capillaires. Il en résulte des forces de compression à la fois verticales et latérales, ce qui dans une dalle, peut se manifester par des fissures. C'est la fissuration par retrait plastique.

Parmi les mesures préventives l'on compte les pare-soleils, les coupe-vents, l'arrosage à l'eau ou l'application d'un produit de cure destiné à arrêter l'évaporation.

### **1.5.2 Retrait thermique**

Les réactions d'hydratation étant exothermiques, d'après (ACKER, [11], et AITCĪN, [12]), on observe un dégagement de chaleur qui augmente la température du béton. Cette élévation de température provoque dès le début de prise une dilatation pendant que le béton est encore déformable. Lorsque le refroidissement débute, le béton se contracte, alors que la prise a été déjà faite. La rigidité du béton limite la déformation et les contraintes de traction commencent à se développer. Le retrait observé peut entraîner des fissurations, lorsque les déformations de traction dépassent la limite en traction.

L'élévation de température engendrée par les réactions d'hydratation dans la pièce coulée est d'autant plus importante que sa taille est importante, car la dissipation d'énergie se fait moins bien à cause de la grande distance par rapport à la surface et l'augmentation de la température entraîne une accélération de l'hydratation par thermo-activation, ce qui stimule la vitesse de production de chaleur. Le risque de fissuration existe lorsque la contraction thermique d'une pièce de béton est gênée ou empêchée.

### **1.5.3 Retrait par carbonatation**

Lors de la réaction de carbonatation, les composés calciques issus de l'hydratation, principalement la Portlandite, réagissent avec le dioxyde de carbone de l'air pour donner du carbonate de calcium et de l'eau conformément au schéma réactionnel simplifié suivant la transformation cristallographique de la Portlandite en calcite s'accompagne d'une légère diminution du volume. La carbonatation agit surtout en surface à cause de la présence de gaz carbonique dans l'air. Ainsi, pour les bétons ordinaires, on remarque que ce ne sont que les premiers centimètres qui font l'objet de cette réaction, même après plusieurs années. La réaction de carbonatation varie avec l'humidité du béton et l'humidité relative (l'optimum de la cinétique de carbonatation se trouve aux alentours de 65%HR). La diffusivité peut aussi être influencée par la présence de fissures. Le retrait de carbonatation est proportionnel au retrait de dessiccation (BARON) [13]. Dans la plupart des cas, ce retrait est négligeable voire nul.

La réaction entre l'acide carbonique et le ciment hydraté constitue un autre mécanisme susceptible de produire le retrait du béton. Ce retrait atteint une valeur maximale lorsque le béton est en état d'équilibre dans un environnement où l'HR

(BARON) [13] est de 50 %. Combiné avec le retrait dû au séchage, il a pour résultat un fendillement excessif des surfaces exposées à l'air, planchers en béton par exemple, lorsque les teneurs en CO<sub>2</sub> sont élevées. Cette situation se retrouve souvent sur les chantiers de construction l'hiver.

#### **1.5.4 Retrait de dessiccation**

Le retrait de dessiccation est lié au départ de l'eau libre du béton par évaporation dans les conditions normales. Cette eau étant plus ou moins liée à la phase solide, son départ cause un déséquilibre dans le béton qui se traduit alors par un retrait. Il existe trois types d'eau dans une pâte de ciment hydratée : l'eau des pores capillaires, l'eau adsorbée sur les surfaces et l'eau interfeuillet, selon la nature de l'eau évaporée, un mécanisme spécifique à chaque type d'eau va engendrer une partie du retrait de dessiccation de la matrice (AOUAD) [14].

#### **1.5.5 Retrait d'auto-dessiccation**

L'auto-dessiccation correspond à une double diminution de la teneur en eau et du degré de saturation du milieu et se mesure par une décroissance de l'humidité relative interne (Baroghel-Bouny [15] Loukili [16] ; Khelidj[16] )ou une diminution de la pression de la phase liquide Interstitielle (Radocea ) [17]. Existe-t-il un seuil d'autodessiccation (autrement dit, d'humidité relative interne) en dessous duquel, quelle que soit la quantité de ciment résiduelle, l'hydratation s'arrête ? A cette question et sur la base des résultats expérimentaux, (Powers) [18] a répondu par l'affirmative, fixant cette limite à 80% d'humidité relative.

Paillère M [19] et al, Atlassi [20], ont obtenu une évolution asymptotique des cinétiques d'hydratation aux alentours de 75% d'humidité relative. Cependant les travaux de Baroghel-Bouny[15] ont montré qu'il était possible d'atteindre, au sein de bétons âgés d'un an et en conditions endogènes, des niveaux d'humidité relative inférieurs à 75%, contredisant ainsi l'hypothèse de Powers. Cette hypothèse d'une humidité relative limite à 80% avait déjà été remise en cause par Wittman en 1968 [21].

Selon Baroghel-Bouny, lorsque l'eau capillaire fait défaut, les grains de ciment plus hydrophiles que les hydrates, utilisent l'eau adsorbée sur ces derniers pour s'hydrater. Les mesures d'humidité relative ne donnent accès qu'à une donnée macroscopique du matériau, correspondant au rapport de la pression de vapeur régnant dans le réseau poreux sur la pression de vapeur saturante à la température considérée.

### 1.5.6 Retrait endogène

On appelle retrait endogène le raccourcissement qui se produit sans aucun échange avec le milieu extérieur, par opposition avec le retrait exogène qui est dû à un départ d'eau vers le milieu extérieur. La force motrice du retrait endogène est la contraction Le Chatelier due au bilan volumique négatif des réactions d'hydratation.

En conditions endogènes (sans échange de matière avec le milieu ambiant) et sans Chargement extérieur, les matériaux à matrice cimentaire se déforment spontanément tout au long du processus d'hydratation du ciment. Ces déformations résultent de la combinaison de deux phénomènes : d'une part, la contraction Le Chatelier du matériau à l'état frais et son autodessiccation à l'état durci et, d'autre part, le dégagement de la chaleur d'hydratation induisant un gonflement puis une contraction de la matrice lors de son retour à l'équilibre thermique.

#### 1.5.7.1 Retrait endogène d'origine chimique

Ce phénomène a été expliqué par Le Chatelier qui a montré que l'hydratation du ciment s'accompagnait d'une diminution de volume. C'est ainsi qu'il a pu faire la distinction entre «Volume apparent» et «Volume absolu ». Pour démontrer cela, Tazawa et coll. [22] ont utilisé des réservoirs munis d'un tube capillaire, (la même méthode que Le Chatelier avec certaines modifications) et ont les différents réservoirs utilisés pour l'expérience ont été remplis à l'aide des pâtes de ciment de compositions chimiques différentes, celui-ci étant alors rempli avec de l'eau pure jusqu'à mi-hauteur puis bouché afin d'éviter tout évaporation (figure 1. 4).

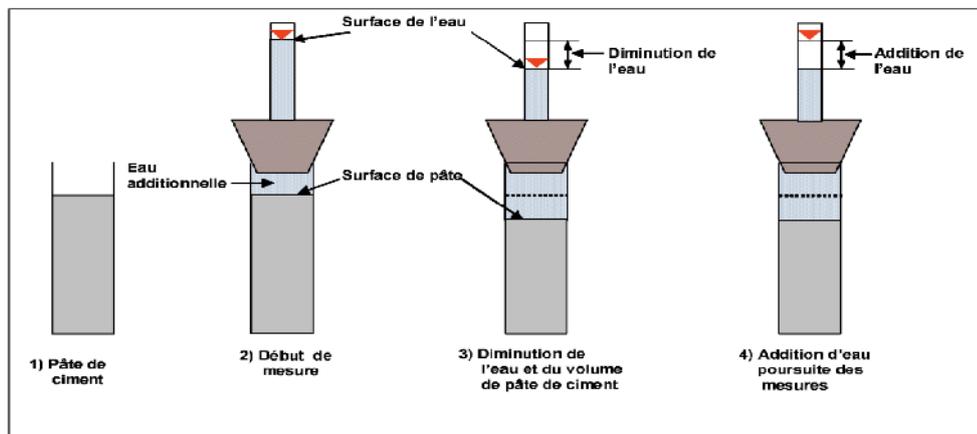


Figure 1. 4 :Mesure du retrait endogène d'origine chimique dans une pâte de ciment

Tazawa et coll. [22].

Cependant, TAZAWA était conscient du fait que les valeurs obtenues dans cette expérience ne représentaient pas la proportion réelle de diminution de volume de la pâte de ciment hydraté, parce que, d'une part l'hydratation a commencé avant la mise en tube et d'autre part, l'hydratation du ciment n'est pas complète. C'est pour cela qu'il a décidé d'aborder le problème d'une façon différente, en considérant les densités de tous les anhydres initiaux et des corps hydratés obtenus.

On utilise quelquefois la carbonatation au cours de la cure des produits en béton en vue de favoriser le retrait et de réduire ainsi les contraintes qui en résultent lorsque les éléments sont incorporés dans une structure. La carbonatation réduit également la perméabilité; cela résulte probablement des dépôts, dans les pores et les capillaires, des produits de la réaction.

Pour estimer le volume de vides formés par l'hydratation d'une pâte de ciment, on peut considérer l'évolution au cours du temps d'un système constitué d'eau et de ciment.

A titre d'exemple le retrait calculé, après la réaction du silicate tricalcique, est réalisé de la manière suivante :

|                 | 2C3S + 6H2O   |       | CS2H3 + 3Ca(OH)2 |       |
|-----------------|---------------|-------|------------------|-------|
| Masse           | 456.6         | 108.1 | 342.5            | 222.3 |
| Masse volumique | 3.15          | 1     | 2.71             | 2.24  |
| Volume          | 145.0         | 108.1 | 126.4            | 99.0  |
|                 | 253.1         |       | 225.6            |       |
|                 | (253.1—225.6) |       |                  |       |

Le retrait chimique  $\frac{\quad}{253.1} * 100 = 10.87\%$

253.1

La densité de chaque composant utilisé dans ce calcul a été donnée par TAZAWA et coll., [22], LEA et coll., [54]. Aux stades précoces de l'hydratation pour 1 jour, la valeur du degré d'hydratation a été fixée en respectant les travaux de YAMAGUCHI et coll. (Tiré de TAZAWA et coll.). Pour des stades plus avancés, TAZAWA a adopté les valeurs données par COPELAND et coll.[23].

Le retrait total de la pâte de ciment à chaque instant de la réaction est alors calculé par addition du retrait calculé pour chaque composant ayant réagi. Ce calcul néglige le changement de volume du gypse.

En ce qui concerne la réaction de  $C_3A$ , d'après (BARCELO) [24] il faut évidemment prendre en compte la contribution du gypse et la contraction de Le Chatelier ultime de  $91 \text{ mm}^3/\text{g}$  de  $(C_3A + \text{gypse})$  ayant réagi. Le bilan volumique associé à la réaction de  $C_3A$  en ettringite donne la valeur de  $265 \text{ mm}^3/\text{g}$ . La contraction ultime est égale à 9%. Le bilan volumique associé à la réaction de  $C_3S$  est de l'ordre de  $73 \text{ mm}^3/\text{g}$  la contraction ultime est alors égale à 10%. Enfin, le bilan volumique associé à la réaction de  $C_3A$  en monosulfo aluminat de calcium donne la valeur de  $-46 \text{ mm}^3/\text{g}$  conduisant à un gonflement de 3 %.

La contraction Le Chatelier n'est donc nullement liée au rapport E/L (eau/liant), à la quantité d'eau ou à la quantité de ciment introduit, elle dépend uniquement, et de façon proportionnelle, de la quantité d'hydrates formés. Cependant, le rapport — contraction Le Chatelier- sur volume total de la pâte varie en fonction de rapport E/L (GRACIA Boivin) [25].

Cette diminution totale du volume de la pâte de ciment n'est toutefois pas représentative de la variation du volume externe apparent. En effet, comme l'a constaté Le Chatelier, la variation du volume externe apparent peut parfois donner un gonflement. Cette différence provient de la création des vides dans les pores capillaires initialement remplis d'eau.

Par ailleurs, il est nécessaire de préciser qu'il existe deux conditions d'hydratation du ciment en système scellé ou en système immergé dans l'eau. Dans le second système, la formation des vides qui pouvait être engendrée par la contraction Le Chatelier est empêchée par un apport constant d'eau de l'extérieur vers les pores capillaires, ce qui compense la diminution de volume due à l'hydratation, voire même, permet l'augmentation du volume de la pâte de ciment. Toutefois, ce mécanisme est limité dans le temps, car avec l'hydratation, la perméabilité de la pâte diminue et l'arrivée de l'eau de l'extérieur vers l'intérieur se fait plus difficilement.

### **1.5.7.2 Retrait endogène d'origine physique**

Pour prendre en compte les variations dimensionnelles d'une éprouvette de béton jusqu'à la fin de la période dormante où les phénomènes mécaniques sont négligeables

alors que l'induction chimique est prédominante, on ne peut recourir à une seule explication de nature chimique fondée sur le principe de la contraction Le Chatelier.

En effet, les résultats des analyses quantitatives par diffraction des rayons X et les observations au microscope électronique à balayage ainsi que les analyses par thermogravimétrie montrent que l'hydratation n'est pas très marquée, pendant cette période après le gâchage. Aussi, il convient de donner une interprétation physique à ce phénomène en considérant la nature colloïdale du matériau au cours de ce stade précoce.

### **1.5.7.3 La contraction « Le Chatelier »**

La contraction « Le Chatelier » désigne la diminution de volume du matériau due à la formation des hydrates. Le volume des hydrates formés est plus faible que la somme des volumes des réactifs. Toutes les réactions mises en œuvre lors de l'hydratation sont sujettes à cette variation de volume. La diminution de volume due à cette contraction devrait donc être de l'ordre de 10% du volume de pâte,.

Ces différences s'expliquent par le fait que cette diminution de volume se fait librement tant que le squelette n'est pas rigide. Au delà, la poursuite de l'hydratation entraîne une auto dessiccation qui génère un raccourcissement qualifié de retrait d'auto dessiccation.

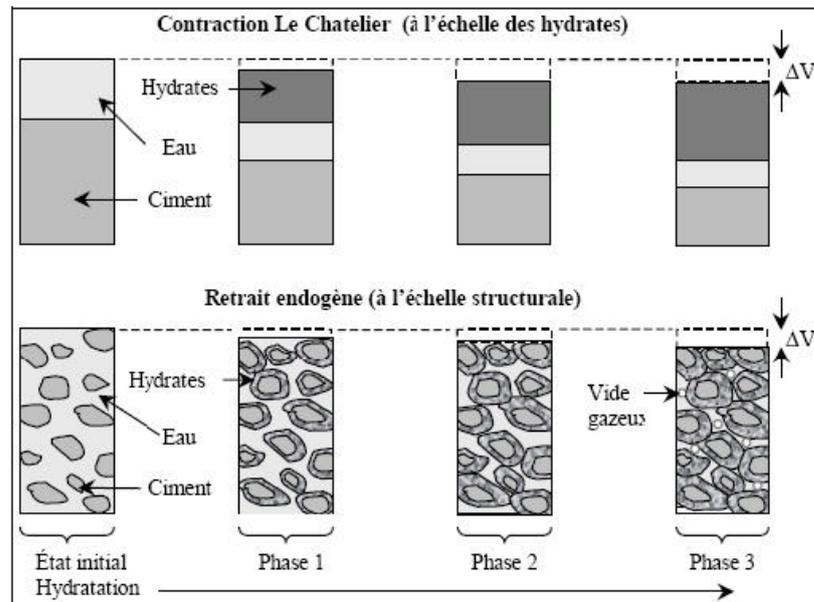


Figure. 1.5 : Retrait endogène de dessiccation ou d'autodessiccation

Au fur et à mesure que l'hydratation se poursuit, l'eau se raréfie dans les pores. Le volume qu'occupait l'eau est remplacé par un gaz dont la pression diminue.

L'eau consommée par les réactions d'hydratation se retire des capillaires créant des ménisques. Les différences de pression entre le gaz et le liquide sont équilibrées par les mécanismes physiques de tension de surface dont la résultante crée une traction sur le squelette solide, provoquant son raccourcissement.

La figure 1.5 désigne ce raccourcissement par retrait endogène de dessiccation ou retrait d'auto dessiccation. D'autres mécanismes (variation de la tension superficielle des particules colloïdales, variation de la pression disjonctive) complètent la description du retrait d'auto dessiccation.

Comme le montrent les résultats de Sellevold [26] et al, de la figure 1.6, l'amplitude du retrait des matrices cimentaires enregistrée au cours de l'autodessiccation est beaucoup plus faible (de 1 à 2 ordres de grandeur) que celle mesurée, à maturité égale, lors d'un essai de mesure de contraction Le Chatelier.

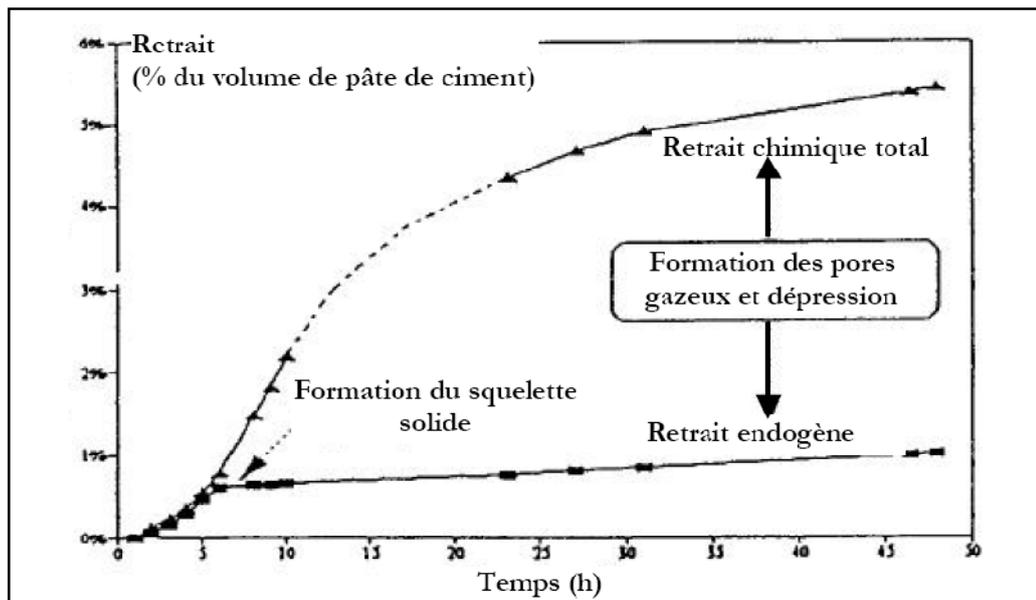


Figure. 1.6 : Evolution de la contraction Le Chatelier et du retrait Endogènes volumique pour une pâte de ciment de  $E/C = 0.40$ . Extrait de (SELLVOLD 94) [26].

Les mécanismes de déformation de la matrice sont donc différents et on parle de retrait d'autodessiccation ou retrait endogène. Trois principaux mécanismes sont généralement avancés pour lier physiquement l'autodessiccation au retrait enregistré lors du durcissement de la matrice en conditions endogènes (HUA [27], [28]; LURA [29]) :

- Le mécanisme de dépression capillaire, traduisant l'autodessiccation au sein de la Porosité capillaire.
- Le mécanisme de variation de tension superficielle, correspondant au départ de l'eau adsorbée sur le squelette solide.
- Le mécanisme de la variation de pression disjonctive, lié à l'autodessiccation au sein des nanopores des gels d'hydrates.

## **1.6 Paramètres influençant le retrait endogène**

Le retrait endogène est une conséquence de l'autodessiccation. L'autodessiccation étant une conséquence de l'hydratation, est un phénomène que l'on retrouve dans les pâtes de ciment hydraté. Le retrait endogène est influencé par le rapport E/C ou E/L, la nature du ciment, la présence d'ajouts minéraux, les granulats et les différents types d'adjuvants utilisés.

### **1.6.1 Le rapport E /C**

Le rapport E/C joue un rôle important et prédominant dans la diminution de l'humidité relative interne (COPLAND, [30]), (BARCELO, [24]), (BUIL, [32]), (GAUSE, [33]), (SELLEVOLD, 34). Dans les matériaux, plus le rapport E/C est faible et plus la diminution de l'humidité relative est importante par l'auto dessiccation.

De nombreuses publications évoquent l'influence du rapport E/C sur le retrait. Mais les résultats dépendent du montage expérimental utilisé. POWERS [18] a étudié l'influence du rapport E/C en le faisant varier entre 0.4 à 0.9. Il observe que les valeurs de retrait (contraction) mesurées augmentent avec E/C. GEIKER [35] observe un effet similaire. BUIL [36] observe que, quel que soit le rapport E/C utilisé (0.27 à 0.5), les courbes du retrait sont approximativement les mêmes dans les 50 premières heures, tous les auteurs utilisent la technique dilatométrique comme méthode de mesure.

Dans les mesures décrites dans le paragraphe précédent, l'eau utilisée pour la mesure des niveaux était au contact avec le matériau (pâte de ciment) étudié. D'autres chercheurs ont étudié l'influence du rapport E/C sans qu'il y ait contact avec une source d'eau externe.

La figure 1 .7 montre que le retrait endogène est négligeable pour des rapports E/C élevés et très important pour des rapports E/C inférieurs à 0.4 (HUA et Coll. [28]), c'est la raison pour laquelle le retrait endogène est important pour des bétons à hautes performances.

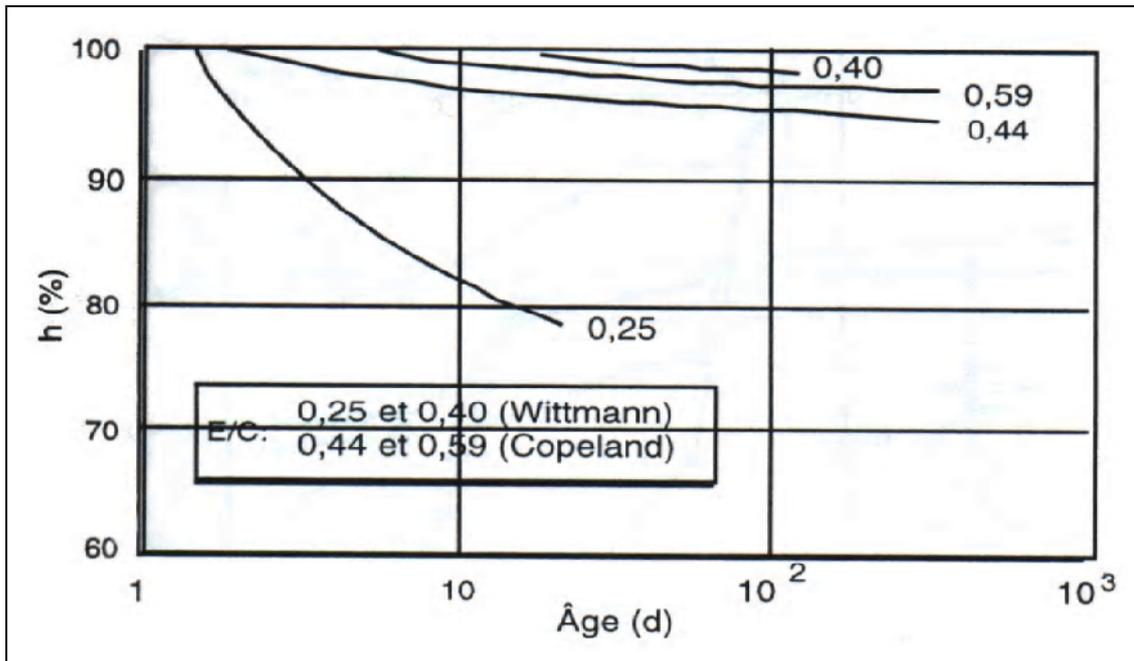


Figure.1.7 : Influence du Rapport E/C sur la valeur du retrait  $\epsilon$  (HUA et Coll. [28])

lieu, La finesse du ciment semble jouer un rôle dans le retrait; les particules ne traversant pas le tamis 200 réagissent très lentement en présence de l'eau; aussi exercent-elles un effet de contrainte semblable à celui de l'agrégat. C'est ainsi que du ciment à haute résistance initiale, qui est extrêmement fin, se contracte environ 10 pour cent de plus que le ciment normal. Les ciments à faible dégagement de chaleur et les ciments Portland aux pouzzolanes, se contractent respectivement 20 à 35 pour cent de plus. On pense que ce fait est dû aux plus grandes quantités de silicate de calcium - l'élément causant le retrait - qui y est présentes.

### **1.6.3 Les types et classification du granulat**

Comme on l'a exposé précédemment, le retrait du ciment dû au séchage ne représente qu'une partie de celui du ciment pur parce que les particules de granulat non seulement diluent la pâte, mais la renforcent contre la contraction. On a démontré que lorsqu'on utilise un granulat aisément compressible, le béton se contracte autant que le ciment pur, et que le schiste expansé entraîne un retrait un tiers plus important que celui du granule courant.

La grenaille de fonte provoque d'un autre côté un retrait un tiers plus faible que celui du béton ordinaire. Les propriétés élastiques des granulats déterminent, d'une manière générale, le degré de contrainte offert. La grosseur et la gradation du granulat n'influencent pas par eux-mêmes la grandeur du retrait, mais un granulat plus gros permet l'emploi d'un mélange contenant moins de ciment et par suite sujet à un moindre retrait. Aussi obtiendra-t-on une substantielle réduction du retrait en augmentant la grosseur maximale du granulat et de là la teneur en granule de 20 pour cent du volume total du béton.

Le retrait des granulats eux-mêmes peut jouer un rôle extrêmement important dans la détermination du retrait du béton; certains grès à grains fins, ardoises, basaltes, rocs trappéens et certains granules contenant de l'argile présentent d'importants retraits. D'une manière générale, les bétons présentant un faible retrait contiennent du quartz, du calcaire, du granit ou du feldspath.

Les effets nuisibles causés par un retrait anormal du béton engendrés par le granulat, et effectivement observés sur des constructions, sont variés. Ils comprennent le fendillement excessif, le fléchissement important de poutres et dalles armées, et un peu d'effritement. Il est essentiel, lorsqu'on se propose d'utiliser une source nouvelle de granulat, de procéder à des essais de manière à s'assurer qu'il n'en résultera pas un retrait excessif du béton.

#### **1.6.4 Les effets des adjuvants**

Ainsi qu'on peut le prédire d'après les effets exercés par le rapport eau-ciment sur le retrait, les adjuvants qui augmentent les besoins en eau du ciment augmentent le retrait et ceux qui en diminuent les besoins, diminuent le retrait. Dans la proportion souvent utilisée comme accélérateur (2 % en poids de la quantité de ciment), le chlorure de calcium peut augmenter le retrait dû au séchage dans une proportion pouvant atteindre 50 %.

L'effet d'ensemble produit par l'emploi de béton à air occlus n'est pas une augmentation du retrait. Si on les utilise dans des proportions plus fortes qu'il n'est normalement prévu, certains adjuvants peuvent augmenter considérablement le retrait; aussi doit-on apporter une grande attention aux proportions utilisées.

#### **1.6.5 Vitesse de séchage**

Il est important, lorsqu'on désire évaluer la pertinence du problème du retrait, de tenir compte de la dimension de l'élément et des conditions d'exposition. Le séchage du béton ordinaire exposé à un environnement maintenu à 50 % d'humidité relative affecte en un mois la teneur en humidité jusqu'à une profondeur de 3 pouces.

Le retrait endogène, conséquence physique de la contraction "Le Chatelier", est un phénomène bien connu de l'industrie cimentaire. Dans les bétons dont le rapport E/C est de l'ordre de 0.5, les effets de ce retrait sont inexistantes.

Le développement et l'utilisation de plus en plus fréquente des bétons à hautes et très hautes performances posent de nouveaux problèmes sur l'apparition et la mesure du retrait endogène dans ce type de matrices cimentaire.

### **I.7. Conclusion**

D'après ce qui a été présenté dans ce chapitre, nous constatons l'importance du retrait endogène ou chimique et son influence sur la durabilité des ouvrages. On entend par retrait endogène, les déformations spontanées des matériaux hydrauliques qui interviennent au cours de l'hydratation et du durcissement. Nous avons donc jugé utile pour prédire l'évolution de ce retrait endogène de modéliser ce dernier malgré la complexité et la non linéarité de ce phénomène.

**CHAPITRE 2**  
**APPROCHE ET MODELISATION**

## CHAPITRE 2

### APPROCHE ET MODELISATION

#### **2.1 Introduction**

La modélisation consiste à représenter un ou plusieurs phénomènes physiques à l'aide des expressions mathématique. Dans ce qui suit nous présentons quelques modèles de prédiction disponibles dans la littérature qui traitent l'évolution du retrait endogène au très jeune âge, a s'avoir : le modèle  $\mu$ ic, la méthode d'éléments finis, le modèle semi empirique,...

#### **2.2 Quelques tentatives de modélisation du retrait endogène**

Il existe plusieurs modèles mathématiques dans la littérature qui prennent en considération quelques paramètres de formulation, de composition, de conservation etc...

Le retrait endogène des pâtes de ciment a reçu beaucoup d'attention de la part des chercheurs et des spécialistes. Malgré les grands progrès réalisés ces dernières années pour la compréhension détaillée du phénomène de retrait endogène, les modèles représentatifs de ce phénomène restent encore rares Plusieurs études ont été réalisées sur l'application du principe de maturité à l'évolution du retrait endogène des pâtes de ciment (Viviani et al., 2007[37] ; Mounanga et al., 2006[38] ; Turcry *et al.*, 2002[40]).

Jensen et Hansen, ont étudié le principe de maturité sur le retrait endogène avec une Pâte de ciment E/C = 0,3 contenant 20% de fumée de silice sur une période de 28 jours. Ils montrent qu'une seule énergie d'activation n'est pas suffisante pour décrire correctement l'influence de la température sur le retrait endogène. La cause serait la difficulté à séparer la part de la déformation du ciment et celle de la fumée de silice. Laplante et al, (1998) [39] ont également montré qu'une seule énergie d'activation n'était pas suffisante pour décrire l'évolution du dégagement de chaleur. En effet, ils utilisent un « triplet d'énergies d'activation

apparentes » correspondant à trois périodes temporelles : période dormante, le jeune âge et l'âge moyen.

Par contre, Turcry et al, ont montré que le principe de maturité s'appliquait sur le retrait volumique d'une pâte de ciment  $E/C = 0,25$ , soumise à quatre températures de cure isotherme différentes : 10, 20, 30 et 40°C. La durée des mesures est de 48 heures. La figure 2.1 montre l'évolution de ces déformations en fonction de l'âge équivalent. L'énergie d'activation prise pour le calcul de l'âge équivalent est celle obtenue avec les essais de fin de prise Vicat (39 kJ/mol). On constate une bonne superposition des différentes courbes qui confirme que le principe de maturité peut être appliqué au retrait volumique.

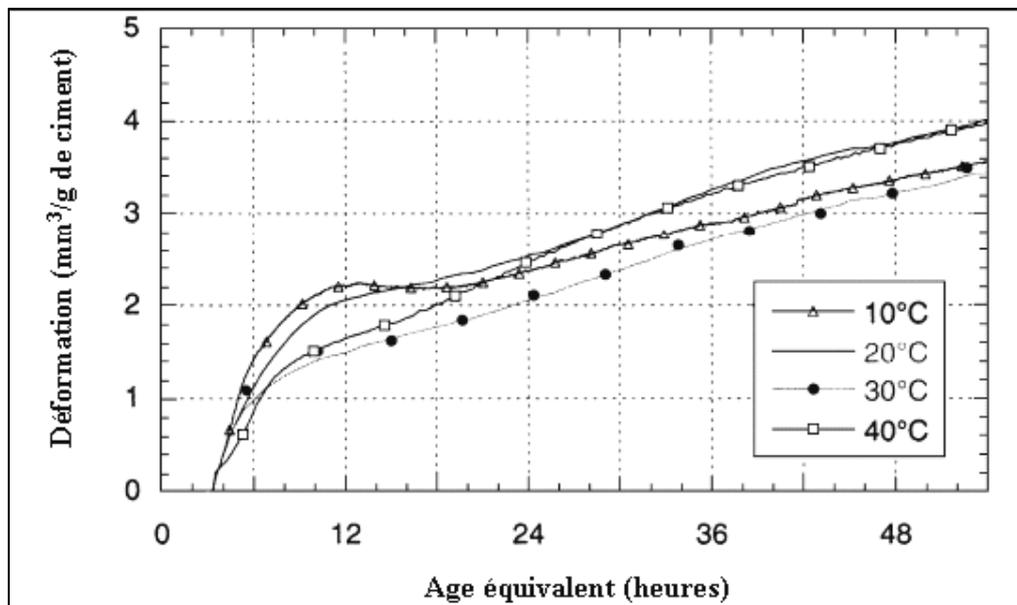


Figure 2.1 Application du principe de maturité sur le retrait volumique Endogène (Turcry et al.)

Mounanga et al (Mounanga *et al.*, 2006) [38], ont étudié l'influence de la température (10, 20, 30, 40 et 50°C) sur l'évolution du retrait endogène volumique de pâte de ciment. Pour cela, ils ont utilisé le principe de maturité avec une valeur d'énergie d'activation calculée à partir des résultats de retrait. Cette valeur est obtenue en traçant le logarithme de la variation de retrait volumique (DV) sur un temps DT en fonction de l'inverse de la température.

Ce principe de détermination est classique et utilisée pour les résultats de prise avec le logarithme de l'inverse de l'âge de prise en fonction de l'inverse de la température (Pinto et Hover, 1999[40] ; Turcry et al., 2002 [41]; Lachemi et al., 2007[42]). Avec cette valeur d'énergie d'activation (40,5 kJ/mol), Mounanga et al, ont tracé les déformations volumique en fonction du temps équivalent. Ils obtiennent une superposition des courbes correctes à part celle à 40°C pour lequel ils enregistraient une déformation plus élevée qu'avec la température de 50°C. Les auteurs attribuent cette différence au changement de la microstructure en cours d'hydratation.

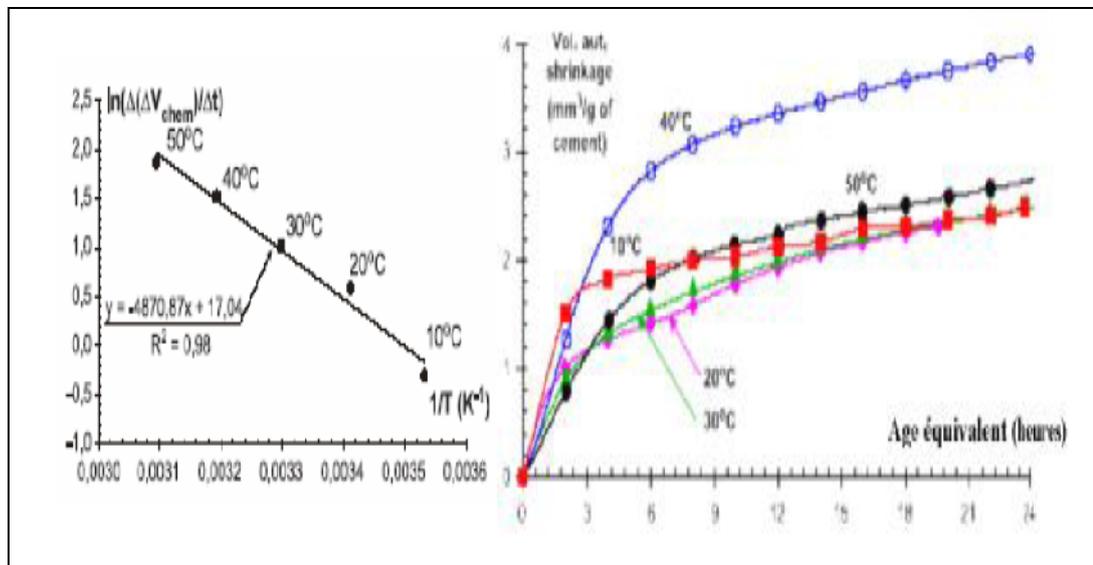


Figure 2.2 Application du principe de maturité sur le retrait volumique endogène (Mounanga et al., 2006) [38]

### 2.2.1 Principe de maturité sur le retrait volumique endogène

Le principe de maturité consiste à exprimer l'avancement de l'hydratation du ciment et l'évolution des propriétés du matériau, non pas en fonction de l'âge réel mais en fonction de sa maturité. Pour un béton donné, cette maturité dépend de la température de cure à laquelle il a été soumis. Le concept de maturité a été utilisé dès le début des années 50 comme un moyen de prédiction de l'évolution des propriétés du béton et en particulier de sa résistance.

Considérant un historique de température constant, la maturité  $M(t, T)$  à la température absolue  $T$  et à l'instant  $t$ , peut s'écrire comme :

$$M(t, T) = K(T).t = K(T_{ref}).t_{eq}(T_{ref}) \quad \text{eq(2.1)}$$

Où  $K(T)$  est un terme (en 1/s) proportionnel à la vitesse d'évolution du matériau à un degré d'hydratation donné, à la température absolue  $T$  à l'instant  $t$  et  $t_{eq}$  l'âge équivalent du matériau, c'est-à-dire le temps nécessaire pour que le matériau conservé à une température dite de référence,  $T_{ref}$ , acquiert une maturité équivalente à celle obtenue à l'âge  $t$  et à la température  $T$ . Dans le cas des matrices cimentaires, le terme  $K(T)$  est généralement exprimé à partir de la loi d'Arrhenius.

$$K(T) = A \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad \text{eq(2.2)}$$

Où  $A$  est une constante de proportionnalité (1/s),  $R$  la constante des gaz parfaits (8.314 J/mol.K) et  $E_a$  l'énergie d'activation apparente (J/mol). En combinant les équations (2.1) et (2.2), on a alors la relation suivante entre l'âge réel  $t$  du matériau et son âge équivalent  $t_{eq}$  :

$$t = \exp\left(\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right) \cdot t_{eq}(T_{ref}) \quad \text{eq(2.3)}$$

### **2.2.2 Approche basée sur la dépression capillaire**

Hua [28]] a étudié le retrait endogène à une échelle macroscopique et microscopique. Pour calculer le retrait endogène, il a appliqué le mécanisme de la dépression capillaire qui peut être déterminée expérimentalement par la porosimétrie par intrusion au mercure (PIM):

$$\Delta p = \frac{\gamma_e \cos \theta_e}{\gamma_{Hg} \cos \theta_{Hg}} P_{Hg} \quad \text{eq (2.4)}$$

$\Delta P$  [Pa] est la dépression capillaire,  $\gamma_e$  [J.m-2] tension superficielle de l'eau-vapeur d'eau,  $\gamma_{Hg}$  [J.m-2] tension superficielle du mercure-vide,  $\theta_e$  [rad] angle de mouillage de l'eau sur la paroi solide (hydrates) et  $\theta_{Hg}$  [rad] angle de mouillage du mercure sur la paroi solide(hydrates).

a) A l'échelle macroscopique :

C'est à dire à l'échelle du volume élémentaire représentatif, Hua suppose que la phase liquide soit continue. A l'état d'équilibre, la dépression capillaire est donc uniforme. La pâte de ciment est considérée comme un milieu macroscopiquement homogène et isotrope. La dépression capillaire produit donc une contrainte macroscopique hydrostatique égale au produit de la dépression capillaire et la porosité totale (eq. 2.4).

Dans ce modèle, les propriétés viscoélastiques vieillissantes de la pâte de ciment sont déterminées expérimentalement à travers des essais de fluage.

$$\sigma = \sum P\phi$$

Où  $\sigma$  [Pa] est la contrainte macroscopique,  $p$  [Pa] la dépression capillaire et  $\phi$  la porosité totale du matériau.

Une bonne concordance a été trouvée entre le modèle et les mesures pour la pâte de ciment ayant comme rapport  $E/C= 0.42$  mais pas pour la pâte ayant un rapport  $E/C=0.27$ . Les résultats montrent que le retrait endogène est plus important à long terme pour la pâte à  $E/C=0.42$  que pour celle ayant le rapport  $E/C= 0.27$  (Figure 2.3). En effet selon Hua, plus le rapport  $E/C$  est grand est plus le degré d'hydratation est important. Ainsi l'humidité relative décroît ce qui engendre un retrait endogène plus grand à long terme.

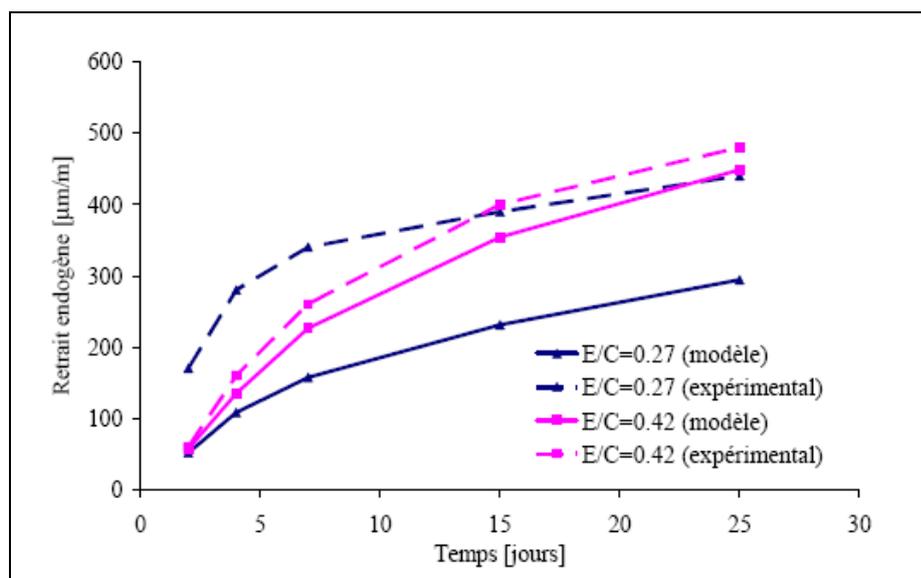


Figure 2.3 : Comparaison entre le modèle et les mesures expérimentaux (Hua) [28]

**b) A l'échelle microscopique :**

La pâte de ciment est considérée comme un matériau hétérogène vieillissant avec des constituants non vieillissants. L'histoire de chaque phase est prise en considération. La microstructure est considérée comme périodique et tous les grains de ciment anhydre sont sphériques et identiques. Une bonne corrélation est encore trouvée à cette échelle entre les résultats numériques et expérimentaux pour un rapport de E/C=0.42.

Les deux approches donnent une concordance relativement bonne avec l'expérience et montrent l'importance de l'effet visqueux de la pâte de ciment dans le développement du retrait endogène, mais ces deux approches restent tributaires des données expérimentales telles que le degré d'hydratation, la distribution des tailles des pores et les propriétés mécaniques.

En se basant sur la micromécanique multi-échelle, combinée à un modèle d'hydratation analytique de type Powers (Bernard (2003) [44], Pichler (2007) [45]) a utilisé la dépression capillaire pour prédire le comportement macroscopique d'un matériau cimentaire.

Se basant toujours sur la dépression capillaire comme force motrice du retrait endogène, plusieurs auteurs ont tenté de modéliser le comportement de matériaux poreux en utilisant une approche poro-élastique, ou la déformation est décrite par la loi suivante :

$$\varepsilon_L = \frac{S\sigma_c}{3} \left( \frac{1}{K_p} - \frac{1}{K_s} \right) \quad \text{eq (2.5)}$$

Avec  $\sigma_{CAP}$  la dépression capillaire, S le degré de saturation,  $K_p$  le module drainé et  $K_s$  le module de compressibilité de la phase solide.

Il faut se rappeler que cette relation n'est exacte que dans le cas saturée. Bentz et al. (1998) [46] ont appliqué cette équation au Vycor et ont montré qu'elle sous-estime la déformation due au retrait.

Lura (2003) l'a appliquée aux pâtes de ciment et a montré qu'elle sous-estime la déformation aux premiers instants, même si l'on arrive à reproduire une partie de la courbe de déformation.

Coussy (2004) [47] l'a appliquée aux pâtes de ciment mais sans comparaison avec des résultats expérimentaux. Plus récemment, Vlahinic (2008) [48] propose une autre version de la loi de comportement poro-élastique pour le cas partiellement saturée :

$$\varepsilon_L = \frac{\sigma_c}{3} \left( \frac{1}{K_p} - \frac{1}{\bar{K}(S)} \right) \quad \text{eq (2.6)}$$

Où  $\bar{K}(S)$  représente le module de compressibilité effectif du milieu poreux formé par la phase solide et la phase gazeuse nouvellement créée par l'autodessiccation. La comparaison avec des résultats expérimentaux obtenus sur le retrait hydrique montre une sensible amélioration par rapport à l'eq.(2.6)

### **2.2.3 Approche basée sur la tension superficielle**

Koenders (1997) [49] considère que la tension superficielle est la cause principale de déformation endogène. En utilisant une analyse thermodynamique, la variation de la tension superficielle du squelette solide est déterminée à partir du modèle microstructural de HYMOSTRUC. Trois phases sont considérées : l'eau libre, l'eau adsorbée et la phase gazeuse et. En appliquant le premier principe de la thermodynamique et la conservation du travail dans un pore capillaire isolé, la relation suivante entre la tension superficielle du squelette solide et la pression de la phase gazeuse est obtenue:

$$\sigma = RT \int \Gamma \ln\left(\frac{P_g}{P_0}\right) \quad \text{eq (2.7)}$$

où  $\sigma$  [N.m-1] la tension superficielle, R [J mol-1 K-1] constante de gaz parfait,  $P_g/P_0$  [%] l'humidité relative, T [K] la température et  $\Gamma$  [mol m-2] est le nombre de moles d'eau adsorbées à la paroi solide par unité de surface.

### **2.3 Conclusion**

A la suite de la dépendance de ces modèles numériques cités dans ce chapitre vis-à-vis des résultats expérimentaux, on a essayé au sein de cette thèse de développer un modèle pour le calcul du retrait endogène qui sera moins compliqué et mieux adapté .

## **CHAPITRE 3**

### **MODELISATION ET VALIDATION**

## CHAPITRE 3

### MODELISATION ET VALIDATION

#### 3.1 Introduction

De nombreux résultats expérimentaux montrent que le retrait endogène se caractérise par des courbes d'évolution d'allure en forme de S (voir figure 3.1)

En mathématiques, ce type de courbes est représenté par l'équation différentielle suivante :  $y' = ry \cdot (1 - y/k)$

Dont les fonctions  $f$  solutions de cette équation est définies positives sur  $[0 ; +\infty[$  vérifiant les deux conditions suivantes :

- $y(0) = y_0$
- $y' = ry \cdot (1 - y/k)$  (3.1)

Avec  $r > 0$  et  $K > 0$

Où « K » et « r » sont des réels positifs. Leur courbe représentative à la forme d'un S ce qui fait qu'elles sont parfois appelées sigmoïdes, comme le montre la figure si dessous.

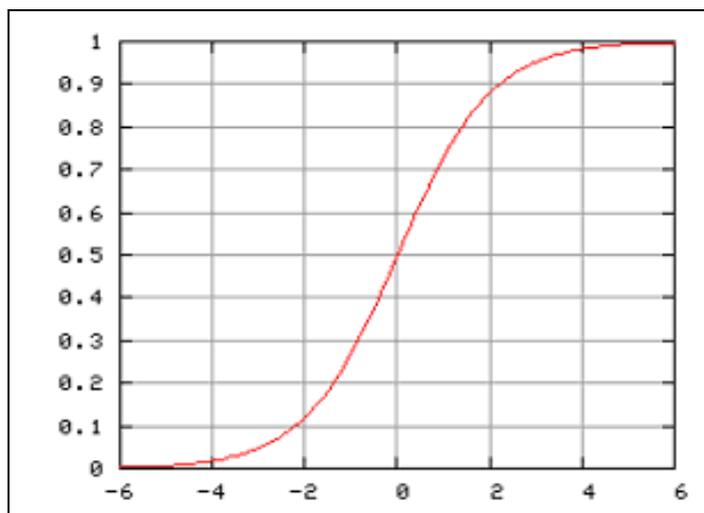


Figure 3 .1 allure de l'évolution du retrait endogène.

Pour la résolution de cette équation on opère un changement de variable.

Posons  $y = 1/z$

En remplaçant dans (3.1), qui est valable pour  $y > 0$ , on aboutit à l'équation suivante:

$$-z' / z^2 = -r \cdot 1/z (1 - 1/z k)$$

En multipliant les deux cotés par  $z^2$  on obtient :

L'équation différentielle suivante:

$$Z' = -r (z - 1/K) \quad (3.2)$$

Cette équation admet une solution générale  $g(t)$  qui est la somme de la solution homogène et particulière.

-La solution homogène défini par :

$$(z - 1/K) = 0 \Rightarrow z = 1/K$$

-La solution particulière :

$$z' + rz = 0 \Rightarrow z' / z = -r ;$$

Par intégration des deux cotés on trouve

$$\int \frac{z'}{z} = \int -r dt \Leftrightarrow \ln z = -rt + \text{cste} \quad \text{d'où}$$

$$Z = e^{-rt} \cdot e^{\text{cste}} \quad (3.3)$$

Posons  $e^{\text{cste}} = \lambda$  on obtient  $Z = \lambda \cdot e^{-rt}$

Donc la solution est :

$$g(t) = \lambda \cdot e^{-rt} + 1/K \quad (3.4)$$

La fonction  $f$  doit donc vérifier :

$$f(t) = \frac{1}{g(t)} = \frac{K}{1 + \lambda K e^{-rt}} \quad (3.5)$$

La condition initiale  $y(0) = y_0$  conduit à l'unique solution :

$$f(0) = \frac{K}{1 + \lambda K} = y_0 \Rightarrow \lambda K = \left( \frac{K}{y_0} - 1 \right)$$

D'où on a

$$f(t) = \frac{K}{1 + \left(\frac{K}{y_0} - 1\right)e^{-rt}} \quad (3.6)$$

Il est aisé de vérifier que cette fonction est bien définie et positive sur  $[0 ; +\infty[$ . En effet,

$$1 + \left(\frac{K}{y_0} - 1\right)e^{-rt} = e^{-rt} \left(e^{rt} + \frac{K}{y_0} - 1\right) \quad (3.7)$$

Or pour  $r > 0$ ,  $e^{rt} \geq 1$

Donc

$$e^{rt} + \frac{K}{y_0} - 1 \geq \frac{K}{y_0} > 0 \quad (3.8)$$

Il est aussi aisé de vérifier qu'elle remplit bien les deux conditions énoncées. Selon les valeurs de  $y_0$ , la fonction est soit constante (pour  $y_0 = K$ ), soit croissante (pour  $y_0 < K$ ), soit décroissante (pour  $y_0 > K$ )

Posons  $a = \left(\frac{K}{y_0} - 1\right)$  (3.9)

\*Pour  $a > 0$

La courbe  $y = \frac{K}{1 + ae^{-rt}}$  est l'image par une transformation affine de la sigmoïde  
D'où la fonction

$$\boxed{f(t) = \frac{K}{1 + ae^{-rt}}} \quad (3.10)$$

Où,  $k, a, r$  : paramètres du modèles,  $t$  temps

### **3.2 Estimation des paramètres du modèle**

Pour l'identification des paramètres du modèle nous avons eu recours au résultats expérimentaux obtenus par Mounanga [38] lesquels sont rapportés aux annexe B

Ceci s'opère en procédant à l'estimation statistique des paramètres du modèle lesquels seront par suite évalués à partir de l'erreur et du coefficient de corrélation correspondants. Ces derniers seront justifiés par des méthodes d'optimisation donnée en annexe C.

Les différentes valeurs des paramètres :  $k, a, r, s, e$  correspondants au modèle développé sont résumés dans les tableaux 3.1.a, 3.1.b, 3.1.c, 3.1.d, pour différents températures et différents rapports E/C.

Tableaux 3.1.a valeurs des paramètres k, a, r, pour E/C=0.25

| POUR E/C =0.25            | T=20°c  | T=30°c  | T=40°c  | T=50°c  |
|---------------------------|---------|---------|---------|---------|
| k                         | 0.93963 | 1.08431 | 1.10864 | 1.05882 |
| a                         | 19.826  | 12.3795 | 9.1285  | 8.6945  |
| r                         | 0.35169 | 0.80418 | 0.36660 | 0.50074 |
| s (coeff. de corrélation) | 0.04    | 0.059   | 0.095   | 0.091   |
| e (erreur standard)       | 0.995   | 0.990   | 0.978   | 0.977   |

Tableaux 3.1.b valeurs des paramètres k, a, r, pour E/C=0.30

| POUR E/C =0.30            | T=20°c  | T=30°c  | T=40°c  | T=50°c  |
|---------------------------|---------|---------|---------|---------|
| k                         | 0.91511 | 1.1540  | 1.00411 | 0.93909 |
| a                         | 12.6658 | 12.411  | 11.845  | 17.539  |
| r                         | 0.24464 | 0.32056 | 0.45856 | 0.64163 |
| s (coeff. de corrélation) | 0.036   | 0.050   | 0.109   | 0.0921  |
| e(erreur standard)        | 0.995   | 0.994   | 0.970   | 0.9789  |

Tableaux 3.1.c valeurs des paramètres k, a, r, pour E/C=0.35

| POUR E/C =0.35          | T=20°c  | T=30°c   | T=40°c  | T=50°c  |
|-------------------------|---------|----------|---------|---------|
| k                       | 0.84754 | 1.2257   | 1.11175 | 1.07165 |
| a                       | 9.8853  | 12.9205  | 24.255  | 18.6165 |
| r                       | 0.23567 | 0.314466 | 0.46502 | 0.57634 |
| s(coeff de corrélation) | 0.047   | 0.051    | 0.0663  | 0.0917  |
| e(erreur standard)      | 0.990   | 0.9943   | 0.9914  | 0.982   |

Tableaux 3.1.d valeurs des paramètres k, a, r, pour E/C=0.40

| POUR E/C =0.40 :        | T=20°c   | T=30°c  | T=40°c   | T=50°c  |
|-------------------------|----------|---------|----------|---------|
| k                       | 0.97517  | 1.1445  | 1.13534  | 0.96670 |
| a                       | 22.770   | 18.426  | 18.897   | 20.2859 |
| r                       | 0.284205 | 0.36466 | 0.456513 | 0.59850 |
| s(coeff de corrélation) | 0.0334   | 0.0512  | 0.0795   | 0.078   |
| e(erreur standard)      | 0.9961   | 0.9944  | 0.9877   | 0.984   |

A partir de l'ensemble des observations sur les variables du modèle retenu au cours de notre étude, nous avons proposé plusieurs expressions par régression multiple donnant les paramètres du modèle développé, les expressions retenues sont données par les relations suivantes :

$$k = \beta_1(1 - t/20) + \beta_2(1/(E/C)^2).$$

$$a = \beta_3[t/(E/C)]^4 + \beta_4(1 - 20/t)^5 + \beta_5[t/(E/C)]^2.$$

$$r = \beta_6(1 - t/20)^3 + \beta_7[t/(E/C)]^t + \beta_8 \log(E/C)^t$$

### 3.3 Test des constantes

Les tests et les constantes correspondantes à ces expressions sont résumés dans les tableaux.3.2.a, 3.2.b, 3.2.c ; les constantes  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$ ,  $\beta_4$ ,  $\beta_5$ ,  $\beta_6$ ,  $\beta_7$ ,  $\beta_8$  sont spécifiques au ciment utilisé (CPA 52,5R)

Tableau 3.2.a : tests du paramètre «k» Tableau 3.3.a : tests du paramètre «k»

| Coefficient du modèle |           | Ecart type | Test de Student      |                    | Test de Fisher      |                     | Coeff. de corrélation |                  |
|-----------------------|-----------|------------|----------------------|--------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|------------------|
|                       |           |            | T <sub>Student</sub> | P (S) <sup>*</sup> | T <sub>Fisher</sub> | P (F) <sup>**</sup> | R <sup>2</sup>        | $\overline{R^2}$ |
| $\beta_1$             | 0.026450  | 0.004506   | 5.869843             | 0.0001             | 803.0577            | 0.000000            | 0.991971              | 0.990736         |
| $\beta_2$             | -0.027157 | 0.000685   | -39.64417            | 0.0000             |                     |                     |                       |                  |

Tableau 3.2.b : tests du paramètre « a »

| Coefficient du Modèle |           | Ecart type | Test de Student      |                    | Test de Fisher      |                     | Coeff. de corrélation |                  |
|-----------------------|-----------|------------|----------------------|--------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|------------------|
|                       |           |            | T <sub>student</sub> | P (S) <sup>*</sup> | T <sub>Fisher</sub> | P (F) <sup>**</sup> | R <sup>2</sup>        | $\overline{R^2}$ |
| $\beta_3$             | 7.24E-08  | 1.53E-08   | 4.717802             | 0.0092             | 33.08631            | 0.002777            | 0.961262              | 0.932209         |
| $\beta_4$             | -2136.362 | 224.8126   | -9.502857            | 0.0007             |                     |                     |                       |                  |
| $\beta_5$             | -1.1E-124 | 4.34E-125  | -2.554730            | 0.0630             |                     |                     |                       |                  |

Tableau 3.2.c : tests du paramètre « r »

| Coefficient du Modèle |           | Ecart type | Test de Student      |                    | Test de Fisher      |                     | Coeff.de corrélation |                  |
|-----------------------|-----------|------------|----------------------|--------------------|---------------------|---------------------|----------------------|------------------|
|                       |           |            | T <sub>student</sub> | P (S) <sup>*</sup> | T <sub>Fisher</sub> | P (F) <sup>**</sup> | R <sup>2</sup>       | $\overline{R^2}$ |
| $\beta_6$             | 0.250817  | 0.026868   | 9.335220             | 0.0000             | 29.60275            | 0.000008            | 0.880962             | 0.851203         |
| $\beta_7$             | 3.36E-116 | 2.01E-116  | 1.676290             | 0.1195             |                     |                     |                      |                  |
| $\beta_8$             | -3.25E-08 | 1.83E-08   | -1.774124            | 0.1014             |                     |                     |                      |                  |

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

\*P (F) : Probabilité de signification associée à la valeur T<sub>Fisher</sub>

### 3.4 Validation du modèle

Pour la validation du modèle développé nous procédons à la confrontation donnons la comparaison des valeurs du retrait prévues par ce dernier avec celles obtenues expérimentalement par [38].

Les résultats de validation du modèle sont regroupés dans les tableaux B2,B4,B6 et B8 dans annexe B pour différent rapport E/C, ainsi que leurs courbes représentatifs sur les figures 3.3 ,3.4, 3.5 ,3.6.

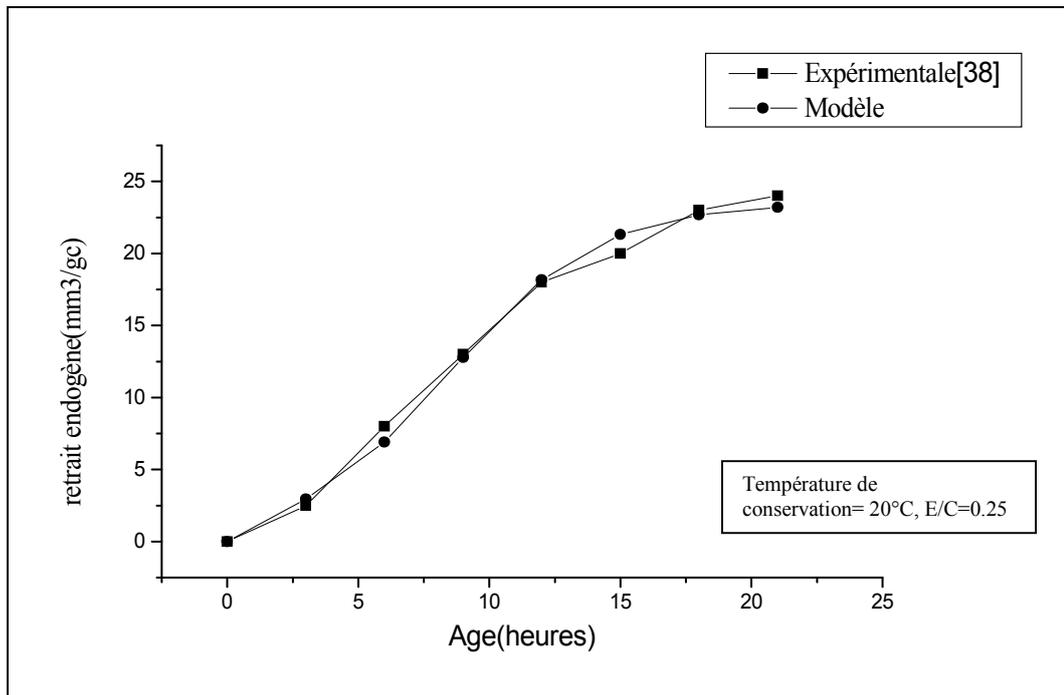


Figure : 3.3.a

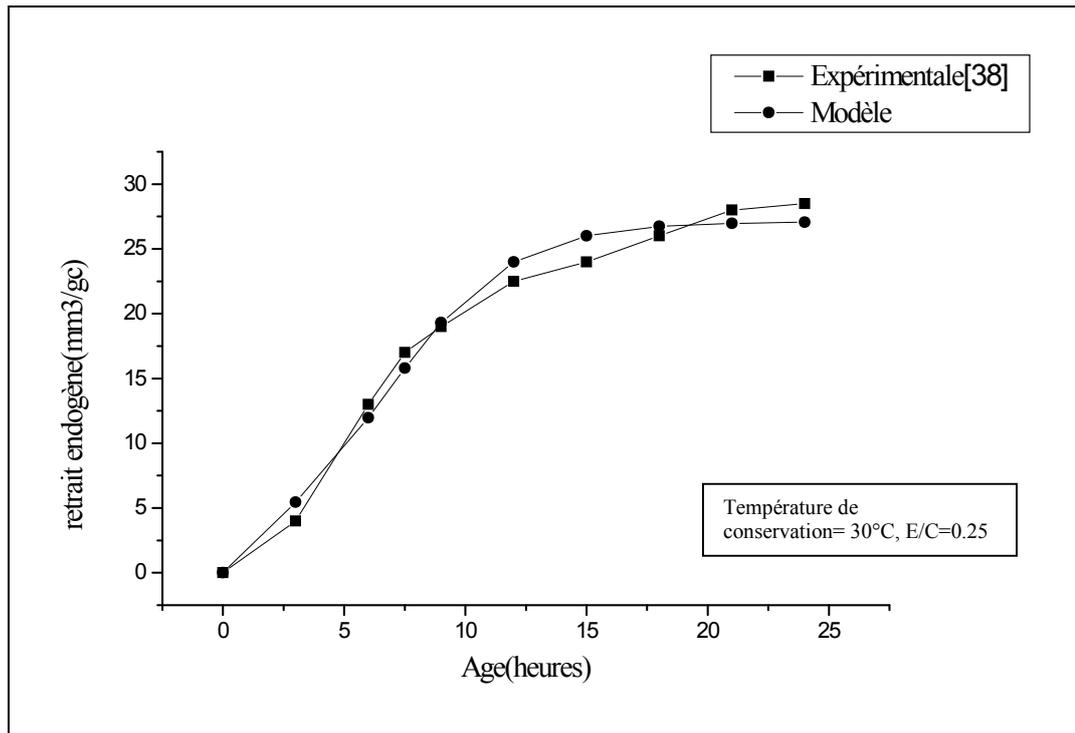


Figure : 3.3.b

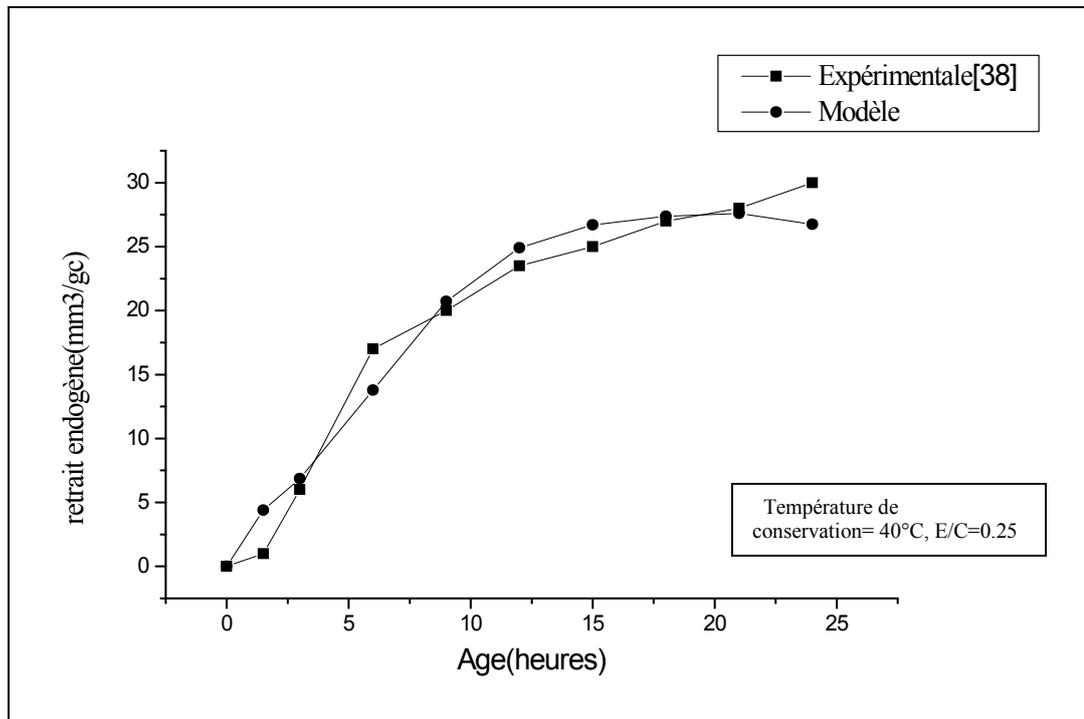


Figure : 3.3.c

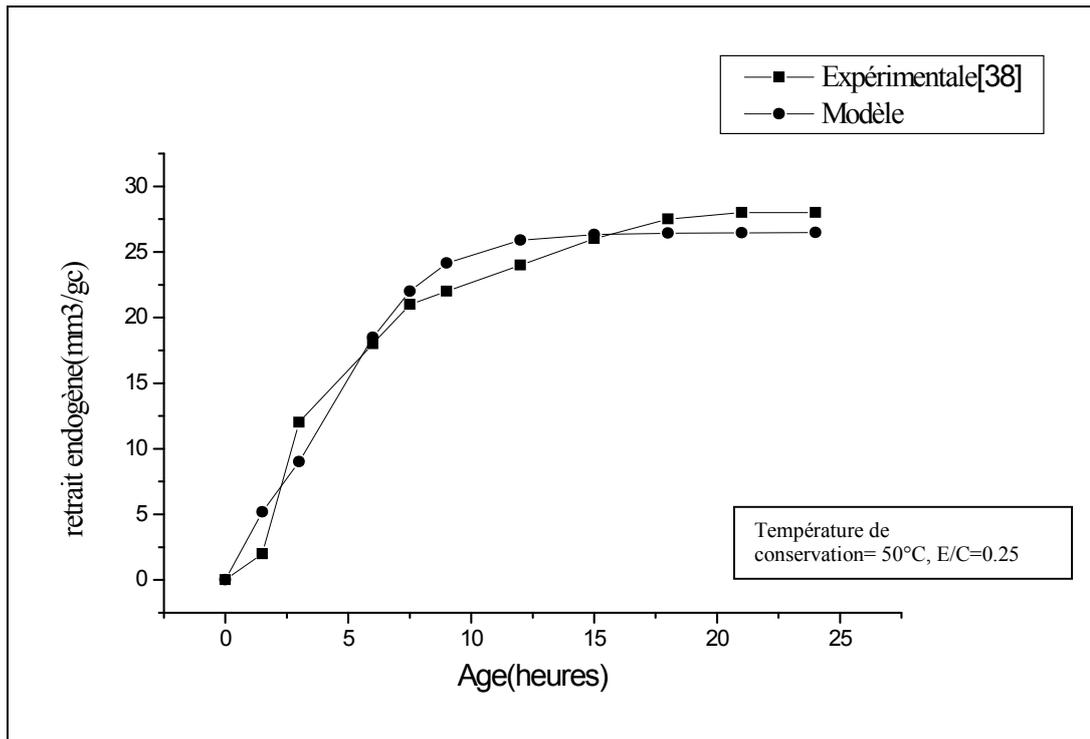


Figure : 3.3.d

Figure 3.3 : comparaison des valeurs du retrait prévu par le modèle et celles obtenue expérimentalement par [38].à E/C =0.25

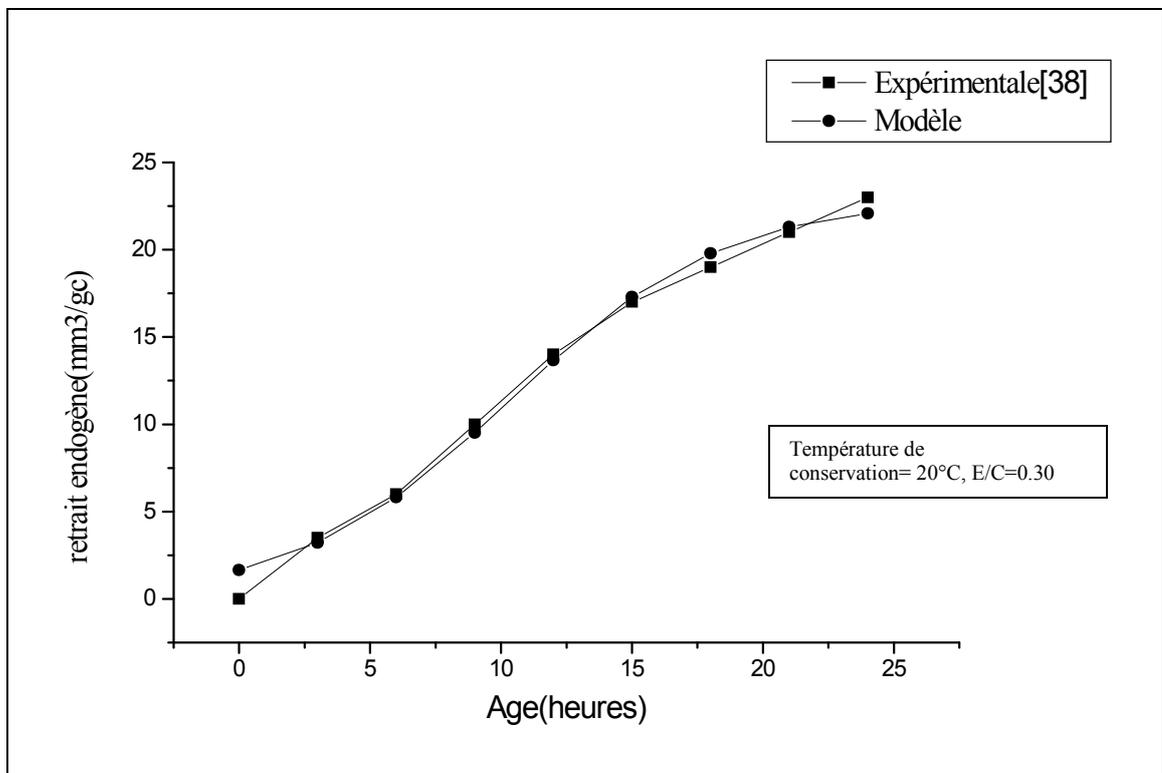


Figure : 3.4.a

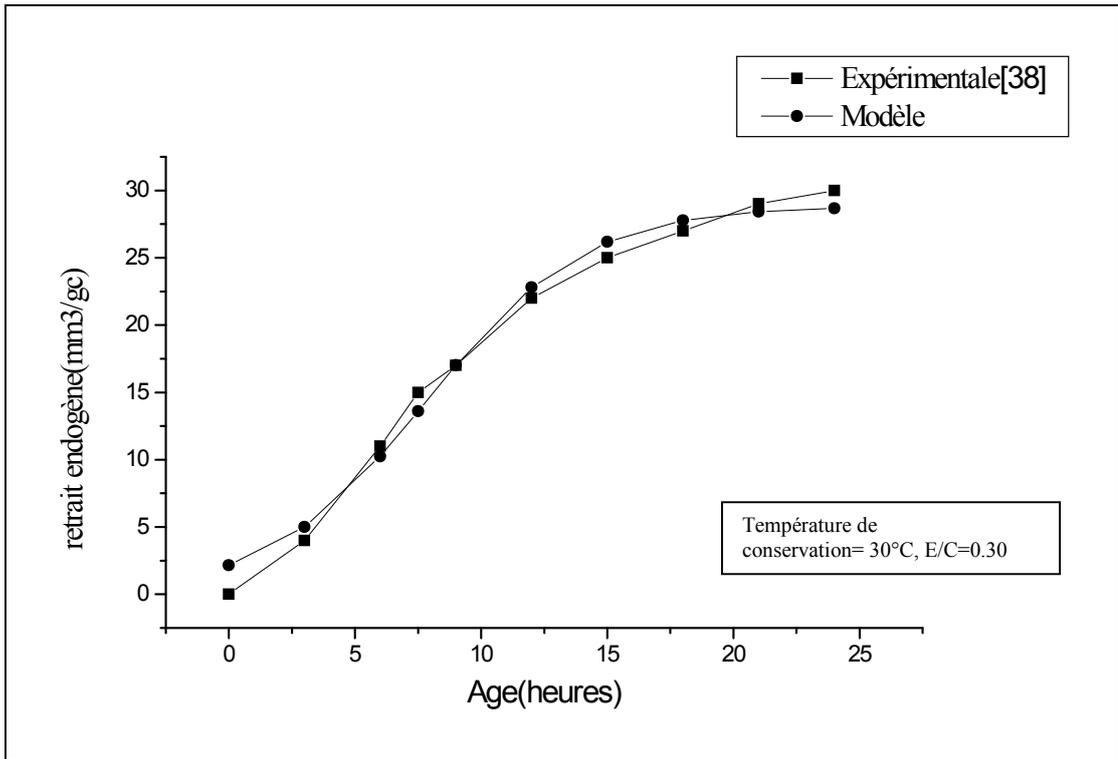


Figure : 3.4.b

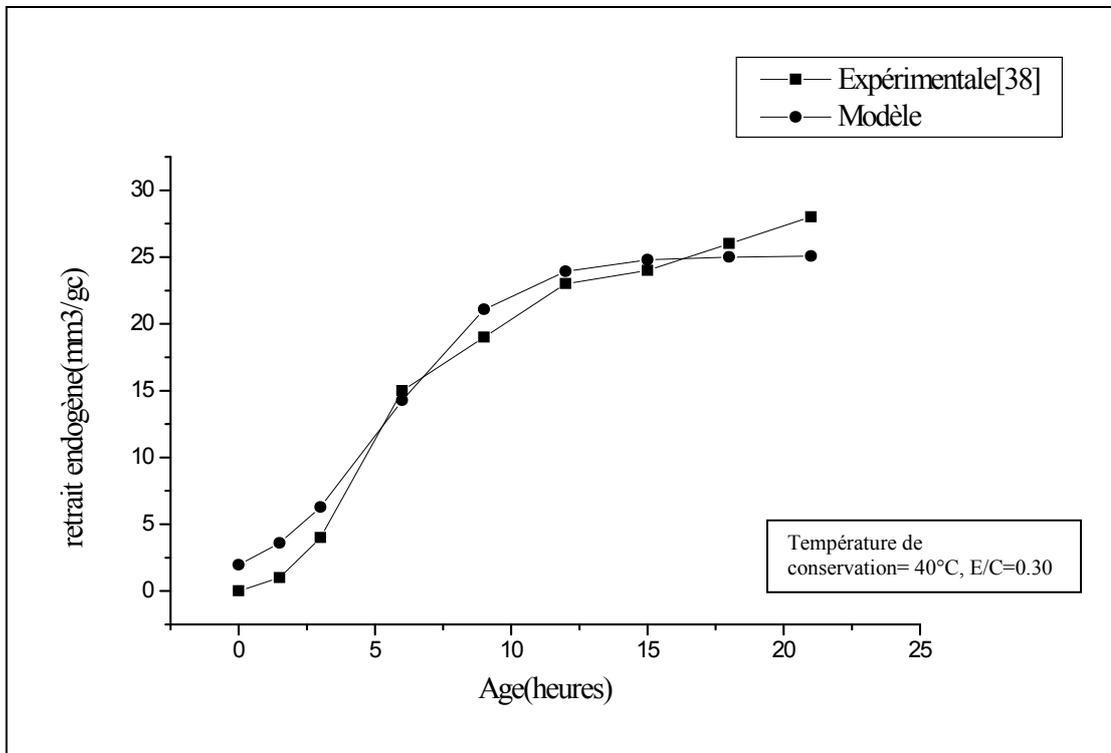


Figure : 3.4.c

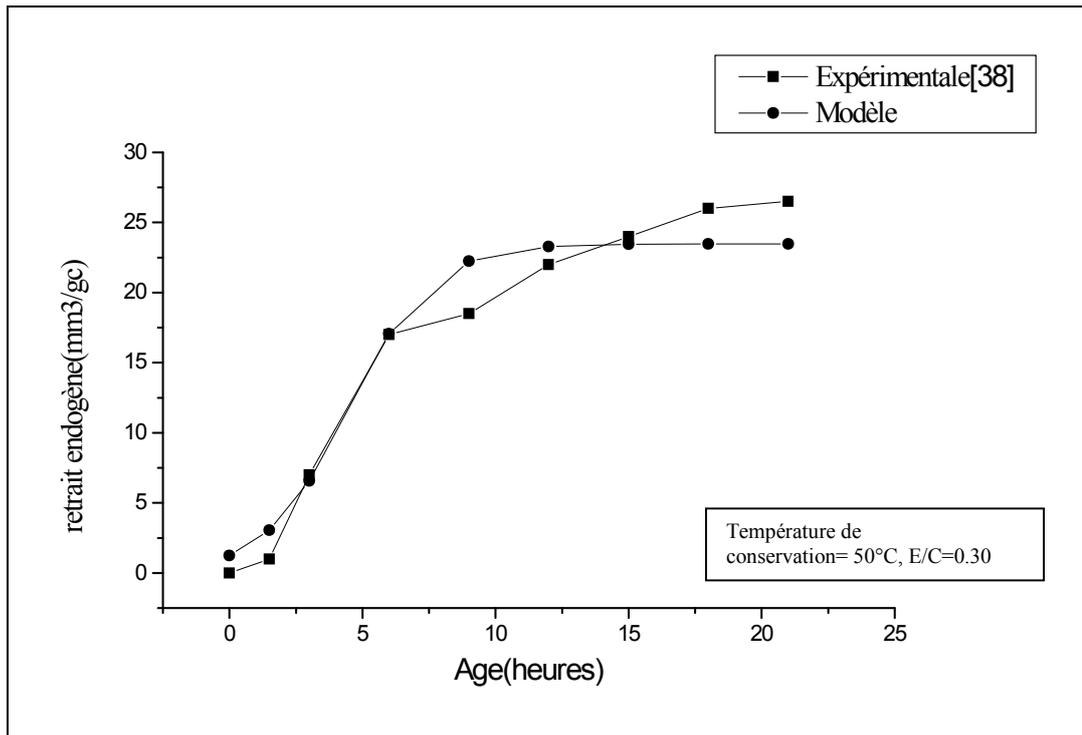


Figure : 3.4.d

Figure 3.4 : comparaison des valeurs de retrait prévues par le modèle et celles obtenue expérimentalement par [38].

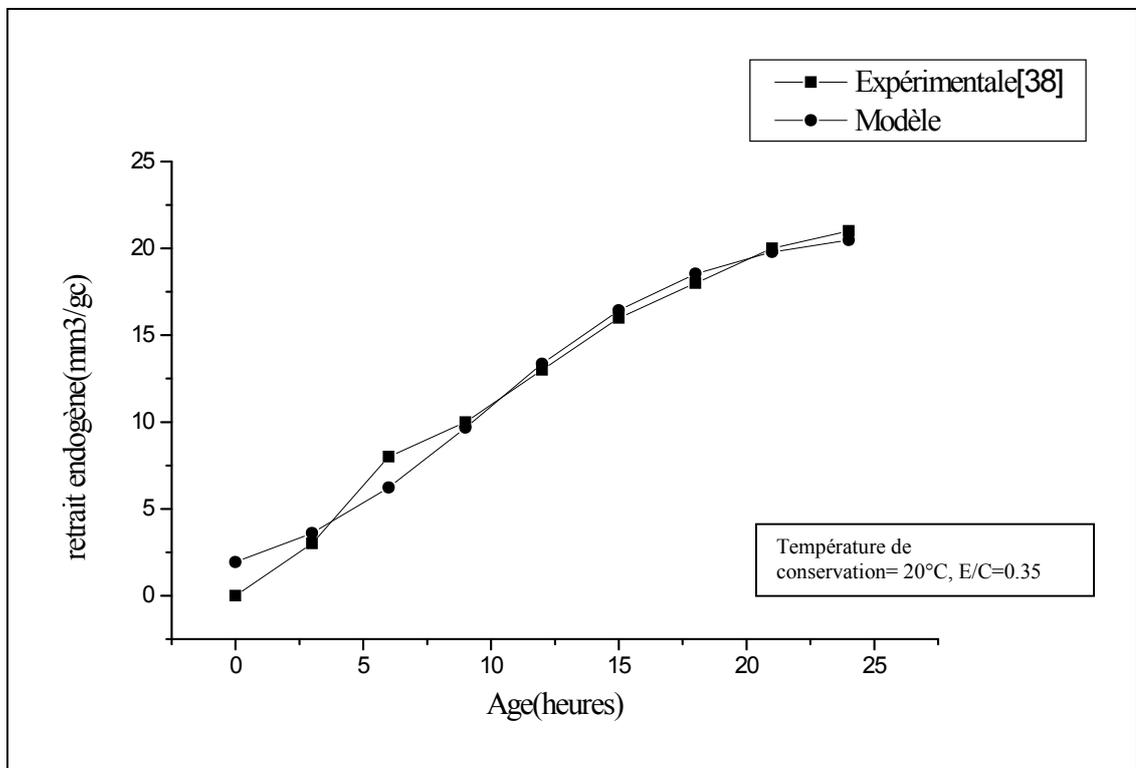


Figure : 3.5.a

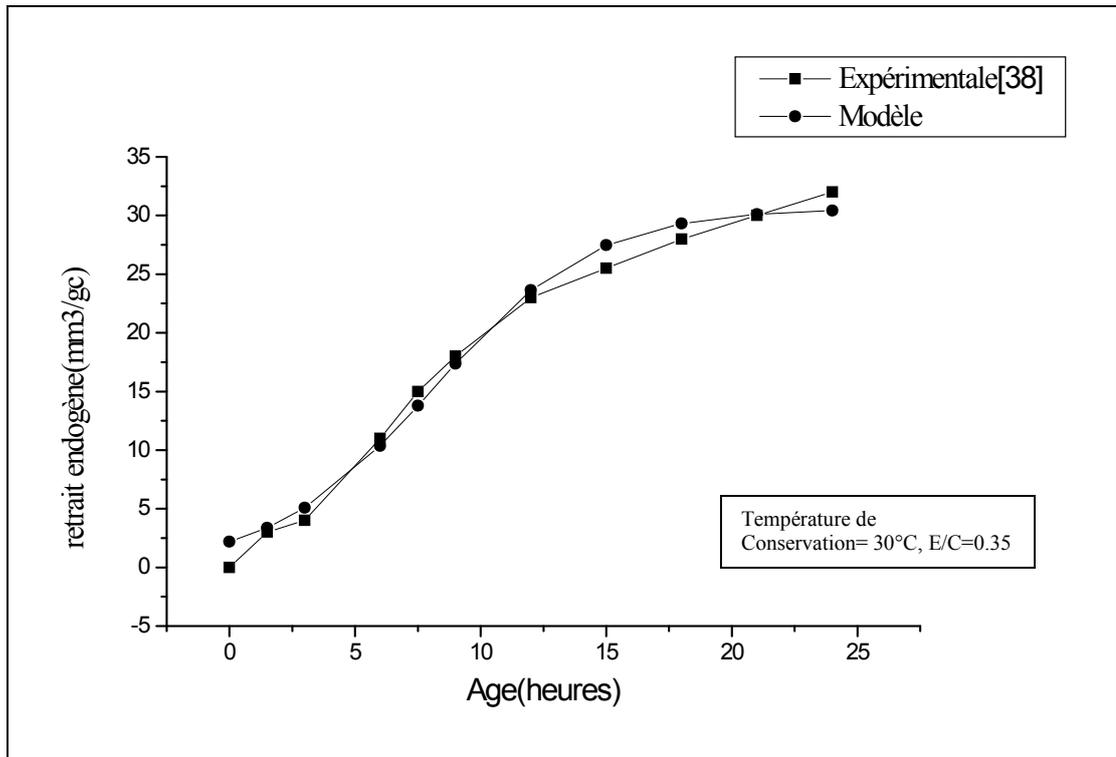


Figure : 3.5.b

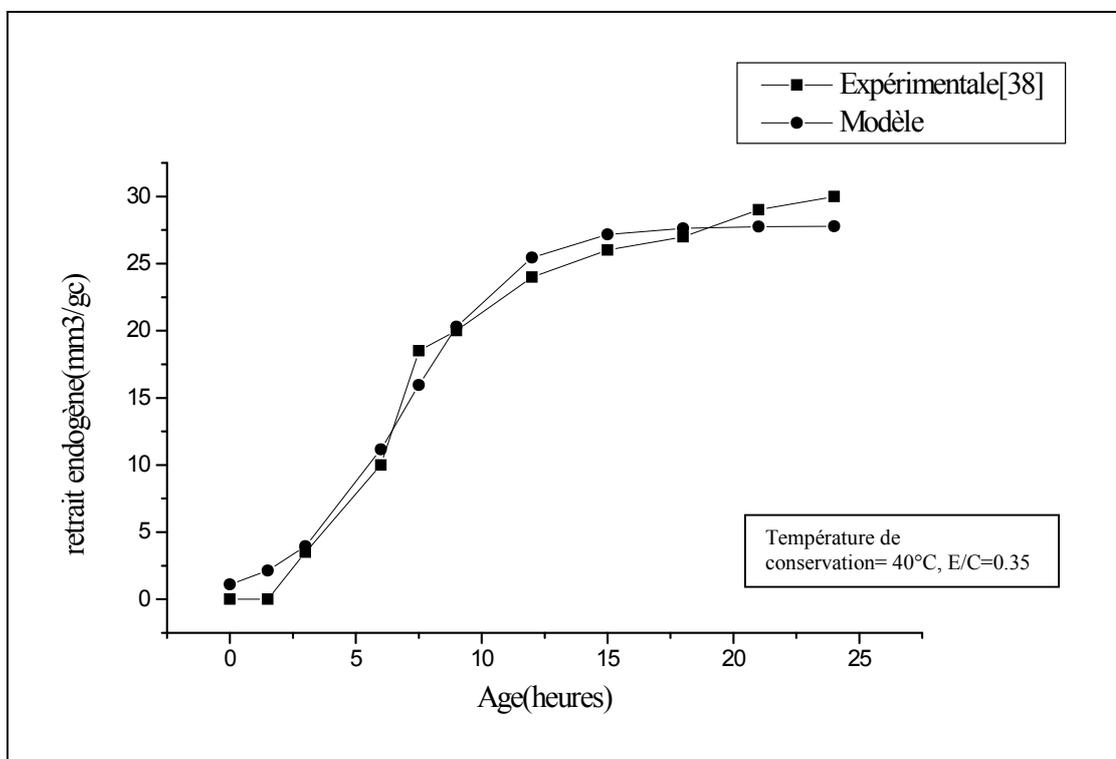


Figure : 3.5.c

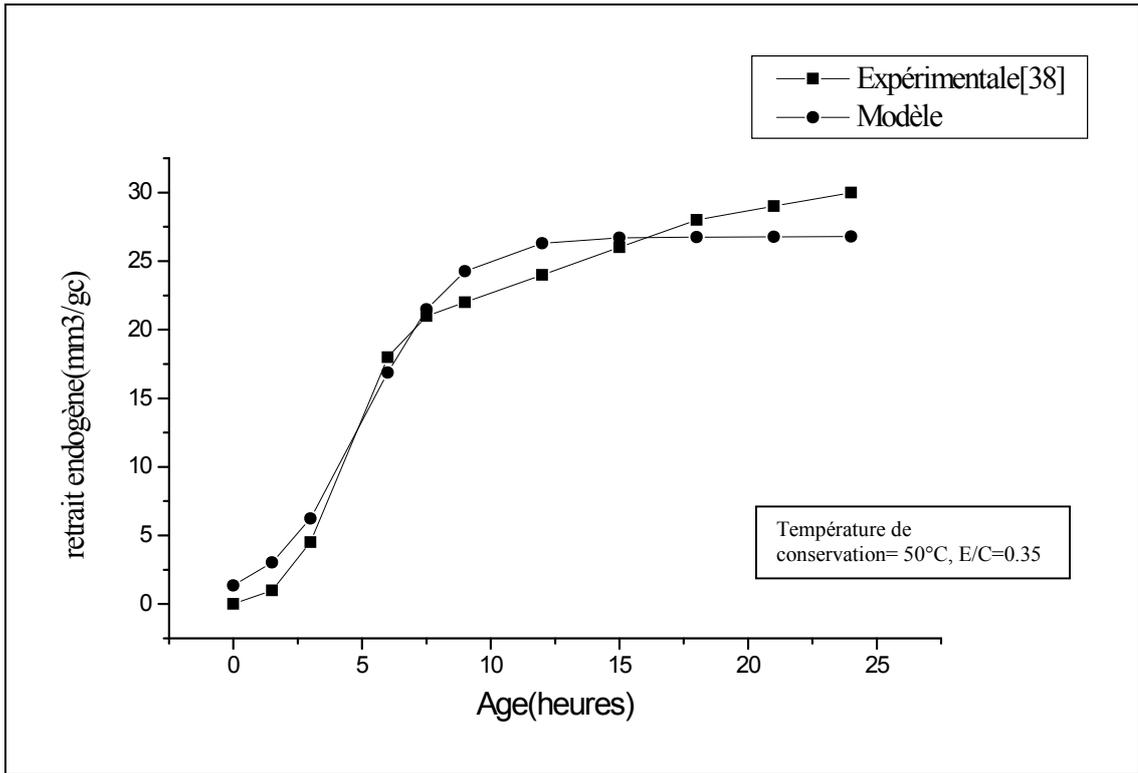


Figure : 3.5.d

Figure 3.5 : comparaison des valeurs de retrait prévues par le modèle et celles obtenues expérimentalement par [38].

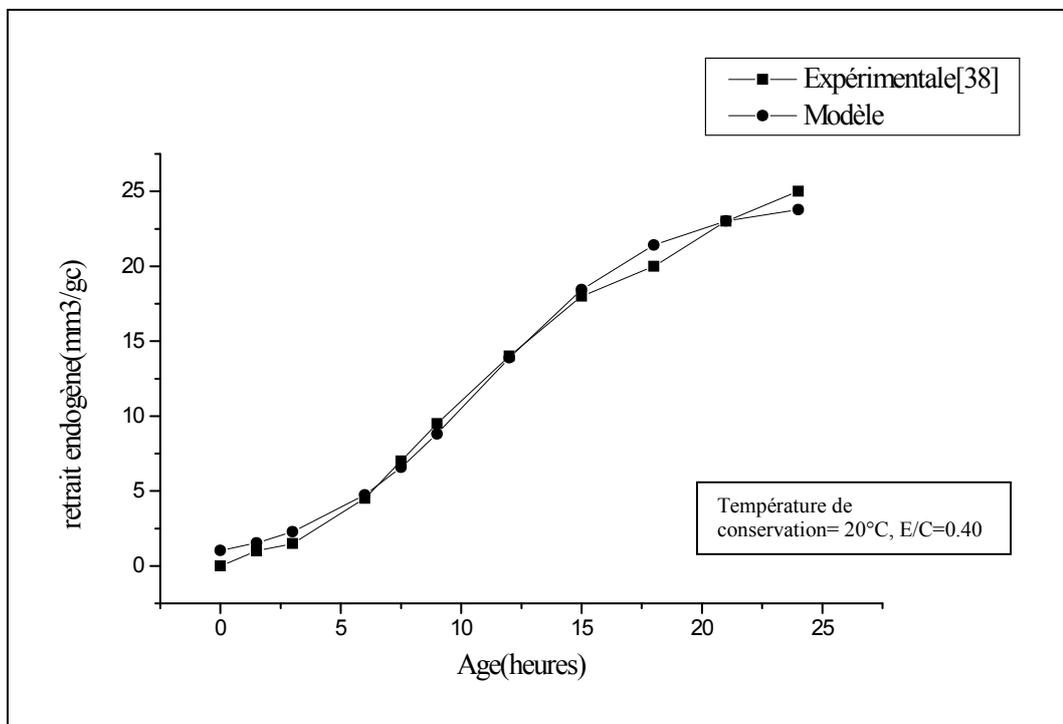


Figure : 3.6.a

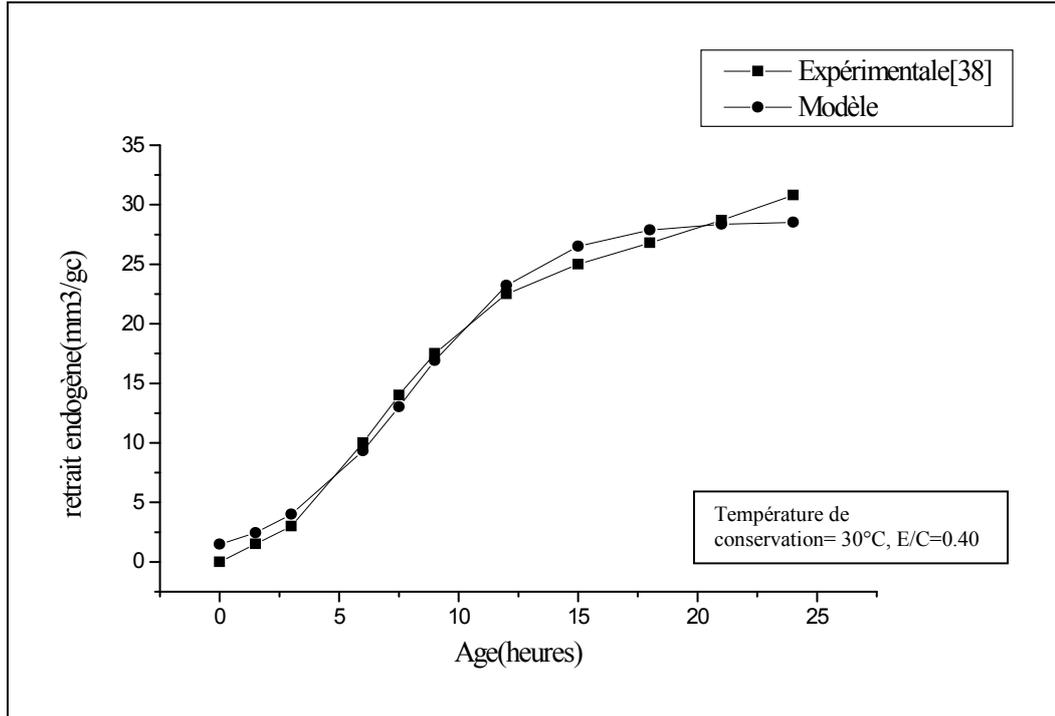


Figure : 3.6.b

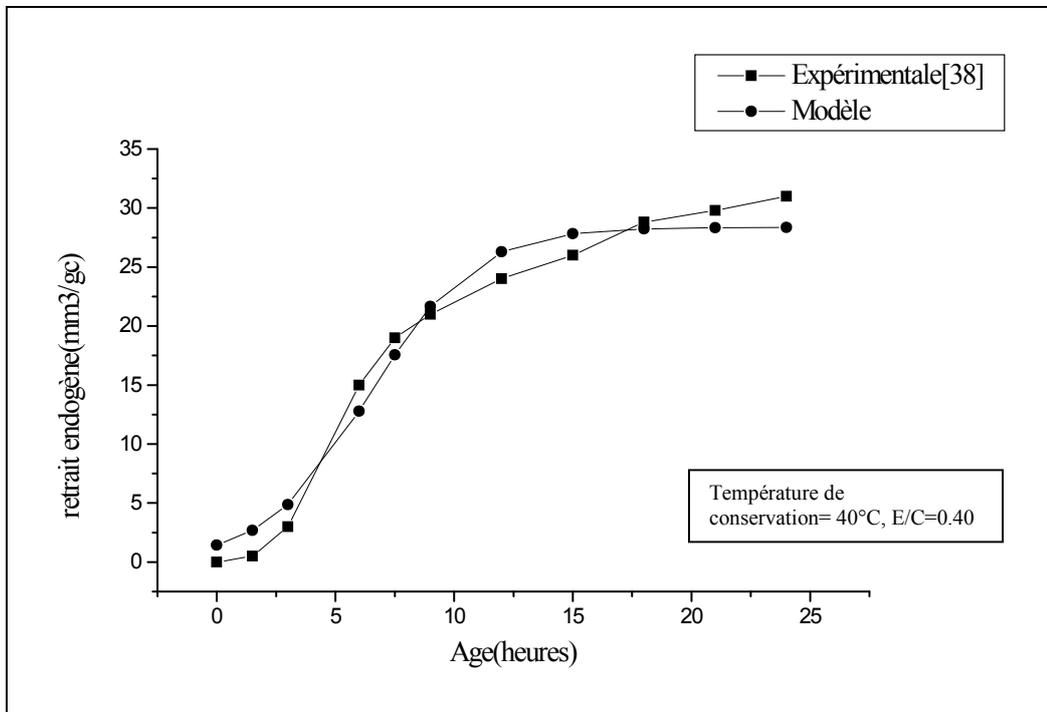


Figure : 3.6.c

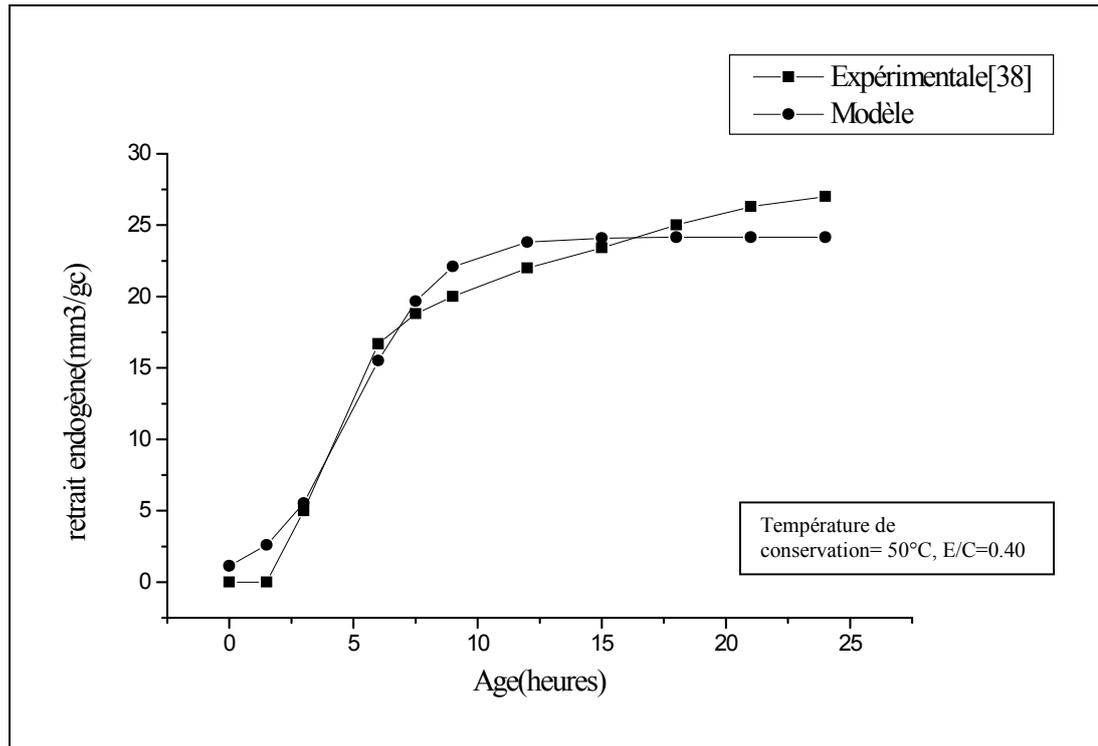


Figure : 3.6.d

Figure 3.6 : comparaison des valeurs de retrait prévues par le modèle et celles obtenue expérimentalement par [38].

Les figures 3.3, 3.4, 3.5 et 3.6 montrent bien qu'il existe une concordance parfaite entre les résultats expérimentaux obtenu par [38] et ceux prévus par le modèle pour les différents rapports E/C et les différentes températures de conservation.

### **3.5 Validation du modèle par rapport à d'autres résultats donnés dans la littérature**

Pour juger des prédictions du modèle développé et aussi pour apprécier l'étendue de son application, nous procéderons dans ce qui suit à la comparaison avec d'autres résultats expérimentaux (recueillis dans la littérature).

On observe sur la figure 3.7 une bonne concordance entre les prédictions du modèle et les valeurs obtenus expérimentalement par [38, 56]. On peut dire alors que le modèle conçu permet de décrire l'évolution du retrait volumique (ou chimique) des pâtes de ciments de façon très satisfaisante.

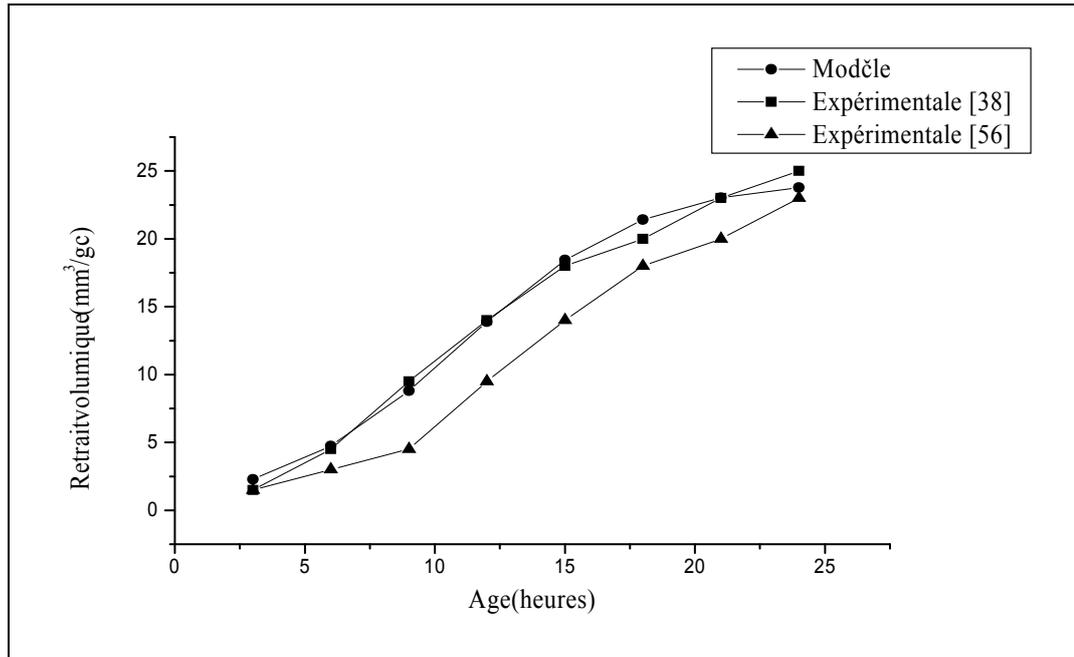


Figure 3.7 Comparaison du modèle avec résultats expérimentaux de Bouasker [56] et Mounanga [38] pour  $t = 20^\circ\text{C}$  et  $E/C = 0.30$

### 3.6 Comparaison avec d'autres modèles donnée dans la littérature

La figure 3.8 montre une parfaite corrélation entre notre modèle et ceux de Bouasker [56] et Mounanga [38], notons ici que le modèle développé est plus simple à utilisé, ceci nous a conduit à étendre son application sur d'autre résultats expérimentaux.

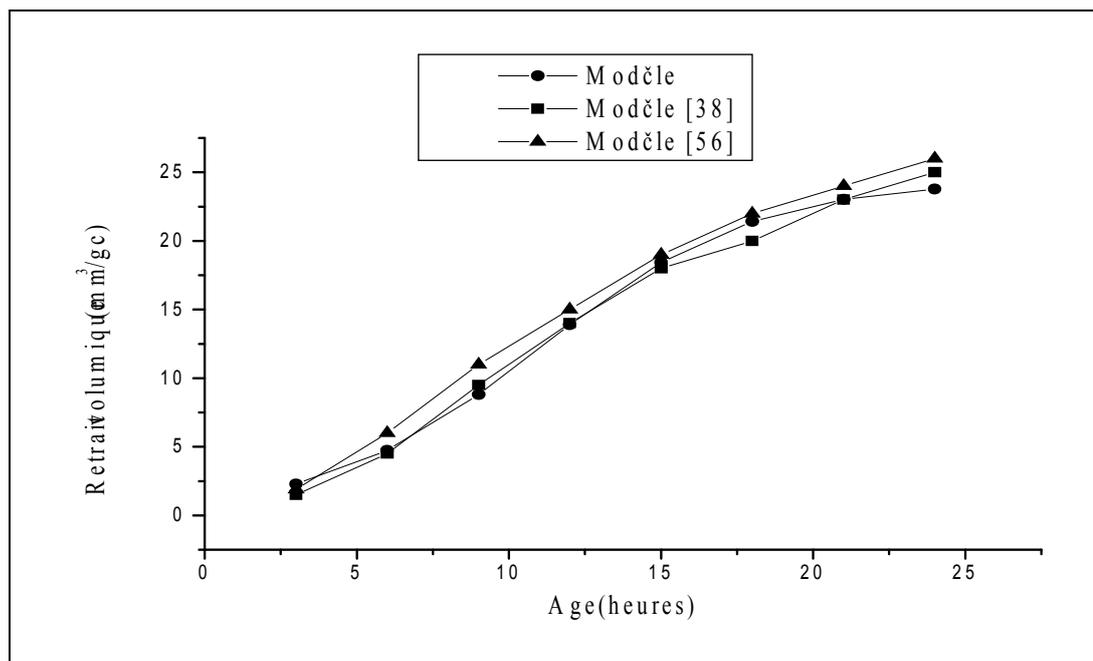


Figure 3.8 Comparaison du modèle avec les modèle de Bouasker [56] et Mounanga [38].

### 3.7 Application du modèle développé

#### 3.7.1 Influence de la présence d'adjuvants

Dans la pratique, l'utilisation de tels mélanges nécessite l'incorporation d'adjuvants (fluidifiant ou superplastifiant par exemple) afin d'augmenter la fluidité du matériau et d'améliorer ainsi sa maniabilité.

Il nous a parus alors nécessaire de considérer l'influence de la présence d'adjuvants. Pour ce faire, nous appliquons notre modèle aux pâtes de ciments utilisant un adjuvant à base de polymères naphthalènesulfonate (SNF) et un adjuvant à base d'éthers polycarboxyliques modifiés (PCE), Les résultats sont rapportés à la figure 3.17.

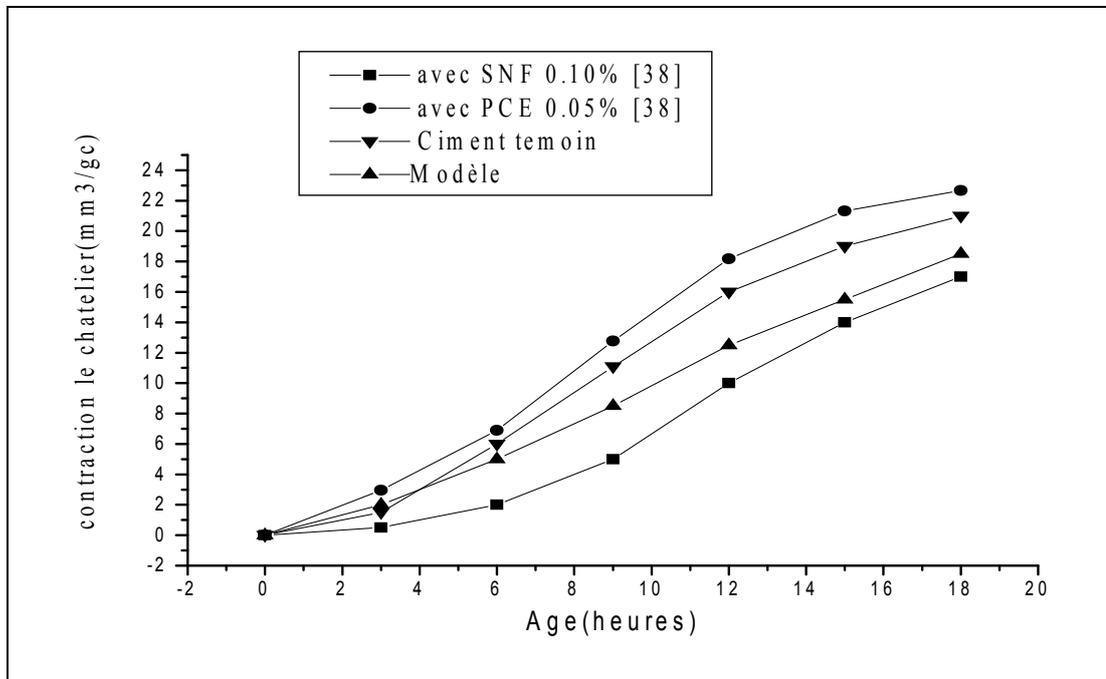


Figure 3.9 Comparaison du modèle avec résultats expérimentaux de pâtes de ciment à  $E/C=0.25$ , avec ou sans adjuvant et conservées à  $20^{\circ}\text{C}$  [38]

On observe alors un même phénomène dans l'évolution du retrait chimique (contraction de Le Chatelier) qui se déroule avec des vitesses et des amplitudes différentes.

En effet le ralentissement des réactions d'hydratation, pendant les premières heures après le gâchage, se traduit par une diminution de la cinétique d'évolution du retrait chimique.

Le modèle peut être aisément étendu à la description de l'évolution du retrait chimique des pâtes de ciment avec adjuvants.

### 3.7.2 Influence du type de ciment:

Dans ce chapitre nous avons jugé utile d'appliquer notre modèle aux différents types de ciment à savoir :

□ le ciment portland (**CEM I**) dont l'unique constituant principal est le clinker portland (K). La teneur en clinker est d'au moins 95%.

□ le Ciment Portland composé (**CEM II**) dont les composants principaux sont le clinker portland (K) et de cendres volantes siliceuses (V), le laitier de haut fourneau (S) ou le calcaire.

□ Ciments de hauts fourneaux (**CEM III**) Qui sont des ciments de haut fourneau dont les constituants principaux sont le clinker portland (K) et le laitier granulé de haut fourneau (S), les résultats sont regroupés dans la figure 3.10

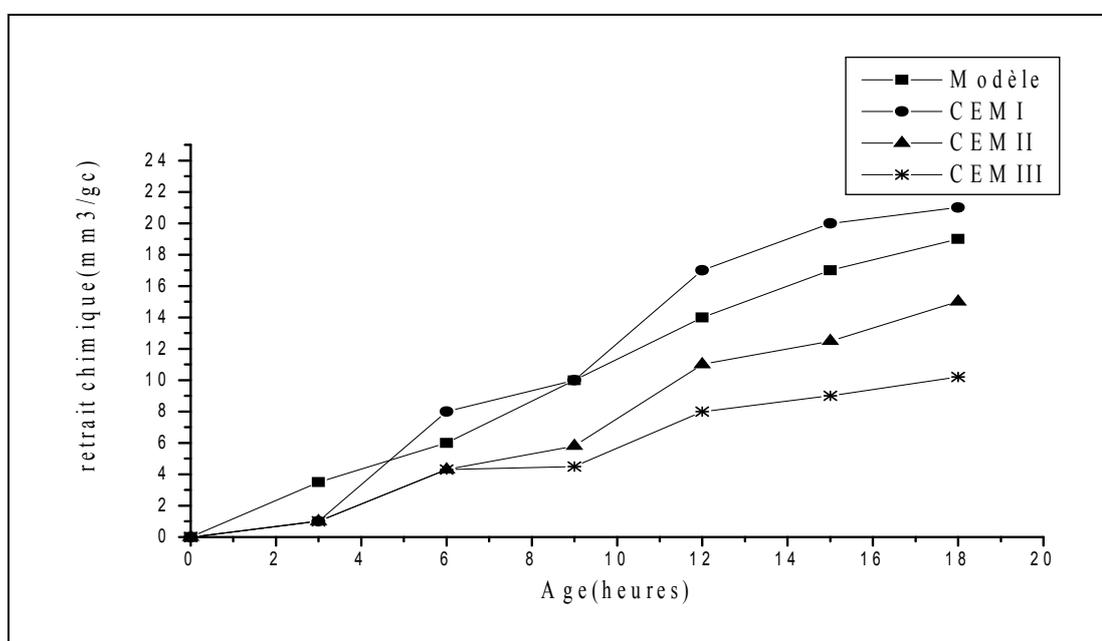


Figure 3.10 Comparaison du modèle avec Evolution du retrait chimique en fonction de l'âge d'hydratation des trois types de Ciments ( $E/C = 0,30$ ) [56].

La encore, le modèle développé peut être adapté aux prédictions du retrait chimique des différents types de ciments, la cinétique d'hydratation change d'une classe de ciment à une autre avec le changement de la composition chimique. Le retrait chimique ou la contraction Le Chatelier, conséquence directe des réactions d'hydratation, dépend également de la classe de ciment [56].

D'après [56] on a observé que la cinétique d'hydratation de la pâte de ciment CEM I est plus importante que celles des deux autres pâtes de ciment (CEM II et CEM III).

La Figure 3.10 , qui présente les résultats du retrait chimique des trois types de ciment pour un rapport  $E/C = 0,30$  en fonction du temps d'hydratation montre que la pâte de ciment du CEM I présente un retrait chimique nettement plus important que les autres ciments, A 18 heures d'hydratation, le retrait chimique de la pâte de ciment CEM I est de  $21 \text{ mm}^3/\text{g}$  de ciment contre  $15 \text{ mm}^3/\text{gC}$  et  $10.1 \text{ mm}^3/\text{gC}$  respectivement pour les pâtes de ciment CEM II et CEM III. Il est à noter que les allures des courbes du retrait chimique des deux ciments CEM I et CEM II sont identiques avec des amplitudes différentes.

### 3.8 Application du modèle sur l'évolution du degré d'hydratation avec le modèle

La figure 3.11 montre une dépendance quasi linéaire entre le modèle développé et l'évolution du degré d'hydratation pour les différentes températures de conservation, on peut dire à ce niveau que le retrait chimique (ou contraction le Chatelier est étroitement liée à l'hydratation.

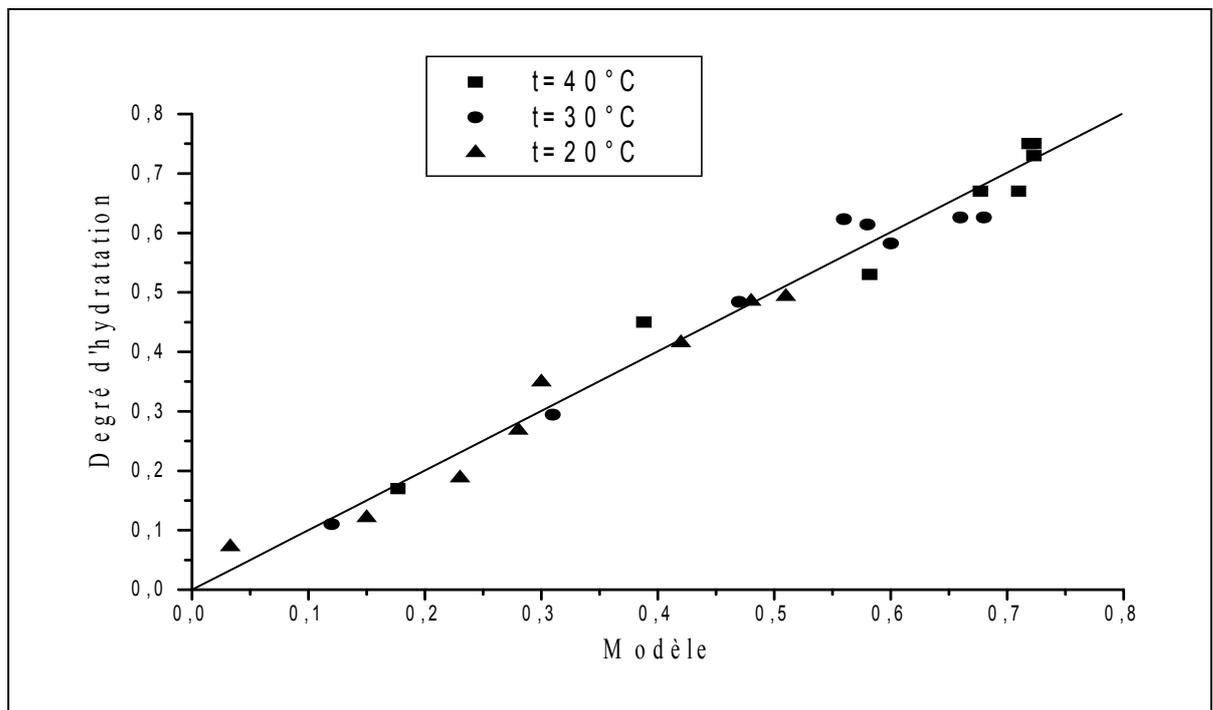


Figure 3.11 Corrélation entre le modèle et l'évolution du degré d'hydratation obtenue Par [38] à  $t = 20^\circ\text{C}$ ,  $30^\circ\text{C}$  et  $40^\circ\text{C}$  ( $E/C = 0,25$ )

### 3.9 Evolution du Retrait endogène

L'évolution du retrait endogène en fonction du degré d'hydratation avec un rapport  $E/C = 0.25$  et différentes températures de conservations est données sur la figure 3.12 , On observe une relation de forme polynomiale de 1 degré ( $y = a x + b$ ) pour les différentes températures de conservation, on peut dire que l'évolution du retrait endogène est étroitement liée au degré d'hydratation des pâtes de ciments.

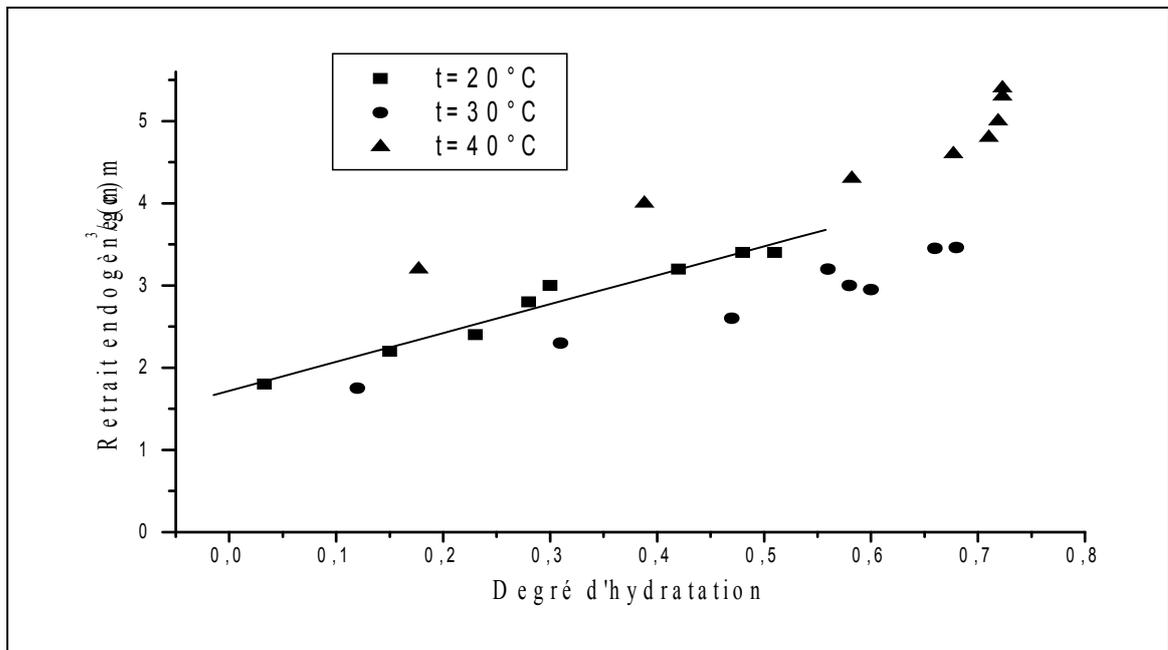


Figure 3.12 Corrélation entre le modèle et l'évolution du retrait endogène obtenue Par [38] ( $E/C = 0,25$ )

On peut dire ici que le retrait endogène avant prise et en cours de durcissement est régi par les déplacements d'eau au sein du matériau.

### Conclusion

Dans les validations précédentes, il apparaît bien que notre modèle est bien adapté pour décrire l'évolution du retrait endogène des pâtes de ciment. Notre modèle demeure satisfaisant, Ceci a été justifié précédemment par comparaison d'une part aux données expérimentales et d'autre part, aux modèles disponibles dans la littérature.

Les résultats obtenus montrent que ce modèle conçu permet de prédire l'avancement, l'évolution du retrait chimique et endogène, de l'hydratation d'une pâte de ciment toutefois un calibrage des paramètres du modèle à savoir  $a$ ,  $k$ ,  $r$  est nécessaire.

## CONCLUSION

### 1. CONCLUSION GENERALE

La présente étude nous a permis de constater que le retrait chimique conséquence de la contraction le Chatelier est intimement lié à l'hydratation durant tous premiers ages, le retrait chimique coïncide avec le retrait endogène et ce jusqu'au début de prise, par la suite la pâte augmente de rigidité et le retrait endogène évolue différemment par rapport au retrait chimique

L'examen des courbes expérimentales montre une augmentation très forte de la pente initiale des courbes d'évolution du retrait endogène (chimique) lorsque la température de conservation augmente, la température accélère significativement le processus d'hydratation et l'évolution des déformations chimiques et endogènes, et ceci dès les premières heures de l'hydratation.

Le modèle de prédiction développé dans le cadre de ce travail est très satisfaisant étant comparé aux différents résultats expérimentaux d'une part et aux prédictions des modèles existants d'autre part.

En plus de sa simplicité le modèle développé permet de prédire avec plus au moins de précisions les évolutions du retrait chimique de différents types de ciments et aussi les ciments referment des adjuvants.

Un intérêt particulier est attribué au fait que le retrait chimique évolue linéairement par rapport au degré d'hydratation ce qui a été confirmé par les travaux de [55]

Enfin cette étude a montré que le retrait chimique est lié au fait que le volume des hydrates issus des réactions d'hydratation est inférieur à la somme des volumes du ciment et de l'eau qui réagissent.

## 2. RECOMMANDATIONS

Dans ce qui précède, il apparaît clairement que le modèle conçu peut être étendu à d'autres types de ciments

-il serait aussi très intéressant d'appliquer les résultats de cette étude aux différents types de béton tels que les BHP

- Béton à haute performance (BHP) aux très jeunes âges pour des températures de conservation ne dépassant pas 40°C.

Un facteur à considérer en étudiant des changements de volume, est la microfissuration.

-La présence des microfissures présuppose l'existence de contraintes avant le moment de la fissuration

-La fissuration des matrices cimentaires étant toujours causée par des déformations empêchées, il s'avère nécessaire d'intégrer cet aspect à une recherche future sur les mécanismes de fissuration précoce.

## REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] VIALIS-TERRISSE H. (2000), Interaction des Silicates de Calcium Hydratés, principaux constituants du ciment, avec les chlorures d'alcalins. Analogie avec les argiles, Thèse de Doctorat de l'université de Bourgogne, 256 p.
- [2] HANSEN T.C. (1986), Physical structure of hardened cement paste. A classical approach, *Materials and Structures*, 19 (114), p. 423-436.
- [3] FELDMAN R.F., SEREDA P.J. (1968), The model for hydrated Portland cement as deduced from sorption-length change and mechanical properties, *Materials and Construction*, 1, p. 509-520.
- [4] GUENOT-DELAHAIE I. (1997), Contribution à l'analyse physique et à la modélisation du fluage propre du béton, Thèse de doctorat de l'ENPC, avril 1997.
- [5] SIERRA, R. Répartition des différentes formes d'eau dans la structure des pâtes pures de C<sub>3</sub>S et de ciment Portland. *Bulletin de liaison des LPC*, vol. 117, 1982, p. 77-81.
- [6] HANSEN T.C. (1986), Physical structure of hardened cement paste. A classical approach, *Materials and Structures*, 19 (114), p. 423-436.
- [7] BAROGHEL-BOUNY V. (1994), Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons. Méthodes, analyse, interprétation, Thèse de doctorat de l'ENPC, Paris, 468 p.
- [8] REGOURD M. (1982), L'eau, dans *Le béton hydraulique*, Presse de l'ENPC, sous la direction de Jacques Baron et Raymond Sauterey, Paris, p. 59-68.
- [9] GUENOT-DELAHAIE I. (1997), Contribution à l'analyse physique et à la modélisation du fluage propre du béton, Thèse de doctorat de l'ENPC, avril 1997.
- [10] BAŽANT Z.P. (1972), Thermodynamics of hindered adsorption and its implications for hardened cement paste and concrete, *Cement and Concrete Research*, 2, p. 1-16.
- [11] ACKER P., Retraits et fissuration du béton. Association française pour la construction, pp 10-40.1992.
- [12] AITCIN P.C., Le mûrissement des BHP, la mesure de retrait à paraître *ACI material Journal*. 1997.

- [13] BARON J., Les retraits de la pâte de ciment, le béton hydraulique : connaissance et Pratique. Sous la direction de J. BARON et R. SAUTEREY, Presses de l'école Nationale des Pont et Chaussées 1982, Chapitre 27 P (485-501) « Les retraits de la pâte de ciment ».
- [14] AOUD I., Etude de l'influence du rapport E/L, de la fumée de silice et d'un agent réducteur de retrait sur le retrait endogène de pâte de ciment. Mémoire de maîtrise des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Département de génie civil, 1998.
- [15] BAROGHEL-BOUNY, V. Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons. Méthodes, analyse, interprétations. Thèse de Doctorat, ENPC : Paris, 1994, 467 p.
- [16] LOUKILI, A., KHELIDJ, A., RICHARD, P. Hydration kinetics, change of relative humidity and autogenous shrinkage of ultra-high-strength concrete. Cement and Concrete Research, vol. 29, n°4, 1999, p. 577-584.
- [17] RADOCEA, A. Water pressure in fresh and young cement paste. Nordic Concrete Research, vol. 9, 1990, p. 145-159.
- [18] POWERS, T.C. A discussion of cement hydration in relation to the curing of concrete. Research laboratories of the Portland Cement Association, n°25, 1948.
- [19] PAILLÈRE, A.M., Buil, M., Serrano, J.J. Effect of fibre addition on the autogenous shrinkage of silica fume concrete. ACI Materials Journal, vol. 86, n°2, 1989, p. 139-144.
- [20] ATLASSI, E. Influence of cement type on the desorption isotherm of mortar. Nordic Cement Research, vol. 10, 1991, p. 25-36.
- [21] WITTMANN, F.H. Surface tension shrinkage and strength of hardened cement paste. Materials and Structures, vol. 1, n°6, 1968, p. 547-552.  
Proceeding of International Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete. Editor – Ei-Ichi TAZAWA, Japan Concrete Institute, Hiroshima 1998.
- [22] TAZAWA E., MIYAZAWA S., KASAI T., Chemical shrinkage and Autogenous shrinkage of hydrating cement paste., Cement and Concrete Research, Vol. 25, No.2, pp288-292, 1995.
- [23] COPELAND, L.E., Kantro, D.L., Verbeck, G. Chemistry of hydration of Portland cement. 4th International Symposium on the Chemistry of Cement, Washington, D.C., vol. 1, 1960, p. 429-468. Cité par (PARR 90).
- [24] BARCELO L., Influence des caractéristiques des ciments sur la structuration et le comportement dimensionnel des matériaux cimentaires au jeune âge, thèse de doctorat, LMT-ENS de Cachan, Oct.2001.

- [25] GARCIA BOIVIN, S., Retrait au jeune âge du béton : développement d'une méthode expérimentale et contribution à l'analyse physique du retrait endogène, thèse de doctorat, ENPC, 251 pages, 1999.
- [26] SELLEVOLD, E.J., Bjøntegaard, Ø., Justnes, H., Dahl, P.A. High performance concrete: Early volume change and cracking tendency. Proceedings of the International RILEM Symposium "Thermal Cracking in Concrete at Early Ages", Munich (Allemagne), October 1994. Editor R. Springenschmid, Pub. Londres: E&FN Spon, p. 229-236.
- [27] HUA 95a Hua, C. Analyses et modélisations du retrait d'autodessiccation de la pâte de ciment durcissante. Thèse de Doctorat, ENPC : Paris, 1995, 160 p.
- [28] HUA 95b Hua, C., Acker, P., Erlacher, A. Analyses and models of the autogenous shrinkage of hardening cement paste: I. Modelling at macroscopic scale. Cement and Concrete Research, vol. 25, n°7, 1995, p. 1457-1468.
- [29] LURA, P., Jensen, O.M., van Breugel, K. Autogenous shrinkage in highperformance cement paste: An evaluation of basic mechanisms. Cement and Concrete Research, vol. 33, n°2, 2003, p. 223-232.
- [30] COPELAND L., E., and BRAGG R., H., Self-desiccation in Portland – cement pastes, research department Bulletin 52, research and development laboratories of the PCA1955.
- [31] BARCELO L., Béton au jeune âge, mesure en continue des déformation endogène de la phase liante, dès coulage du matériau, mémoire de D.E.A, INSA Lyon, 1997.
- [32] BUIL M., Comportement physicochimique du système ciment – fumées de silice, annales de l'ITBTP, N° 483, série Béton 271,1990.
- [33] GAUSE G., R. and JUCKER J., Method for determining the moisture condition in hardened concrete, journal of research of the national bureau of standards, vol. 25, 1940.
- [34] SELLEVOLD E., J., and JUSTNES H., High strength concrete binders – part B : non evaporable water, self – desiccation and porosity of cement pastes with and with out condensed silica fume, 4th international conference on fly ash, silica fume and natural pozzolans in concrete, Istanbul, pp 132-148, 1992.
- [35] GEIKER M., Measurement of chemical shrinkage and a systematic evaluation of hydration curves by means of the dispersion model, PhD thesis, technical university of Denmark, 1983.
- [36] BUIL, M., Contribution à l'étude du retrait de la pâte de ciment durcissant, thèse de doctorat de l'ENPC 1979.

- [37] VIVIANI M., GLISIC B., SMITH I.F.C (2007) "Separation of thermal and autogenous deformation at varying temperatures using optical fiber sensors" *Cement and Concrete Research*, Vol. 38, p. 196-204.
- [38] MOUNANGA P, Baroghel-Bouny V., Loukili A., Khelidj A. (2006) "Autogenous deformation of cement pastes: Part. I. Temperature effects at early age and micromacro correlations" *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, pp. 110-122
- [39] LAPLANTE P., Roussel S., Lecrux S. (1998) "Technique maturométrique: la loi d'Arrhénius au service des chantiers" *Proceedings of the International RILEM Conference*, RILEM Publications, Arles, France (1998), pp. 323–342.
- [40] PINTO C.A., Hover K.C. (1999) "Application of maturity Approach to setting times" *ACI Materials Journal*, Vol. 96, pp. 686-691.
- [41] TURCRY P., Loukili A., Barcelo L. Casabonne J.M. (2002) "Can the maturity concept be used to separate the autogenous shrinkage and thermal deformation of a cement paste at early age?" *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, pp. 1443-1450.
- [42] LACHEMI M., Hossain K.M.A., Anagnostopoulos C., Sabouni A.R., (2007), "Application of maturity method to slipforming operations: Performance validation", *Cement Concrete Composites*, Vol. 29, n°4, pp. 290-299.
- [43] TURCRY P., Loukili A., Barcelo L. Casabonne J.M. (2002) "Can the maturity concept be used to separate the autogenous shrinkage and thermal deformation of a cement paste at early age?" *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, pp. 1443-1450.
- [44] BERNARD O. et al, [2003], 'A multiscale micromechanics-hydration model for the earlyage elastic properties of cement-based materials'. *Cement and Concrete Research*, vol. 33, p. 1293-1309.
- [45] PICHELER C., Lackner R., Mang H. A. [2007], 'A multiscale micromechanics model for the autogenous-shrinkage deformation of early-ages cement-based materials'. *Engineering Fracture Mechanics* vol. 74, p. 34-58.
- [46] BENTZ D.P., E.J.Garboczi, D.A. Quenard, [1998], 'Modelling drying shrinkage in reconstructed porous materials: Application to porous Vycor glass, *Model. Simul. Mater. Sci Eng.*6 , p.211-236.
- [47] COUSSY O., Dangla P., Baroghel-Bouny V., [2004], 'the equivalent pore pressure and the swelling and shrinkage of cement-based materials'.*Materials and structures* Vol.37, p.15-20.

- [48] VALHINIC I., Jennings H.M., Thomas J.J, [2008], 'A constitutive model for drying shrinkage of a partially saturated porous material'. Submitted to Journal of the mechanics and Physics of solids.
- [49] KOENDERS E., Van Breugel, K. [1997], 'Numerical modelling of autogenous shrinkage of hardening cement paste'. Cement and Concrete Research vol. 27, n°10, p. 1489-1499.
- [50] KHEIRBEK, A. Influence des paramètres de formulation sur les retraits endogène et de dessiccation de la pâte de ciment. Thèse de Doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 1999, 135 p
- [51] WALLER, V. Relations entre composition des bétons, exothermie en cours de prise et résistance en compression. Thèse de Doctorat, ENPC : Paris, 2000, 317 p.
- [52] KJELLSSEN, K.O., Detwiler, R. Reaction kinetics of Portland cement mortars hydrated at different temperatures. Cement and Concrete Research, vol. 22, 1992, p. 112-120.
- [53] BOUMIZ, A. Etude comparée des évolutions mécaniques et chimiques des pâtes de ciment et mortiers à très jeune âge. Thèse de Doctorat, Université Paris VII : Paris, 1995, 211 p.
- [54] LEA, F.M. Lea's chemistry of cement and concrete. Edité par P.C. Hewlett. Londres : Wiley, John and Sons, 1998, 1092 p.
- [55] BRAHMA A et MEGUENNI K rate of fixing of combined water in cement Portland pastes- proceeding international conference Dundee, UK edit. Hromas téford.
- [56] BOUASKER a Marwen, Frédéric Grondin b Pierre Mounanga a , Abdelhafid Khelidj a , analyses multi échelles du retrait endogène des cimentaires au jeune âge , 18 ème congres français de mécanique grenoble, 27- 31 aout 2007.
- [57] JAOUADI , I, GUIDOUM, a , and Scrivener, k 2007 , measuring of Autogenous shrinkage of cement paste at early age. Cement and concrete science conference , London.
- [58] HUET C 1990 application of variational concepte to size effect in elastic heterogeneous bodies. journal of the mechanics and physics of solids vol .38, n° 06 .pp 813 – 841;
- [59] HILL R, 1963, elastic properties of reinforced: some theoretical principles .j.Mech .Phys.Solids, vol.11, pp357 -372.
- [60] BISHNOI, S 2008 vector modeling of hydrating cement microstructure and kinetics. these de doctorate EPFL.
- [61] HAOUAS, A, Lamour V, BENBOUDJEMA F, et MORANVILLE M 2004, nouvelle methode de caractérisation et d'analyse du comportement de mortiers industriels au

jeune âge. 4<sup>ème</sup> journée scientifiques du regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton, juillet, 2004.

[62] COUSSY O. 1995 mechanics of porous continua, John Wiley & Sons, Chichester, UK.

[63] HAOUAS A. 2002-2006 Thèse en cours, comportement au jeune âge des matériaux cimentaires – caractérisation et modélisation chemo-hydro-mécanique du retrait, ENS-cachan, France.

[64] ATKINS P.W. 1990 physical chemistry, fourth Edition, Oxford University Press, UK

[65] GARBOCZI E.J et BENTZ D.P, analytical formulas for transition zone properties, advanced cement based materials, 6 (3-4) pp 90-108, 1997.

[66] MINDES S, interface in concrete, in J.P. SKALNY (ed) materials science of concrete, journal of the American ceramic society, Westerville, Ohio, pp 163-180, 1989.