

UNIVERSITE DE BLIDA 1

Faculté de Technologie

Département de Génie Civil

THESE DE DOCTORAT

Spécialité : Génie Civil

ANALYSE DU COMPORTEMENT DIFFERE DU BETON :

ETUDE ET MODELISATION DU RETRAIT DE SECHAGE
DU BETON

Par

Dalila BOUCHERIT

Devant le jury composé de :

M. ABED	Professeur, Université de Blida 1	Président
B. MENADI	Professeur, Université de Blida 1	Examineur
K. EZZIANE	Professeur, Université de Chlef	Examineur
O. BOUKENDAKDJI	Maître de Conférences A, Université de Médéa	Examineur
F. DEBIEB	Maître de Conférences A, Université de Médéa	Examineur
S. KENAI	Professeur, Université de Blida 1	Promoteur

Blida, Juin 2015

ملخص

أحد الأسباب الرئيسية التي تؤثر على ديمومة و عمر المنشآت الخراسانية هو تطور الشقوق الصغيرة التي يسببها التشه الناتج عن التقلص و السيلان. ظاهرة التقلص الناتج عن الجفاف الخارجي معقدة جدا بالمقارنة مع التقلص الناتج عن الجفاف الذاتي، و ذلك بسبب تعدد الآليات و التأثير البنيوي و تأثير المقياس و تأثير سرعة الجفاف، بالإضافة إلى ذلك، يتعلق مقدار التقلص الناتج عن الجفاف الخارجي بعدة عوامل بعضها يتغير مع الزمن. و لذلك من الضروري تحديد حجم هذه التشوهات لتقدير تأثير التشوهات الناتجة عن التقلص وتأثيرها على استقرار البناية على المدى الطويل.

الهدف من هذه الدراسة هو اقتراح نموذج رياضي بسيط لتقدير الانكماش الناتج عن الجفاف الخارجي على المدى الطويل لخرسانة ذات مقاومة معتدلة، وذلك بالاعتماد على معطيات تجريبية متوفرة في مؤلفات. تمت مقارنة دقة وكفاءة النموذج المقترح بشكل إيجابي مع العديد من الطرق الأكثر استخداما على نطاق واسع و التي تم وضعها لتقدير تقلص الخرسانة ذات المقاومة المعتدلة (CEB -90، - B3، 2000، ACI- 92، 2000، GL).

تم التحقق من صحة النموذج المقترح من خلال النتائج التجريبية المتاحة في المؤلفات، وأيضا من خلال نتائج دراسة تجريبية أنجزت في المخبر لدراسة تأثير نوع الملدنات الممتازة و دراسة إمكانية تطبيق النموذج المقترح على الخرسانة ذات نسبة ماء/ اسمنت منخفضة و حاوية على أنواع من الملدنات الممتازة. استخدمت في الدراسة التجريبية ثلاثة أنواع من الملدنات الممتازة من عائلة الكربوكسيل ذا الأساس الايثر (PCE) لدراسة الانكماش الناتج عن الجفاف لثلاثة خرسانات. لتقييم تأثير هذه الملدنات الممتازة (PCE) تمت إضافة ملدن ممتاز آخر ينتمي إلى عائلة بوليناقتلا سيلفونات (PNS).

أظهرت نتائج الدراسة أن النموذج المقترح يعطى تقديرا جيدا للانكماش الناتج عن الجفاف للخرسانة ذات المقاومة المعتدلة. وأيضا يمكن استخدام النموذج للخرسانة ذات نسبة ماء/ اسمنت منخفضة و الحاوية على أنواع من الملدنات الممتازة.

الكلمات المفاتيح: الانكماش الناتج عن الجفاف الخارجي ، نماذج التقدير، أبعاد العينة، نسبة الرطوبة، خصائص الخرسانة ، عجينة الاسمنت ، الملدنات الممتازة، مقاومة الضغط، طرق الحفظ

RÉSUMÉ

L'une des principales causes qui affectent la durabilité et la durée de vie des structures en béton est le développement des micro-fissures causées par les déformations dues au retrait et au fluage. Comparativement au retrait endogène, le phénomène de retrait de dessiccation est très compliqué (nombreux mécanismes, effet structural, effet d'échelle, et effet de la vitesse de séchage). En plus, l'amplitude du retrait de séchage dépend de plusieurs paramètres dont certains varient en fonction du temps. Pour estimer les effets des déformations de retrait à long terme sur la stabilité de la structure, il est nécessaire de déterminer l'amplitude de cette déformation.

L'objectif de cette étude est de développer un modèle empirique simple pour prédire le retrait de séchage à long terme du béton de résistance ordinaire, en se basant sur des données expérimentales publiées. La précision et les performances du modèle proposé ont été comparées favorablement à celles de plusieurs méthodes courantes qui ont été développées pour estimer le retrait du béton de résistance ordinaire (CEB-90, B3-2000, ACI-92, GL-2000).

Le modèle proposé a été validé par les résultats expérimentaux disponibles dans la littérature et aussi par les résultats d'une étude expérimentale réalisée dans le laboratoire pour analyser l'effet des adjuvants superplastifiants. L'objectif de l'étude expérimentale est d'étudier la possibilité d'appliquer le modèle proposé sur le béton de faible rapport E/C contenant différents types de superplastifiants. Dans l'étude expérimentale, trois types de superplastifiants de la famille polycarboxylates à base d'éther (PCE) ont été utilisés pour étudier la déformation de retrait de séchage de trois bétons. Afin d'évaluer les effets de PCE, il a été ajouté un autre superplastifiant appartenant à la famille de polynaphtalène sulfonate (PNS).

L'étude a montré qu'une bonne estimation du retrait de séchage du béton a été obtenue par le modèle proposé. Ainsi, ce modèle peut être utilisé pour le béton de faible rapport E/C et contenant du superplastifiant.

Mots-clés: *retrait de séchage, modèles de prédiction, dimension de l'échantillon, humidité relative, propriétés du béton, la pâte de ciment, superplastifiant, résistance en compression, l'ouvrabilité, méthode de la cure.*

ABSTRACT

One of the main causes which affect the durability and service life of concrete structures is the development of micro-cracks caused by deformation due to shrinkage and creep. Compared to endogenous shrinkage, drying shrinkage is very complicated (many mechanisms, structural effect, scale effect and effect of drying rate), In addition, the magnitude of drying shrinkage depends on several parameters of which some vary with time. To estimate the effects of the long term shrinkage strains on the stability of the structure, it is necessary to determine the magnitude of this strain.

The aim of this study is to propose a simplified empirical model to predict the long-term drying shrinkage of normal strength concrete, based on published experimental data. The accuracy and performance of the proposed model was compared favourably with that of several common methods, which were developed for estimating the shrinkage of normal strength concrete (CEB-90, B3-2000, ACI-92, GL-2000).

The proposed model was validated by comparison with experimental results available in the literature, and the results of an experimental study which was realized to analyse the effect of superplasticizer admixture. The aim of the experimental study is to study the applicability of the proposed model for concrete with low w/c ratio containing different types of superplasticizers. Three types of polycarboxylates ether-based superplasticizer (PCE) were used to study the drying shrinkage strain of three concrete mixes. In order to evaluate the PCE effects, another superplasticizer was added; polynaphtalene sulfonate (PNS).

The results showed a good estimation of long term drying shrinkage of normal strength concrete when the simplified model was used. Hence, the model can be used for concrete with low w/c ratio and with superplasticizer.

Keywords: Drying shrinkage, prediction models, specimen size, relative humidity, concrete properties, cement paste, superplasticizer, compressive strength, workability, curing methods.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier en premier lieu DIEU "Allah" Miséricordieux qui m'a donné la force et la volonté d'achever ce modeste travail.

Mes très sincères remerciements à Monsieur KENAI Said, Professeur à l'Université de Blida1, Directeur de cette thèse pour ses encouragements continus qui ont rendu ce travail possible, et pour le temps qui a consacré pour corriger cette thèse.

Ce travail n'aurait pu se finaliser sans la contribution de Monsieur Folker Wittmann Directeur de l'Institut Aedificat Fribourg (FIA) et Professeur à l'Université technologique de Qingdao Région de Fribourg (Allemagne). Mes remerciements vont vers cette personne pour sa disponibilité, son écoute, et son aide.

Mes remerciements vont à Monsieur El-Hadj KADRI, Professeur à l'Université Cergy-Pontoise (France), pour ses encouragements, et pour m'avoir accueilli à son laboratoire.

Je tiens à remercier Professeur Jamal Khatib de l'Université Wolverhampton (Royaume-Uni) et Professeur Bennacer Rachid de l'école Normale Supérieure de Cachan (France) pour leurs conseils.

Je suis reconnaissante à l'ensemble des enseignants, du département de Génie Civil de l'université de Blida1.

Mes sincères remerciements aux rapporteurs de thèse qui m'ont fait honneur d'accepter d'être membres du jury:

- ✚ Monsieur M. ABED, Professeur à l'université de Blida1, président du jury
- ✚ Monsieur B. MENADI, Professeur à l'université de Blida1, examinateur
- ✚ Monsieur K. EZZIANE Professeur à l'université de Chlef, examinateur
- ✚ Monsieur O. BOUKENDAKDJI Maitre de conférences à l'université de Médéa, examinateur
- ✚ Monsieur F. DEBIEB Maitre de conférences à l'université de Médéa, examinateur

Mes remerciements vont également aux responsables de la société GRANITEX (Alger), et Boukalkal Djamila Ingénieur de laboratoire de Génie Civil à l'université de Médéa.

Je souhaite exprimer toute ma reconnaissance à ma famille pour le sacrifice qui m'on accordé tout au long de la préparation de cette thèse et pour m'avoir supportés et soutenus jusqu'à ce jour.

Enfin, mes remerciements vont également à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, et à tous ceux qui par leur encouragement m'on aidé de finaliser cette étude.

TABLE DES MATIERES

ملخص	1
RÉSUMÉ.....	2
ABSTRACT	3
REMERCIEMENTS.....	4
LISTE DES FIGURES	9
LISTE DES TABLEAUX	16
LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS.....	18
INTRODUCTION.....	20
1. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE COMPORTEMENT DES MATERIAUX A MATRICE CIMENTAIRE	23
1.1. Introduction.....	23
1.2. Les caractéristiques de la pâte de ciment.....	24
1.2.1 Mécanisme de l'hydratation	24
1.2.1.1. Hydratation du C_3S :.....	25
1.2.1.2. Hydratation du C_3A	25
1.2.1.3. Hydratation du C_4AF	26
1.2.2. Chronologie de l'hydratation	26
1.2.3. Structure et morphologie du gel (C-S-H):	31
1.2.4. Les pores de la pâte de ciment	33
1.3. Le séchage.....	33
1.3.1. L'eau dans la pâte de ciment	33
1.3.2. Mécanismes du séchage	34
1.3.3. Effets du séchage sur les propriétés mécaniques	36
1.4. Retrait du béton	40
1.4.1. Retrait plastique.....	40
1.4.2. Retrait thermique	41
1.4.3. Retrait endogène	42
1.4.4. Retrait de dessiccation.....	43
1.4.5. Retrait Par Carbonatation	48
1.4.6. Facteurs influant le retrait.....	49
1.4.6.1. Humidité relative de l'environnement.....	49
1.4.6.2. Rapport Eau/Ciment.....	51
1.4.6.3. Effet du ciment (Liant)	52
1.4.6.4. Effet des dimensions des pièces	56
1.4.6.5. Effet des granulats	57
1.4.6.6. Effet de la cure.....	59
1.4.6.7. Effet des Adjuvants	60
1.4.6.8. Effet des armatures.....	62
1.5. Le Fluage	63
1.5.1. Mécanismes de fluage.....	64
1.5.1.1. Mécanismes du fluage propre	64
1.5.1.2. Mécanismes du fluage de dessiccation	65

1.5.2.	Facteurs influant le fluage	66
1.5.2.1.	L'humidité relative de l'environnement	67
1.5.2.2.	La température.....	67
1.5.2.3.	Rapport contrainte/résistance.....	68
1.5.2.4.	L'âge du béton au moment du chargement	69
1.5.2.5.	Dimension de l'éléments et le pourcentage d'armature	69
1.5.2.6.	Effet du rapport E/C	70
1.5.2.7.	Nature du ciment.....	71
1.5.2.8.	Granulats	73
1.5.2.9.	Adjuvants	75
1.6.	Modélisation du retrait et du fluage du béton	76
1.6. 1.	Modèle du code ACI-209-92 (American concrete institute).....	78
1.6. 1.1.	Evaluation du retrait	78
1.6. 1.2.	Evaluation du fluage.....	79
1.6. 2.	Modèle du code CEB 90 (Comité Euro-Internationale du béton)	80
1.6. 2.1.	Evaluation de retrait :	81
1.6.2.2.	Evaluation du fluage.....	82
1.6. 3.	Modèle B3-2000 (Bazânt)	83
1.6.3.1.	Evaluation du retrait :	84
1.6.3.2.	Evaluation du fluage.....	85
1.6.4.	Le modèle GL 2000 (Gardner/Lockman).....	86
1.6.4.1.	Evaluation du retrait :	86
1.6.4.2.	Evaluation du fluage.....	87
1.7.	Conclusion.....	87
2.	DEVELOPEMENT D'UN NOUVEAU MODELE DE PREDICTION DE RETRAIT DE SECHAGE DU BETON.....	89
2.1.	Introduction.....	89
2.2.	Principe de modélisation.....	89
2.3.	Modélisation du retrait du béton.....	90
2.3.1.	Effet des dimensions des pièces.....	92
2.3.1.1.	Essai de F.Alou	92
2.3.1.2.	Essai de Bazant	96
2.3.1.3.	Essais de Keeton	99
2.3.1.4.	Analyse des résultats des trois essais	102
2.3.1.5.	Essai de Mamillan	105
2.3.1.6.	Essai de Wallo	106
2.3.1.7.	Essai de Hanson	107
2.3.1.8.	Essai de F. Alou	109
2.3.1.9.	Essai de Hummel	110
2.3.1.10.	Récapitulation des résultats des essais étudiés	112
2.3.2.	Effet de l'humidité relative de l'environnement	115
2.3.2.1.	Comparaison des coefficients d'humidité des modèles	117
2.3.2.2.	Comparaison de la variation de la déformation du retrait en fonction de HR	117
2.3.3.	Effet de la cure.....	123
2.3.3.1.	Essai de Wesche	123
2.3.3.2.	Essai de Hilsdorf	126
2.3.3.3.	Essai de Dilger	127
2.3.3.4.	Essai de York.....	128
2.3.3.5.	Essai de Budelmann	130

2.3.3.6. Conclusion	131
2.3.4. Effet de dosage en ciment et en eau.....	132
2.3.4.1. Béton composé de ciment type RS	134
2.3.4.2. Béton composé de ciment type RN	135
2.3.4.3. Béton composé de ciment type SL.....	138
2.3.4.4. Analyse des équations de retrait ultime pour les trois type de ciment.....	140
2.3.5. La forme finale du modèle.....	145
2.3.6. Limites de l'application du modèle	146
3. VALIDATION DU MODELE DEVELOPPE.....	148
3.1. Introduction.....	148
3.2. Analyse des paramètres d'entrée du modèle	148
3.2.1. Facteurs d'entrée des modèles de prédiction de retrait.....	149
3.2.2. Dimension de l'échantillon	150
3.2.3. Comparaison des coefficients de la cure.....	154
3.2.4. Comparaison des coefficients du type de ciment	155
3.3. Evaluation de la précision du modèle développé	159
3.4. Conclusion.....	164
4. ETUDE EXPERIMENTALE DE L'EFFET DU SUPERPLASTIFIANT SUR LE RETRAIT DE SECHAGE DU BETON- APPLICATION DU MODELE PROPOSE	165
4.1. Introduction :.....	165
4.2. Caractérisation des matériaux - Formulation et essais.....	165
4.2.1. Caractérisation des matériaux	166
4.2.1.1 Le ciment	166
4.2.1.2 Les granulats	166
4.2.1.3 Les superplastifiants	167
4.2.2. Formulation des pâtes et des bétons	169
4.2.2.1 Les pâtes	169
4.2.2.2 Les bétons	169
4.2.3. Essais sur la pâte et le béton	170
4.2.3.1 Essai sur la pâte de ciment (consistance et prise).....	170
4.2.3.2 Essais sur béton frais.....	171
4.2.3.3 Essais sur béton durci.....	172
4.3. Présentation et analyse des résultats	174
4.3.1 . Pâte de ciment (consistance et prise)	175
4.3.2 . Béton	177
4.3.2.1. Ouvrabilité.....	177
4.3.2.2. Température du béton.....	180
4.3.2.3. Résistance en compression	183
4.3.2.4. Vitesse de propagation d'onde ultrason	185
4.3.2.5. Perte de masse.....	188
4.3.2.6. Déformation de retrait.....	190
4.4. Conclusion.....	196
4.5. Validation du modèle proposé.....	196
4.5.1. Confrontation modèles/expérimental des déformations superficielles	197
4.5.2. Confrontation modèles/ expérimental des déformations axiales.....	197
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	204
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	207

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Evolution schématique de la quantité de chaleur dégagée lors de l'hydratation.....	27
Figure 1.2 : Morphologie de (a)- CSH et de (b) la Portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$	28
Figure 1.3 : Aiguilles d'Ettringite.....	29
Figure 1.4 : Morphologie de la pâte de ciment au cours d'hydratation	30
Figure 1.5 : Représentation schématique de la microstructure du gel de C-S-H.....	32
Figure 1.6 : Illustration des quatre types de transfert d'humidité possible suivant l'humidité de l'air ambiant.....	36
Figure 1.7 : Evolution de la résistance en compression du béton en fonction de la perte en masse.....	37
Figure 1.8 : Evolution du module d'élasticité initial en fonction de la perte en poids d'un mortier.....	38
Figure 1.9 : Evolution du coefficient de Poisson initial en fonction de la perte en poids du mortier normal.....	39
Figure 1.10 : Schématisation des mécanismes du retrait plastique d'une pâte de ciment.....	41
Figure 1.11 : Evolution du retrait de dessiccation en fonction de la perte en poids du mortier	44
Figure 1.12: Illustration de la pression capillaire (Schéma d'un capillaire non saturé).....	45
Figure 1.13: Développement des microfissures dues a l'hétérogénéité du matériau (pâte – granulats).....	47
Figure 1.14: a - profil d'humidité relative d'une éprouvette en dessiccation, b- Variations de la contrainte, c – variation des déformations induites par le séchage différentiel.....	48

Figure 1.15: Effet de l'humidité relative sur le retrait de séchage des éprouvettes de mortier de 4x8x 32cm ³	49
Figure 1.16 : Effet de l'humidité relative sur le retrait de séchage	50
Figure 1.17 : Effet du rapport E/C et de la teneur en granulat sur le retrait	51
Figure 1.18 : Relation entre le retrait ultime et le volume de la pâte.....	52
Figure 1.19: Effet du type de ciment sur le retrait du béton.....	53
Figure 1.20: Effet des additions minérales, rapport E/C et la période de cure sur le retrait du béton.....	54
Figure 1.21 : Effet de la teneur en alcalin sur la valeur extrapolée du retrait ultime des mortiers.....	56
Figure 1.22 : Effet de l'épaisseur fictive des éprouvettes sur le retrait de séchage.	57
Figure 1.23 : Effets des granulats sur le retrait du béton.....	58
Figure 1.24 : Effet granulats légers sur les retrait des bétons de rapports E/C=0.35 et E/C=0.55.....	59
Figure 1.25 : Effet de la cure sur le retrait	60
Figure 1.26 : Effet de type des adjuvants réducteurs de retrait sur le retrait du béton.....	61
Figure 1.27: Influence de rapport E/C et de l'adjuvant réducteur de retrait (SRA) sur a- retrait endogène et b- retrait de séchage	61
Figure 1.28 : Développement du fluage et du fluage de recouvrance d'un béton conservé dans l'eau et autre dans l'air.....	63
Figure 1.29 : Effet de l'humidité relative de l'environnement sur le fluage d'un béton curé pendant 28 jours.....	67
Figure 1.30 : Effet de la température sur le fluage relatif.....	68
Figure 1.31: Effet de l'âge du béton au moment de la mise en charge sur la déformation du fluage relatif	69
Figure 1.32 : Effet du rapport volume/surface sur le rapport fluage/déformation élastique pour béton séché et béton conservé à une humidité relative de 60 %.....	70
Figure 1.33 : Effet de dosage en eau et en ciment sur le fluage.....	71
Figure 1.34 : Effet de type de ciment sur la déformation et le coefficient de fluage.	73

Figure 1.35 : Effet des granulats sur le fluage.....	74
Figure 1.36 : Fluage spécifique des bétons de différents granulats légers.....	75
Figure 1.37 : Représentation du rayon moyen h_0	81
Figure 2.1 : Variation de la déformation de retrait en fonction de l'épaisseur fictive pour différents temps de séchage – Essai de F.Alou	94
Figure 2.2 : Variation du coefficient B en fonction du temps de séchage- Essai de F.Alou	95
Figure 2.3 : Variation du coefficient A en fonction de $(t-t')^{-0.4099}$ - Essai de F.Alou	96
Figure 2.4. Variation de la déformation de retrait en fonction de l'épaisseur fictive pour différents temps de séchage - Essai de Bazant	97
Figure 2.5 : Variation du coefficient B en fonction de temps de séchage - Essai de Bazant	98
Figure 2.6 : Variation du coefficient A en fonction de $(t-t')^{-0.363}$ - Essai de Bazant.	99
Figure 2.7 : Variation de la déformation de retrait en fonction de l'épaisseur fictive pour différents temps de séchage - Essai de Keeton	100
Figure 2.8 : Variation du coefficient B en fonction de temps de séchage - Essai de Keeton.....	101
Figure 2.9 : Variation du coefficient A en fonction de $(t-t')^{-0.4031}$ – Essai de Keeton..	102
Figure 2.10 : Ajustement du coefficient γ dans les équations de retrait de trois essais ; F.Alou, Bazant et Keeton.....	104
Figure 2.11 : Validation des coefficients α et γ - Essais de Mamillan	106
Figure 2.12 : Validation des coefficients α et γ - Essais de Wallo.....	107
Figure 2. 13 : Validation des coefficients α et γ - Essais de Hanson	108
Figure 2.14 : Comparaison des déformations de retrait mesurées et celles estimées – Essai de F. Alou	110
Figure 2.15 : Comparaison des déformations de retrait mesurées avec celles calculées – Essai de Hummel.....	111
Figure 2.16 : Détermination des nouvelles valeurs de coefficient λ de certains essais étudiés.....	113

Figure 2.17 : validation de la fonction d'évolution de retrait $B(t,t')$	114
Figure 2.18: Comparaison des coefficients d'humidité des quatre modèles.....	117
Figure 2.19 : Comparaison des déformations de retrait mesurées avec celles calculées – Essai de Keeton.....	119
Figure 2.20: Comparaison de l'influence des coefficients de HR des modèles sur les valeurs des déformations de retrait de séchage – Essai de Troxel	121
Figure 2.21: Comparaison de l'influence des coefficients de HR des modèles sur les valeurs des déformations de retrait / gonflement – Essai de Troxel	121
Figure 2.22: Comparaison de l'influence de coefficient de HR des modèles sur le gonflement du béton – Essai de Troxel.....	122
Figure 2.23 : Comparaison des rapports de retrait de trois séries de béton de différente période de cure - Essai de Wesche.....	124
Figure 2.24 : Comparaison des rapports de retrait des bétons de différentes périodes de cure- Essai de Hilsdorf.....	127
Figure 2.25 : Comparaison des rapports de retrait des bétons de différente période de cure- Essai de Dilger.....	128
Figure 2.26 : Comparaison des rapports de retrait des bétons de différente période de cure- Essai de York.....	129
Figure 2.27 : Comparaison des rapports de retrait des bétons de différentes périodes de cure - Essai de Budelmann.....	131
Figure 2.28 : Variation de retrait ultime en fonction du volume de la pâte de ciment type RS.....	135
Figure 2.29 : Variation de retrait ultime en fonction du volume de la pâte de ciment type RN.....	136
Figure 2.30 : Variation de retrait ultime en fonction du volume de la pâte de ciment type RN – Période de cure ≥ 7 jours – Béton scellé.....	137
Figure 2.31 : Variation de retrait ultime en fonction du volume de la pâte de ciment type RN – Période de cure ≤ 3 jours – Béton scellé.....	137
Figure 2.32 : Variation de retrait ultime en fonction du volume de la pâte de ciment type RN – Période de cure 7jours – Béton curé à HR = 65%.	137

Figure 2.33 : Variation du retrait ultime des bétons composés de ciment type SL en fonction du volume de la pate.....	139
Figure 2.34 : Variation du retrait ultime en fonction du volume de la pate - bétons composés de ciment type SL curé à HR = 65% durant 7 jours.....	139
Figure 2.35 : Variation du retrait ultime en fonction de volume de la pate - bétons composés de ciment type SL scellé durant 7 jours	139
Figure 2.36 : Validation de l'expression de retrait ultime déterminée en fonction de volume de la pâte de ciment (eq 2.36) – béton composé de ciment type RS.....	141
Figure 2.37 : Validation de l'expression de retrait ultime déterminée en fonction de volume de la pâte de ciment (eq 2.37)– béton composé de ciment type RN scellé durant 7 jours en minimum.....	141
Figure 2.38 : Validation de l'expression de retrait ultime déterminée en fonction de volume de la pâte de ciment (eq 2.38)– béton composé de ciment type RN curé à HR = 65% durant 7 jours.....	142
Figure 2.39 : Validation de l'expression de retrait ultime déterminée en fonction de volume de la pâte de ciment (eq 2.39)– béton composé de ciment type RN scellé durant 1 et 3 jours.....	142
Figure 2.40 : Validation de l'expression de retrait ultime déterminée en fonction de volume de la pâte de ciment (eq 2.42)- bétons composés de ciment type SL scellé durant 7 j.....	143
Figure 2.41 : Validation de l'expression de retrait ultime déterminée en fonction de volume de la pâte de ciment (eq 2.43)- bétons composés de ciment type SL curé à HR = 65% durant 7 jours.....	144
Figure 2.42 : Confrontation modèle / expérimentale des déformations de retrait de séchage de béton.....	147
Figure 3.1 : Comparaison des valeurs résiduelles de retrait calculées par les cinq modèles	152
Figure 3.2. La sensibilité des quatre modèles au changement de dimension des pièces en fonction de la durée de séchage- (t-t') = 100 jours)	153

Figure 3.3. La sensibilité du modèle proposé au changement de dimension des pièces en fonction de la durée de séchage et de la résistance du béton – $((V/S)_1 = 25 \text{ mm})$	153
Figure 3.4 : La sensibilité de modèle ACI au changement du type de cure en fonction du temps.....	155
Figure 3.5 : La sensibilité du modèle proposé au changement du type de ciment en fonction du temps.....	158
Figure 3.6 : Sensibilité de retrait expérimental au changement de type de ciment en fonction de temps.....	158
Figure 3.7. : Comparaison entre les déformations de retrait calculées par les modèles et les déformations expérimentales (ciment type RN ; N = 75 essais; $n_T = 1107$ valeurs).....	161
Figure 3.8 : Comparaison entre les déformations de retrait calculées par les modèles et les déformations expérimentales (ciment type SL; N = 24 essais; $n_T = 390$ valeurs)	162
Figure 3.9. Comparaison entre les déformations de retrait calculées par les modèles et les déformations expérimentales (ciment type RS; N = 45 essais ; $n_T = 648$ valeurs)	163
Figure 4.1 : Courbes granulométriques des granulats.....	167
Figure 4.2 : Vue sur les types de superplastifiants utilisés	168
Figure 4.3 : Modes de conservation des éprouvettes de béton.....	170
Figure 4.4 : Thermomètres	172
Figure 4.5 : Appareil d’ultrason	173
Figure 4.6 : Extensomètre pour mesurer la déformation de retrait	173
Figure 4.7 : Principe de mesure des déformations de retrait	174
Figure 4.8 : Influence des superplastifiants sur le temps de prise.....	176
Figure 4.9 : Influence de type des superplastifiants sur le début et la fin de prise ..	177
Figure 4.10 : Résultats d’essais d’ouvrabilité sur les bétons	178
Figure 4.11: Effet de type et de dosage de superplastifiant sur l'affaissement des bétons.....	180

Figure 4.12 : Effet de type et de dosage des superplastifiants sur la température du béton	182
Figure 4.13 : Effet de type et de dosage de superplastifiant sur la résistance en compression du béton.....	184
Figure 4.14 : Effet du superplastifiant polycarbixylate à base d'éther sur les produits d'hydratation.....	185
Figure 4.15 : Effet des superplastifiants sur la vitesse d'impulsion d'onde sonore..	187
Figure 4.16 : Effet des superplastifiants sur la perte en masse des éprouvettes de béton.....	189
Figure 4.17 : Effet des superplastifiants sur la déformation superficielle du retrait de séchage du béton.....	192
Figure 4.18 : Effet des superplastifiants sur la déformation axiale du retrait de séchage du béton	194
Figure 4.19. Variation de la température et de l'humidité relative durant l'essai	195
Figure 4.20: Comparaison des déformations de retrait entre les deux séries 1 et 3	195
Figure 4.21 : Comparaison des déformations de retrait des bétons calculées par les Modèles avec l'expérimental (superficielles - Série 1).....	198
Figure 4.22 : Comparaison des déformations de retrait des bétons calculées par les Modèles avec l'expérimental (superficielles - Série 2).....	199
Figure 4.23 : Comparaison des déformations de retrait des bétons calculées par les Modèles avec l'expérimental (superficielles - Série 3).....	200
Figure 4.24 : Comparaison des déformations de retrait des bétons calculées par les Modèles avec l'expérimental (Axiales - Série 1)	201
Figure 4.25 : Comparaison des déformations de retrait des bétons calculées par les Modèles avec l'expérimental (Axiales - Série 2).....	202
Figure 4.26 : Comparaison des déformations de retrait des bétons calculées par les Modèles avec l'expérimental (Axiales - Série 3).....	203

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1: Effet des fibres et de plastifiant sur les fissures de retrait à 42 jours..	63
Tableau 1.2 : Comparaison des résultats de fluage après huit mois de BO et BHP	72
Tableau 2.1 : Caractéristiques du béton de la série 1 – Essai de F. Alou	93
Tableau 2.2 : Equations de courbes de tendance des déformations de retrait en fonction de l'épaisseur fictive (2V/S)- Essai de F.Alou	94
Tableau 2.3 : Caractéristiques du béton – Essai de Bazant	97
Tableau 2.4 : Equations des courbes de tendance des déformations de retrait en fonction de l'épaisseur fictive (2V/S)- Essai de Bazant	98
Tableau 2.5: Caractéristiques du béton – Essai de Keeton	100
Tableau 2.6 : Equations de courbes de tendance de retrait en fonction de l'épaisseur fictive (2V/S)- Essai de Bazant	101
Tableau 2.7 : Les valeurs des coefficients de l'équation (2.13) des trois essais ...	103
Tableau 2.8 : Caractéristique du béton- Essai de Mamillan	105
Tableau 2.9 : Caractéristique du béton- Essai de Wallo	106
Tableau 2.10 : Caractéristiques du béton – Essai de Hanson	107
Tableau 2.11 : Récapitulation les valeurs des coefficients de l'équation B (t, t') des essais étudiés	108
Tableau 2.12 : Caractéristiques des bétons de la série 2 – Essai de F. Alou.....	109
Tableau 2.13 : Les valeurs de coefficient ω – Essai de F. Alou	109
Tableau 2.14 : Caractéristiques des bétons – Essai de Hummel	110
Tableau 2.15 : Les valeurs de coefficient ω – Essai de Hummel.....	111
Tableau 2.16 : Récapitulative des résultats des essais étudiés	112
Tableau 2.17 : Mode d'action de mécanismes de retrait de dessiccation.....	115
Tableau 2.18 : Coefficient d'humidité utilisé dans chaque modèle.....	116
Tableau 2.19: Caractéristiques du béton – Essai de Troxel	120
Tableau 2.20 : Caractéristiques des bétons – Essai de Wesche	124

Tableau 2.21 : Caractéristiques des bétons – Essai de Hildsorf	126
Tableau 2.22 : Caractéristiques des bétons Essai de Dilger.....	127
Tableau 2.23 : Caractéristiques des bétons– Essai de York.....	129
Tableau 2.24 : Caractéristiques des bétons- Essai de Budelmann.....	130
Tableau 2.25 : Retrait ultime des bétons composés de ciment type RS.....	134
Tableau 2.26 : Retrait ultime des bétons composés de ciment type RN	135
Tableau 2.27 : Retrait ultime des bétons composés de ciment type SL	138
Tableau 3.1: Les facteurs d'entrée des modèles de prédiction de retrait.....	149
Tableau 3.2: Les limites d'application des modèles	150
Tableau 3.3: Sensibilité du modèle proposé à la période de cure	154
Tableau 3.4: Sensibilité des modèles ACI, B3 et le Modèle proposé au type de cure.....	155
Tableau 3.5: Données des essais	157
Tableau 3.6: Sensibilité des modèles GL2000, B3 et CEB au changement du type de ciment.....	158
Tableau 4.1 : Composition chimiques et propriétés physiques du ciment	166
Tableau 4.2 : Caractéristiques des granulats.....	166
Tableau 4.3 : Les caractéristiques des superplastifiants.....	168
Tableau 4.4: Composition des bétons étudiés.....	169
Tableau 4.5: Effet de type et de dosage du SP sur la consistante et la prise de la pâte.....	175
Tableau 4.6: Comparaison entre les vitesses d'impulsion d'onde sonore mésurées à 70 j et 472 j.....	188

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

ACI	American concrete Institute (Institut Américain du Béton)
ACI-209	Modèle Américain de prédiction de retrait et de fluage du béton
ASTM	American Society for Testing and Materials
B	Béton
BAP	Béton autoplaçant
BHP	Béton de Haute Performance
BHR	Béton de Haute Résistance
BTHR	Béton de Très Haute Résistance
BO	Béton Ordinaire
B3-2000	Dernière Version du modèle Bazant de prédiction du retrait et du fluage du béton
BVC	Béton Vibré Classique
C	Ciment
CEB	Comité Européenne du Béton
CEB-90	Modèle européen de prédiction de retrait et de fluage du béton
CP	Ciment Portland
CPA CEM I 42.5	Ciment Portland ordinaire de Classe 42,5
C-S-H	Silicate de Calcium Hydraté
CV	Cendre Volante
E	Dosage en Eau
E/C	Eau/Ciment
E/L	Eau/Liant
E_{28}	Module d'élasticité à 28 jours
F_{CEB}	Erreur quadratique moyenne
Fs	Fumé de Silice
f_{c28}	Résistance en Compression à 28 jours
G	Gravier
GL	Dernière Version du modèle Gardner et Lokman
g/c	Gravier/Ciment
g/s	Gravier/Sable
KOH	Hydroxyde de Potassium
LGHF	Laitier granulé de haut fourneau
LHF	Laitier de haut fourneau
MF	Médaflow (superplastifiant)
MK	Métakaoulin

MP	Médaplast (superplastifiant)
NAOH	Hydroxyde de Sodium
NF EN	Norme Européen
NU-ITI	Northwestern University - Infrastructure Technology Institute
P	Pâte de ciment
P_l	Pression dans l'eau
P_g	Pression dans la phase gazeuse
PCE	Polycarboxylate à base d'éther
PH	Potentiel hydrogène
PN	Pozzolane naturelle
PNS	Polynaphtalène sulfonate
RH	Humidité relative
RN	Ciment à prise normale
ρ_c	Densité du ciment
RS	Ciment à prise rapide ou de haute résistance
S	Sable
S(%)	Sensibilité en pourcentage
SL	Ciment à prise lente
SP	Superplastifiant
SRA	Réducteur de retrait
SSD	Surface séchée saturée
T	Température
V	Vitesse d'impulsion d'onde sonore
V_p	Volume de pâte, (m ³).

INTRODUCTION

La modélisation est la technique de simplification qui permet aux ingénieurs de prévoir le comportement de ce qui est trop complexe pour être mieux appréhendé. Or les ouvrages en génie civil ont un comportement complexe. Cela est dû essentiellement au fait qu'ils sont ancrés dans le milieu naturel. Ils y sont bien sûr par leurs fondations dans le sol mais aussi par les actions qu'ils subissent (eau, vent, séisme, etc.) et par les matériaux qui les constituent. La complexité de leur comportement vient encore de leur grande durée de vie et ne peut par conséquent s'analyser hors du temps.

L'objectif des calculs numériques reste tributaire à une connaissance précise des lois du comportement des matériaux utilisés. De nos jours, les bétons ne sont plus fabriqués seulement avec des granulats, du ciment Portland et de l'eau ; ils incorporent très souvent, si ce n'est pas toujours, au moins l'un des produits suivants : adjuvants organiques, additions minérales, fibres et c'est ce qui rend le comportement du matériau béton plus complexe.

Le fonctionnement mécanique d'une structure en béton évolue avec l'initiation des déformations du matériau au cours du temps. Au jeune âge, les déformations sont issues des caractéristiques du béton, des conditions d'exposition et de l'histoire des étapes de construction. A long terme, les déformations différées sont prépondérantes avec les conditions environnementales et l'état de contrainte dans l'élément. A l'échelle du laboratoire comme à celle de l'ouvrage, les déformations différées peuvent s'accompagner d'une réduction des caractéristiques mécaniques et d'une propagation de microfissures. Ces dernières sont révélatrices du début de l'endommagement du matériau.

L'absence de considération des déformations différées du béton peut provoquer par la suite des pertes différées et une redistribution des contraintes et la fissuration. La mauvaise estimation de ces pertes a été dans le passé la source de

désordres graves dans certains ponts en béton précontraint. De nombreux modèles ont été proposés pour déterminer l'amplitude des déformations différées. Le principe de modélisation varie suivant le comportement considéré du matériau. Actuellement il n'existe pas un modèle complet qui tient compte de tous les mécanismes qui expliquent ces déformations.

L'objectif de la présente étude consiste à développer un nouveau modèle de prédiction de retrait de séchage du béton de résistance normale. Les mécanismes moteurs à l'origine des déformations des matrices cimentaires font appel à plusieurs disciplines (chimie, physique, mécanique) et interviennent à différentes échelles du matériau (échelles de l'hydrate, de l'éprouvette, de la structure). Au regard de cette complexité, nous proposons un modèle empirique qui se base sur les résultats des essais expérimentaux de plusieurs chercheurs.

Cette thèse s'articule autour de trois parties différentes ; analyse bibliographique, étude numérique et étude expérimentale présentées sous forme de chapitres.

Le premier chapitre est consacré à l'analyse bibliographique sur le comportement différé du béton. Il constitue une revue concernant les caractéristiques de la pâte de ciment ainsi que le processus d'hydratation, le séchage et les mécanismes de transfert d'humidité. Les déformations différées prennent la grande partie où nous citons les différents types de retrait et de fluage et les différents mécanismes réels et apparents (les facteurs) causants ces déformations. Afin d'évaluer la précision du modèle proposé, quatre modèles de prédiction de retrait et de fluage du béton sont choisis : (CEB-90, B3-2000, ACI-92, GL-2000). Sont présentés et discutés.

Le deuxième chapitre présente le cœur de notre travail où nous exposons en détail les différentes étapes de constitution du modèle proposé pour estimer la déformation du retrait de séchage (dessiccation).

Le troisième chapitre a pour objet d'évaluer la performance et la précision du modèle proposé sur la base d'une analyse de la sensibilité du modèle à certains paramètres (analyse paramétrique), et d'une analyse statistique. Les deux analyses

sont accompagnées d'une comparaison de la précision du modèle avec d'autres modèles et avec les résultats expérimentaux tirés de la base de données NU-ITI.

Le quatrième chapitre porte sur l'étude expérimentale de l'effet des superplastifiants sur le retrait de séchage. Nous présentons tout d'abord les différents essais réalisés ainsi que les matériaux utilisés. Puis nous exposons les différents résultats obtenus. Les mesures des déformations de retrait sont effectuées axialement et superficiellement pour étudier la déformation du cœur et de la peau du béton. Cette étude expérimentale est destinée à discerner la possibilité d'appliquer le modèle proposé sur le béton de faible rapport E/C contenant des superplastifiants. Cette étape de validation représente la dernière partie de ce chapitre.

A la fin, nous terminons ce travail par une conclusion générale dans laquelle nous rappelons le but de cette étude, les principaux résultats obtenus, les conclusions tirées, et quelques recommandations proposées pour les futurs travaux.

CHAPITRE 1

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE :

COMPORTEMENT DES MATERIAUX A MATRICE CIMENTAIRE

1.1. Introduction

Le béton présente l'un des systèmes les plus complexes parmi les matériaux manufacturés. En particulier, bien que la structure de la matrice pâte de ciment soit macroscopiquement uniforme, la composition chimique, la structure cristalline et la morphologie des phases solides sont très diverses à l'intérieur d'une même pâte et sont très sensibles aux conditions d'hydratation et de conservation. La phase solide de la pâte de ciment est formée de grains de ciment plus ou moins bien hydratés, le gel silicate de calcium hydraté (C-S-H) (au moins 50%), et contient aussi des cristaux plus grossiers tels que ceux de portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (presque 25%). Elle est composée aussi de pores à différentes échelles contenant de l'eau et / ou de l'air. La pâte de ciment joue d'une part le rôle de colle, qui confère au matériau béton ses propriétés de rigidité et de résistance, et d'autre part le siège des déformations différées observées sur le béton.

La première partie de ce chapitre constitue une revue concernant les caractéristiques de la pâte de ciment, le processus d'hydratation, le séchage et les mécanismes de transfert d'humidité, la porosité de la pâte durcie ainsi que la description des états de l'eau. Le retrait et le fluage prennent une part importante où nous présentons les différents types de ces deux déformations, ainsi les mécanismes réels et apparents causants ces phénomènes.

La dernière partie est consacrée à la présentation de quelques modèles de prédiction de retrait et de fluage les plus utilisés actuellement et qui sont inclus pour évaluer la précision du nouveau modèle.

1.2. Les caractéristiques de la pâte de ciment

L'ajout d'eau au mélange clinker + gypse permet d'obtenir la pâte de ciment, qui se rigidifie rapidement par le phénomène de prise. Ainsi, différents composés hydratés, tels les C-S-H, se forment au cours de l'hydratation résultant de la réaction de l'eau avec les différentes phases anhydres constitutives du mélange initial.

1.2.1 Mécanisme de l'hydratation

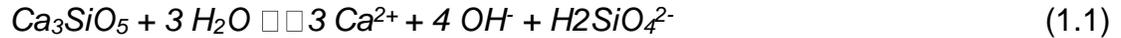
L'hydratation du ciment est un phénomène complexe. Cependant, le mécanisme le plus pertinent et toujours confirmé par les constatations expérimentales est celui décrit par Le Chatelier [1]. C'est un mécanisme de dissolution-précipitation : lorsqu'on ajoute de l'eau au ciment, les réactifs anhydres vont progressivement passer en solution. Or, ils sont plus solubles que les produits d'hydratation finaux. Ils vont donc sursaturer la solution et causer la précipitation d'hydrates. Ceci va diminuer la concentration des espèces en solution et donc permettre de nouveau un passage en solution des constituants anhydres. Le phénomène se poursuivant ainsi jusqu'à l'hydratation totale. Lorsqu'on mélange du ciment avec de l'eau, la pâte fraîche de ciment ainsi formée se présente comme un système dispersé constitué d'un réseau de particules dans une phase aqueuse. Les principaux mécanismes d'actions de l'eau sur la pâte de ciment sont les suivants :

- *L'adsorption* : fixation physique ou chimique en surface des molécules d'eau.
- *L'hydrolyse* : transformation du solide et décomposition de l'eau.
- *Dissolution/ Solvation*: rupture des liaisons ioniques dans le cristal et dispersion des ions dans le liquide qui sont rapidement hydratés.
- *Cristallisation* : elle a lieu en deux parties : la germination (ou nucléation) qui consiste à former des assemblages (germes) aléatoirement, puis la croissance des germes qui s'effectue par accumulation d'atomes ou de molécules en couches successives au niveau de l'interface liquide/solide.

1.2.1.1. Hydratation du C₃S :

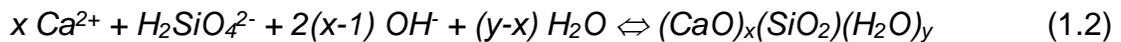
L'hydratation du C₃S procède selon trois réactions qui deviennent successivement simultanées [2]:

- La dissolution de C₃S :



Cette réaction de dissolution conduit également à d'autres espèces silicatées en solution (H_4SiO_4 et $H_3SiO_4^-$), en équilibre les unes avec les autres. Cependant, l'espèce obtenue majoritairement dans les conditions de l'hydratation est $H_2SiO_4^{2-}$.

- La précipitation de C-S-H :



- La précipitation de portlandite:



La réaction (1.1) se produit dès le contact entre le silicate tricalcique et l'eau, la réaction (1.2) se produit dès que la sursaturation maximale par rapport au C-S-H est atteinte. Enfin la réaction (1.3) a lieu une fois que la solution ait atteint sa limite de sursaturation par rapport à la portlandite. Les trois réactions se produisent alors simultanément jusqu'à épuisement des réactifs. Cependant, l'enchaînement de ces trois réactions ne peut se faire que si la fraction massique du C₃S par rapport à l'eau est suffisamment élevée [3].

1.2.1.2. Hydratation du C₃A

L'aluminate tricalcique est le composé du ciment le plus réactif avec l'eau. C'est parce que l'hydratation des aluminates est très rapide que les cimentiers ajoutent du gypse au clinker pour contrôler ces réactions. L'hydratation du C₃A s'effectue rapidement en présence d'eau pour former des phases hydratées intermédiaires (C_4AH_{19} , C_4AH_{13} , C_2AH_8). Ces phases évoluent ensuite vers une phase plus stable (C_3AH_6) à une vitesse qui dépend fortement de la température, du rapport liquide/solide d'hydratation, de la taille des grains et de la concentration en CO₂. D'une manière générale, l'hydratation du C₃A est grandement influencée par les conditions et le milieu d'hydratation. L'addition du gypse (sulfate de calcium) permet de réguler l'hydratation du C₃A et ainsi d'éviter le phénomène de prise rapide du

ciment. Après la dissolution rapide des deux composés, il se forme un trisulfoaluminate de calcium hydraté, l'étringite jusqu'à l'épuisement du gypse [2, 3].

1.2.1.3. Hydratation du C₄AF

L'hydratation des phases C₄AF est semblable à celle de C₃A lorsque les conditions d'hydratation sont identiques. La cinétique d'hydratation du férroaluminate de calcium est beaucoup plus lente que celle de l'aluminate de calcium à température ambiante et s'accélère vers 50°C. Lors de la dissolution de la phase anhydre C₄AF, l'aluminium est libéré plus facilement que le fer. Les premiers produits d'hydratation contiennent du Fe³⁺ comme de l'Al³⁺ et tendent à évoluer vers des hydrogrenats comme dans le cas de C₃A [2]. L'aluminoferrite tétracalcique (C₄AF) est nettement plus lent à réagir et n'apparaît de manière significative qu'une fois que le gypse est totalement épuisé.

1.2.2. Chronologie de l'hydratation

L'hydratation du ciment Portland implique la réaction des quatre phases minérales qui le composent. Comme le ciment est composé principalement de C₃S, c'est l'hydratation du C₃S qui contrôle la cinétique globale de l'hydratation. Il existe cependant une synergie entre les différentes réactions. L'hydratation du C₃S implique le développement des trois réactions chimiques avancées dans le mécanisme de Le Chatelier : dissolution et sursaturation, précipitation de la phase C-S-H et précipitation de la Portlandite. Le suivi du flux thermique au cours du temps par calorimétrie isotherme permet de suivre l'évolution de l'hydratation des constituants du ciment. Concrètement, on suit l'évolution de la chaleur d'hydratation en fonction du temps et on peut distinguer cinq phases successives lors de ce processus [4] (Figure 1.1).

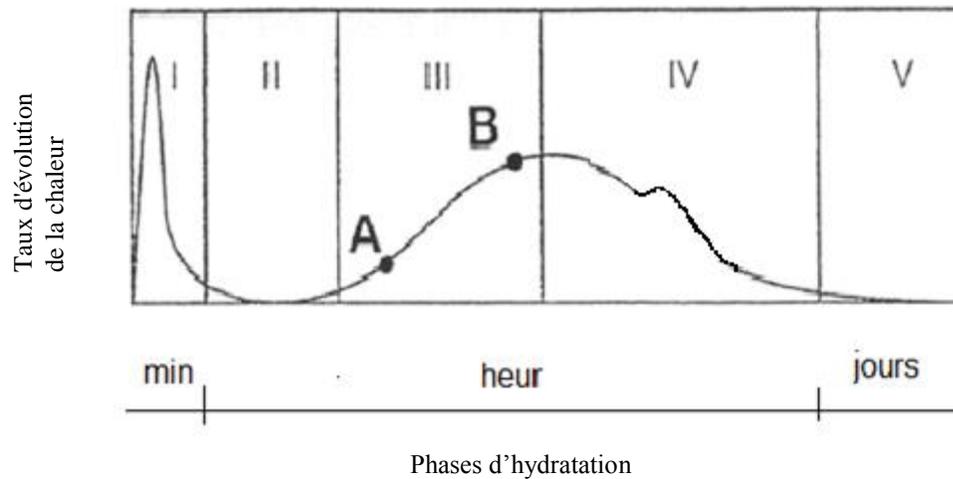


Figure 1.1 : Evolution schématique de la quantité de chaleur dégagée lors de l'hydratation [4].

La période I (période de gâchage) : au cours de laquelle s'effectue le passage en solution des ions provenant des constituants de ciment. La dissolution initiale est très rapide et exothermique (pic du flux thermique) avec libération d'ions calcium, silicates, aluminates, sulfates et alcalins (Dès les premières minutes, il se forme du C-S-H et de l'étringite).

La période II (période dormante) : La durée de cette période est de quelques heures. C'est une période d'inertie thermique (la diminution du flux thermique) causée par l'élévation rapide du pH et de la teneur en calcium de l'eau ralentit la dissolution des constituants. La dissolution du C_3S se poursuit lentement en libérant des ions calcium et des OH^- . La phase C-S-H (Figure 1.2) se forme mais malgré la forte sursaturation en chaux de la solution, la précipitation de Portlandite (CH) ne se produit pas. La période dormante correspond à la réaction des ions provenant du C_3A avec le gypse pour donner naissance à l'Étringite.



(a)

(b)

Figure 1.2 : Morphologie de (a)- CSH et de(b) la Portlandite Ca(OH)_2 [4].

La période III (période de prise) : les réactions qui entraînent la prise sont déclenchées par la précipitation de la Portlandite qui survient au bout de 5 heures et qui entraîne la dissolution de tous les constituants du ciment anhydre. L'accélération des réactions est visible dans la courbe d'évolution du flux thermique et conduit à la précipitation de l'Ettringite, de la Portlandite et des C-S-H.

La période IV (période de durcissement) se traduit par une lente diminution du flux thermique et par un ralentissement de l'hydratation. Lors de cette période, des grains se recouvrent par une couche d'hydrates de plus en plus épaisse. L'épuisement du gypse, visible avec la chute de la concentration en sulfate, déclenche un pic dans la courbe du flux thermique. La formation du monosulfoaluminate par réaction de l'Ettringite (Figure 1.3) avec l'excès d'aluminate est très exothermique et rapide, d'où la présence de ce pic. Les alcalins contenus dans le réseau cristallin de C_3A sont alors libérés dans la phase aqueuse. La précipitation des hydrates intervient essentiellement au cours des périodes d'accélération et de décélération. Les hydrates formés au cours de ces deux périodes sont morphologiquement distincts. Au cours de la phase d'accélération, les produits externes précipitent dans l'espace intergrain, initialement occupé par l'eau de gâchage. La structuration de la pâte et le développement ont lieu essentiellement au cours de ces deux périodes. La présence de C_3A n'est pas indispensable à la prise, mais celui-ci accélère le durcissement de la pâte en augmentant la chaleur et donc la vitesse d'hydratation des silicates de calcium.

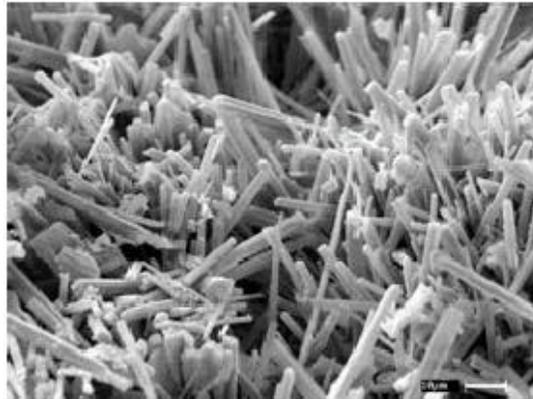


Figure 1.3 : Aiguilles d'Ettringite [4].

La période V (période de ralentissement ou diffusion) : se manifeste pendant plusieurs mois, voire plusieurs années après la prise. La porosité du matériau décroît de façon continue et le réseau de produits hydratés devient de plus en plus dense. La structure du matériau elle-même évolue par "recristallisation" et polymérisation des produits précédemment formés. De plus cette dernière période fait suite à l'épuisement du monosulfoaluminate et à la formation d'aluminate hydraté. Les hydrates continuent de se former dans les pores capillaires, s'enrichissent en alcalins, et par le jeu de l'équilibre de solubilité de la portlandite, deviennent de plus en plus pauvres en calcium. Au bout de 30 jours, les hydrates ne contiennent quasiment plus que du NaOH et KOH. Ainsi, la partie solide de la matrice est caractérisée par un réseau poreux de grains de ciment, liés par des aiguilles de silicates de calcium [2].

L'évolution en fonction du temps de la microstructure est illustrée, dans le cas d'un mortier à faible rapport E/C, dans la Figure 1.4, tirées des travaux de Vernet [5]. Les cinq figures représentent les cinq étapes présentées sur la courbe calorimétrique.

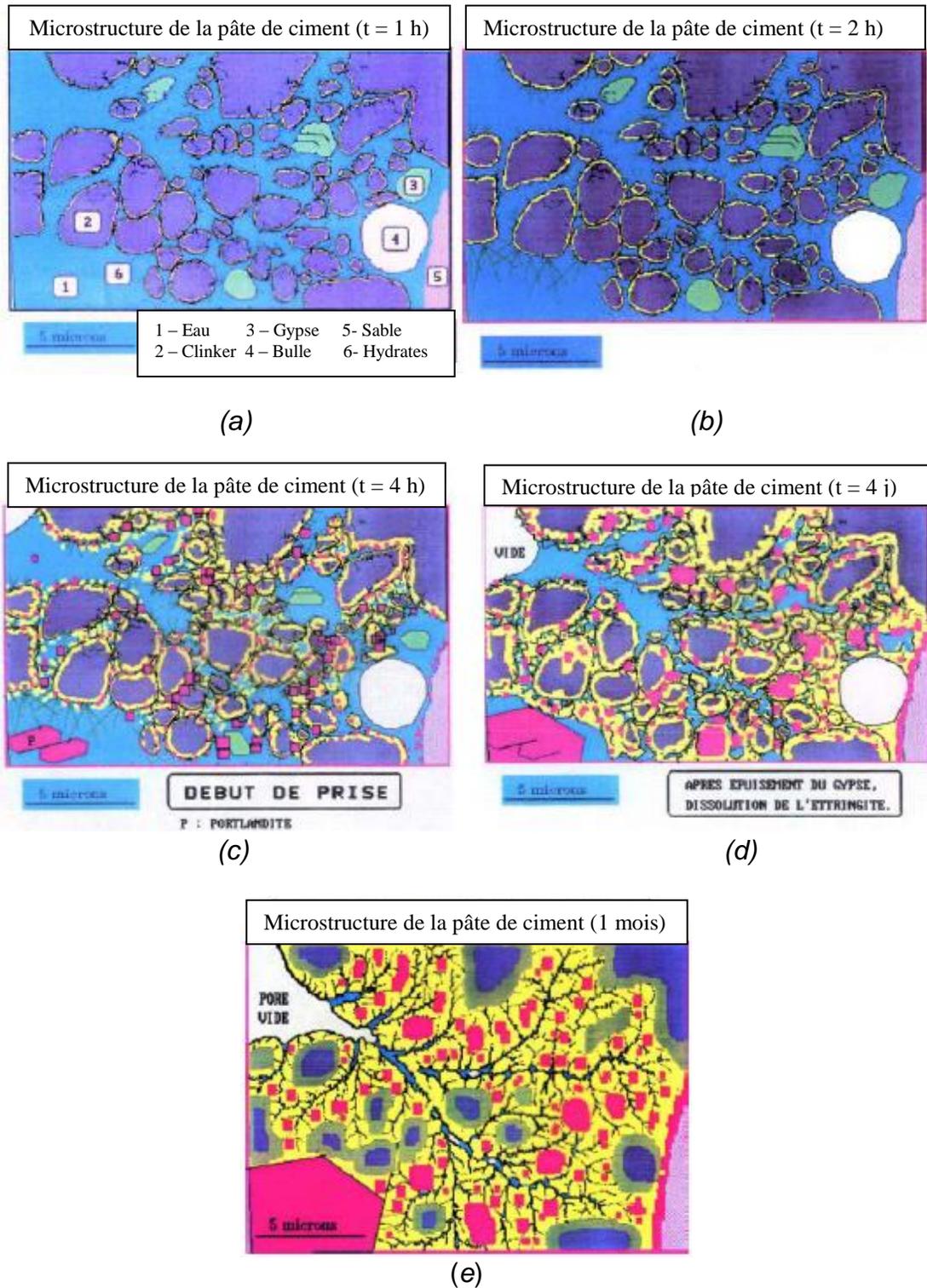


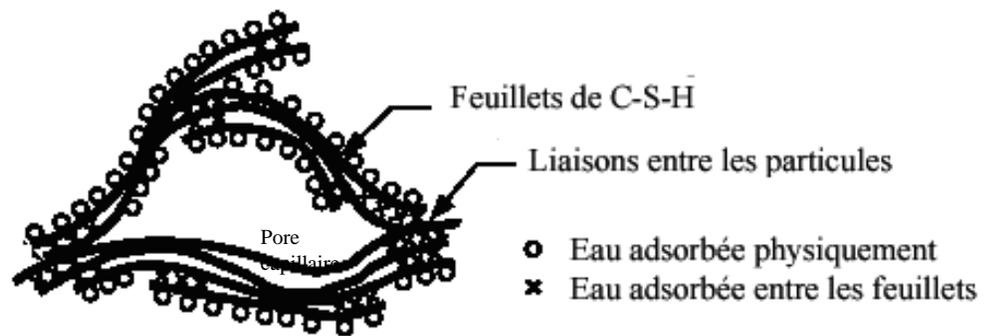
Figure 1.4 : Morphologie de la pâte de ciment au cours d'hydratation [5].
a- début du gâchage, b- période dormante, c- prise, d- durcissement, e- ralentissement

1.2.3. Structure et morphologie du gel (C-S-H):

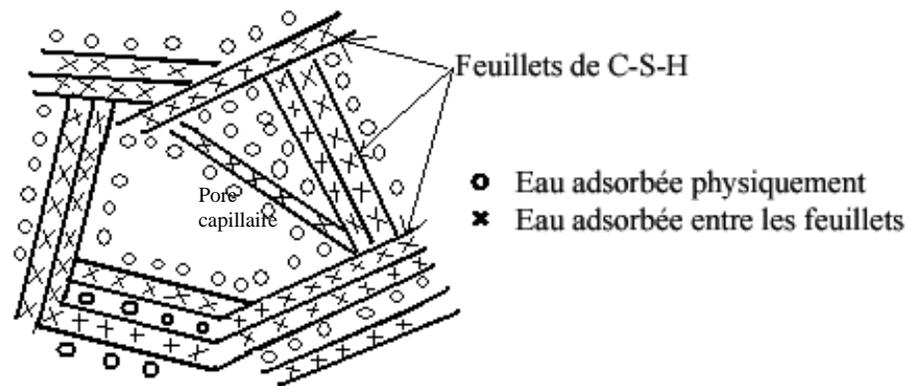
La pâte de ciment hydratée ordinaire contient 50 à 70 % de C-S-H et 25 à 27 % de Ca(OH)_2 . La phase C-S-H est donc la phase majoritaire dont dépend l'évolution des caractères physiques et plus particulièrement les propriétés mécaniques du matériau. Les silicates de calcium hydraté (C-S-H) sont des corps mal définis (en ce qui concerne la composition chimique et la structure cristalline) et mal cristallisés du fait de la germination rapide de ces hydrates. Il est souvent appelé gel, ce terme indiquant le faible degré de cristallinité et le gorgé d'eau dans ces composés [6].

Les C-S-H sont des matériaux de grande surface spécifique, fortement divisés et possédant des pores de taille très fine. La structure moléculaire des C-S-H consiste en feuillets de taille égale à 5 nm dans le sens de l'empilement des feuillets (correspondant approximativement à 4 feuillets). Puisque la structure de gel C-S-H n'est pas complètement élucidée, de nombreux modèles, bâtis sur les connaissances dont on dispose, en particulier sur des constatations expérimentales indirectes, ont donc été proposés. La Figure 1.5 représente les principaux modèles actuellement acceptés (le modèle de Feldman-Sereda, le modèle de Powers, et le modèle de Wittmann) [7-9].

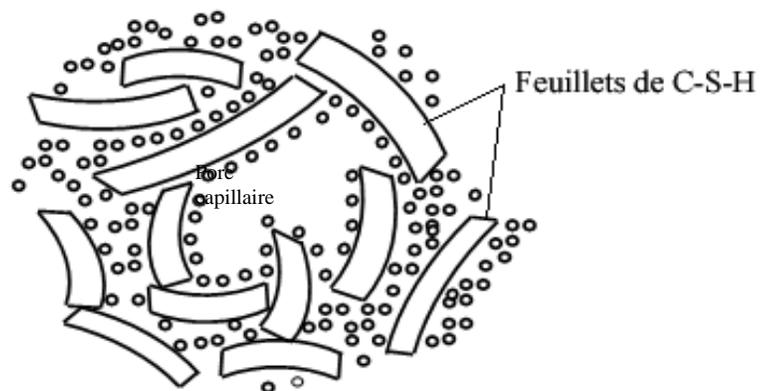
Il existe dans les C-S-H en plus de l'eau de structure, deux types d'eau adsorbée. Le premier est l'eau chimiquement liée au solide, principalement contenue dans l'espace interfeuille. Le deuxième est l'eau qui se trouve incluse dans les pores du matériau. Cependant, il est difficile d'établir une nette distinction entre l'interfeuille et les micropores, du fait de leur taille très voisine. En effet, la teneur en eau retenue par le solide à un taux d'humidité donné dépend de l'histoire du séchage de l'échantillon et de la vitesse à laquelle l'eau a été éliminée. A l'heure actuelle, aucune méthode n'a pas pu être définie pour accéder à la teneur exacte des divers types d'eau, qui sont difficilement différenciables, quelle que soit la technique d'évaporation utilisée [10].



(a)



(b)



(c)

Figure 1.5 : Représentation schématique de la microstructure du gel de C-S-H selon les modèles :

(a) Feldman-Sereda , (b) Powers-Brunauer, (c)Wittmann [7-9].

1.2.4. Les pores de la pâte de ciment

Les propriétés d'un matériau sont fortement influencées par la porosité, en particulier à cause de l'interaction surface minérale/phase liquide interstitielle susceptible d'être présente dans les pores. Les pores présents dans le matériau durci ayant une géométrie complexe et des dimensions très variables. Les pores de taille très fine situés dans le gel C-S-H. A échelle supérieure il existe des pores inter-grains résiduels que l'on a coutume d'appeler capillaires. 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 [6, 11].

1.3. Le séchage

L'exposition d'une structure en béton à une humidité relative environnante inférieure à celle régnant au sein du matériau est à l'origine d'un déséquilibre hygrométrique. Ce déséquilibre se traduit par un mouvement de l'eau de l'intérieur du matériau vers l'extérieur, conduisant au séchage de ce dernier. La prise en compte du transport de l'eau au sein du béton est d'une grande importance pour les matériaux à matrice cimentaire. En effet, la teneur en eau affecte considérablement l'évolution des déformations de retrait et de fluage. En outre, le séchage s'accompagne généralement d'effets structuraux, du fait du gradient de déformations induit. Ainsi, la connaissance des mécanismes du séchage est primordiale. Avant de parler des mécanismes de séchage, il est important de connaître l'état de l'eau dans le matériau, et surtout dans la pâte de ciment durcie.

1.3.1. L'eau dans la pâte de ciment

L'eau joue un rôle essentiel dans le comportement du matériau durci, non seulement sur le plan mécanique, mais aussi sur celui de la durabilité. L'eau est généralement classifiée selon la nature de sa liaison avec la pâte de ciment hydratée [6] :

- L'eau libre : elle est constituée de la phase condensée qui n'est pas soumise aux forces d'attraction des surfaces solides. Elle se trouve principalement dans les pores capillaires et les macropores.

- L'eau capillaire : elle est constituée de la phase condensée remplissant (condensation) le volume poreux au-delà de la couche adsorbée et séparée de la phase gazeuse par des ménisques.
- L'eau chimiquement liée : elle réagit chimiquement avec le ciment pour former un nouveau produit, comme le C-S-H ou l'ettringite.
- L'eau adsorbée : elle est adsorbée sur les surfaces solides des pores sous l'action des forces intermoléculaires de Van Der Waals. Cette eau est soumise à des champs de forces superficielles du solide. Ces forces décroissent lorsqu'on s'éloigne de la paroi solide.

Donc l'eau présente dans la pâte sous différents états. Dans ce cas il est intéressant de distinguer entre l'eau évaporable et l'eau non évaporable ;

- l'eau évaporable comprend l'eau capillaire et l'eau adsorbée la moins liée.
- l'eau non évaporable comprend l'eau adsorbée la plus liée, l'eau inter-feuillet et l'eau chimiquement liée.

1.3.2. Mécanismes du séchage

Le séchage fait intervenir de multiples mécanismes complexes. Les phénomènes de perméation, diffusion, adsorption-désorption, condensation-évaporation sont en effet mis en jeu dans la pâte de ciment qui se produisent de façon plus ou moins couplés [12].

Selon Baroghel Bouny [6] les processus de transport dépendent de l'humidité relative (Figure 1.6);

- **A hautes valeurs d'humidité relative** : c'est le cas de saturation : tout le réseau est rempli d'eau liquide. Dès que les pores en surface ne sont plus saturés sous l'effet de l'auto-dessiccation (consommation d'eau par la réaction d'hydratation), un écoulement capillaire se crée depuis l'intérieur vers l'extérieur du système poreux.

Au tout début du séchage, tant que la phase capillaire reste continue et que la perméabilité à l'eau liquide est encore relativement forte, c'est le transfert en phase liquide, provoqué par des forces capillaires, qui est prépondérant ; c'est la pression capillaire qui gouverne les mouvements d'eau.

- **A valeurs intermédiaires d'humidité relative** : c'est le domaine où il y a coexistence de la phase gazeuses et de la phase liquide. Au fur et à mesure que l'humidité relative décroît, les pores se vident et les filets d'eau liquide se rompent : on assiste alors à un phénomène d'évaporation donc à un transfert diffusionnel de l'humidité. L'eau capillaire est présente dans le réseau (elle remplit uniquement les pores les plus fins), mais ne forme pas une phase continue dans le milieu. En pareil cas, il ne peut y avoir de mouvement d'eau dans ces îlots capillaires que par suite d'un échange par évaporation-condensation, avec la phase gazeuse, de part et d'autre des ménisques.
- **A faibles valeurs d'humidité relative** : le transfert en phase gazeuse est dominant. Un film liquide de quelques molécules d'épaisseur est adsorbé sur la surface solide. En plus de la diffusion gazeuse, on va donc avoir une migration des molécules d'eau du film (appelée diffusion surfacique). Pour des valeurs d'humidité relative les plus basses, lorsque l'eau condensée n'est pratiquement plus présente, le seul transfert possible est une diffusion gazeuse.

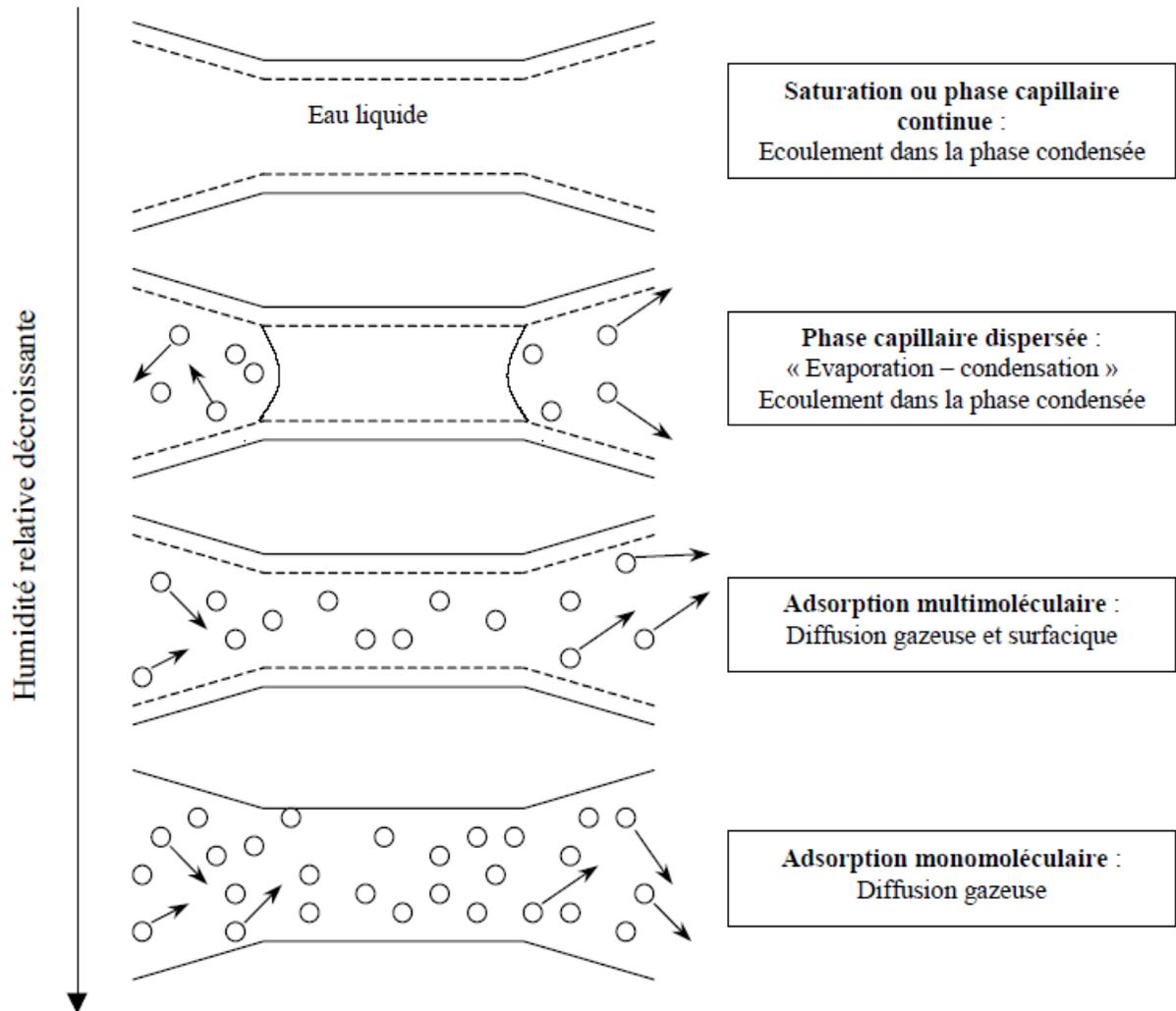


Figure 1.6: Illustration des quatre types de transfert d'humidité possible suivant l'humidité de l'air ambiant (D'après Baroghel) [6].

1.3.3. Effets du séchage sur les propriétés mécaniques

Le séchage naturel du béton a des conséquences importantes sur le comportement mécanique des structures et sur leur durabilité. Il est source des déformations différées (retrait et fluage de dessiccation) et de la modification des caractéristiques physiques et mécaniques qui résultent des variations de teneur en eau, ce qui induit à un effet de structure (effet d'échelle pour retrait et fluage de dessiccation, et fissuration due au retrait)

Une partie importante des microfissures est induite par le séchage qui peut être à l'origine de la dégradation des propriétés mécaniques du béton (résistance, module d'Young), bien que l'effet de séchage semble contradictoire d'un auteur à l'autre. Okjima *et al* [13] ont observé une augmentation de 38% de la résistance en compression des éprouvettes en mortier de rapport E/C = 0,65 lorsque l'humidité relative diminue de 100% à 0%. Dantec et Terme [14] obtiennent une augmentation progressive de 22% de la résistance lorsque l'humidité relative diminue à 60%. Neville [15] a observé que les résistances en compression déterminées aux âges 28, 56 et 84 jours sur des éprouvettes de béton séchées de rapport E/C = 0.5 sont toujours supérieures à celles mesurées sur des éprouvettes conservées dans l'eau. La même constatation a été faite par Burlion *et al* [16], qui ont trouvé une augmentation de 20% de la résistance d'un béton de rapport E/C = 0,63 et de période de séchage de 70 jours par rapport au même béton conservé pendant 28 jours à une humidité relative égale à 100% puis séché pendant 70 jours (Figure 1.7).

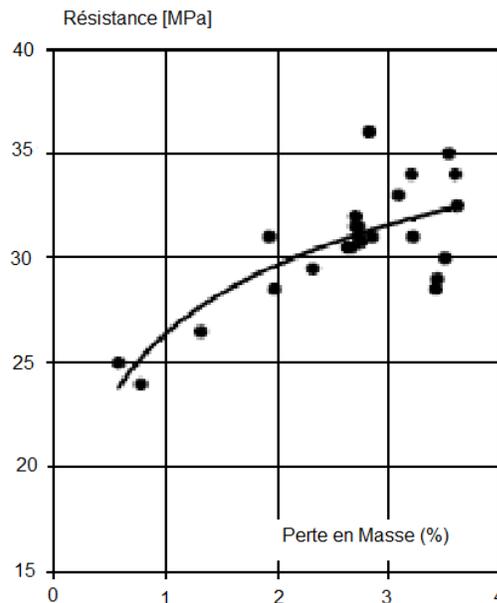


Figure 1.7: Evolution de la résistance en compression du béton en fonction de la perte en masse [16].

Yurtdas *et al* [17] ont aussi remarqué une augmentation de la résistance d'environ 21% sur le mortier de rapport E/C = 0.5, et 32% sur le mortier de rapport E/C = 0,8. Pour ce dernier, la résistance diminue à la fin de la dessiccation.

A l'inverse des résultats précédents, une faible diminution de la résistance en compression est mesurée par d'autres auteurs. Pihlajavaara [18] et Torrenti [19] ont trouvé une baisse de la résistance en compression de 6% pour le mortier et 11% pour le béton lorsque HR diminue de 100% à 50%, suivie d'une augmentation progressive de la résistance en compression jusqu'à une humidité relative de 0 %.

Kanna *et al* [20] ont observé une forte diminution du module de Young lorsque l'humidité relative décroît. D'après les résultats de Burlion *et al* [16], le module de Young initial et le coefficient de Poisson initial des éprouvettes soumises à la dessiccation sont bornés par une limite supérieure (celle des éprouvettes humides) et une limite inférieure (celle des éprouvettes sèches). A l'intérieur de ces bornes, le module de Young des éprouvettes mises en dessiccation reste quasiment constant, et ensuite diminue linéairement jusqu'à la limite de diminution de 20% atteinte sur les éprouvettes séchées au four. D'autre part, le coefficient de Poisson initial des éprouvettes de mortier reste constant dans un premier temps et diminue de 20% par la suite, de manière analogue à celle du module de Young. Ces résultats expérimentaux qui montrent l'évolution des modules de Young et des coefficients de Poisson en fonction de la perte en poids des éprouvettes prismatique de mortier au cours du séchage sont présentés sur les Figures 1.8 et 1.9 respectivement.

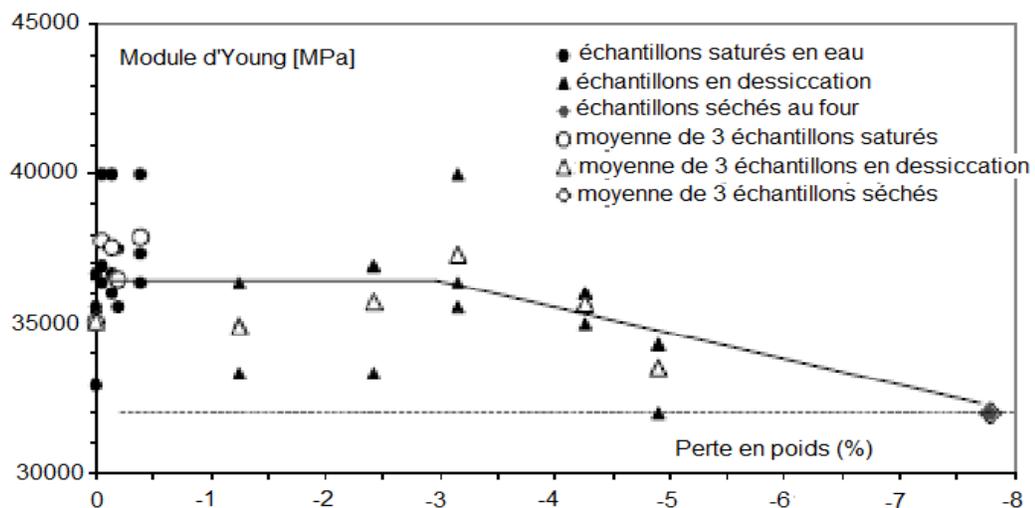


Figure 1.8 : Evolution du module d'élasticité initial en fonction de la perte en poids d'un mortier [16].

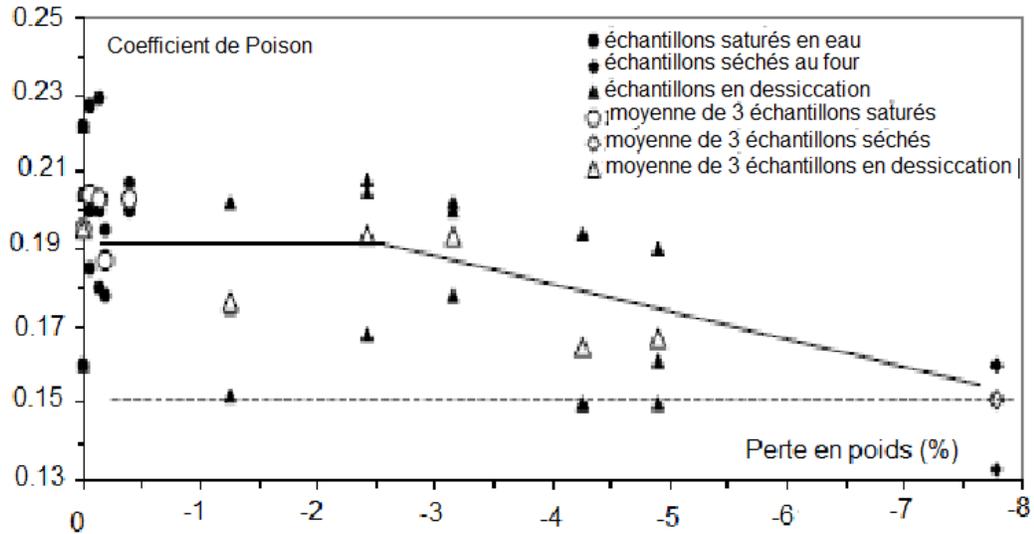


Figure 1.9 : Evolution du coefficient de Poisson initial en fonction de la perte en poids du mortier normal [16].

Brooks et Neville [15] ont observé une diminution de 8% du module d'élasticité lorsque la période de séchage augmente de 28 jours à 56 jours. Une diminution de 32% a été observée par Toutlemonde [21] entre les bétons émergés dans l'eau et les bétons mis en dessiccation. Okjima *et al* [13] ont trouvé une diminution de 9% à 20% sur le mortier lorsque l'humidité diminue de 20% à 0%, alors que Torrenti [19] a trouvé une augmentation de 15% du module de Young lorsque HR diminue de 100% à 50% et une augmentation de 10% lorsque HR atteint 0%.

L'augmentation de la résistance des matériaux à matrice cimentaire peut être attribuée à deux phénomènes concomitants : le premier est l'effet de la succion capillaire. Celle-ci provoque une mise en compression du squelette solide, ce qui conduit à une « précontrainte » du matériau qui devient plus résistant. Il y aura donc augmentation de la résistance à la compression, même sans gradient hydrique. Le second phénomène est lié aux gradients hydriques qui se créent dans l'éprouvette au cours de la dessiccation : les bords de l'éprouvette se contractent sur le cœur de celle-ci, ce qui provoque une microfissuration. Enfin, l'évolution de l'endommagement mécanique est influencée par la dessiccation: plus le matériau sèche, plus il existe de microfissurations d'origine hydrique et plus l'initiation et la propagation de fissures d'origine mécanique sont facilitées. La taille du granulats influe sur le comportement

mécanique des matériaux à matrice cimentaire : plus le diamètre du plus gros granulats est grand, plus la microfissuration induite par le séchage est importante, et la perte du module d'élasticité est grande [16].

1.4. Retrait du béton

Le retrait total des mortiers ou des bétons est la somme de plusieurs types de retrait. Au cours de la phase plastique, le béton subit une première contraction volumique (*retrait plastique*). Après la prise, le béton, qui est devenu un solide poreux, va encore subir trois formes de retrait : *Le retrait thermique*, *le retrait endogène* et *le retrait de séchage (dessiccation)*. Un retrait supplémentaire appelé retrait de carbonatation est à prendre en considération lorsque les éprouvettes sont conservées pour de très longues périodes dans un environnement contenant un fort taux de CO₂. Dans cette partie du chapitre nous résumons les différents types de retrait par ordre chronologique d'apparition.

1.4.1. Retrait plastique

Le retrait plastique est une déformation qui se produit avant durcissement. Il est principalement influencé par l'évaporation qui dépend des conditions environnementales telles que l'humidité relative de l'environnement, la température, la vitesse du vent.

A l'état frais, le béton connaît une contraction de son volume désignée de manière générale par le retrait plastique qui est susceptible de le faire fissurer. Juste après le coulage, les grains de ciment et l'air entraîné sont en suspension dans l'eau (Figure 1.10 (a)). Sous l'effet de la gravité, les particules solides sédimentent, alors que les bulles d'air remontent ; la pâte se compacte (Figure 1.10 (b)). Au cours de cette consolidation, l'eau est contrainte de percoler vers la surface ; il se forme alors une couche d'eau appelée eau de ressuage (Figure 1.10-c) [22].

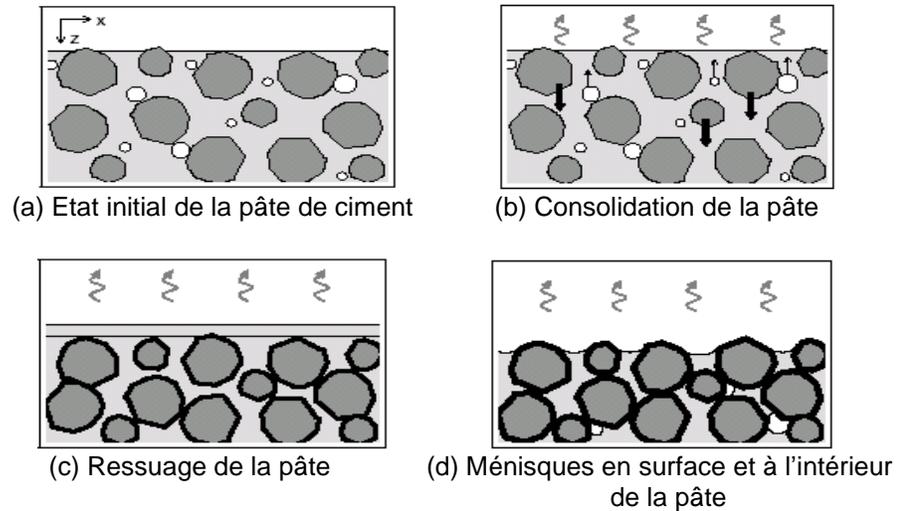


Figure 1.10 : Schématisation des mécanismes du retrait plastique d'une pâte de ciment [22].

Dès la mise en contact de l'eau et du ciment les réactions d'hydratation commencent. Les hydrates sont produits en périphérie des grains de ciment. Leur volume est inférieur à celui des réactifs (eau + ciment). Il se produit donc une diminution de volume appelée retrait chimique ou contraction de Le Chatelier [1]. Une autre composante s'ajoute à la diminution de volume : le départ de l'eau due à l'évaporation. Au total, la contraction provoque un mouvement vers le bas de la surface de la pâte que nous nommons « tassement ». La déformation de retrait apparaît dès que la surface exposée est exempte d'eau de ressuage. En atmosphère calme, le début de la période de retrait plastique coïncide avec le début de prise qui est aussi la fin de ressuage. Ce retrait est d'autant plus important pour les éléments présentant un rapport surface / volume important, de prise lente et dans le cas de forte dessiccation.

1.4.2. Retrait thermique

Le retrait thermique est directement lié à l'élévation de température du matériau et à la valeur du coefficient de dilatation thermique. La chaleur occasionnée par la réaction d'hydratation est comprise entre environ 150 et 350J/g de ciment [23]. L'exothermie engendre une élévation de la température par rapport à la température initiale, cette élévation peut atteindre 50°C et plus en condition adiabatique. Dans les structures massives la dissipation de la chaleur dégagée est relativement lente à

cause de la faible conductivité thermique du béton (de l'ordre de 2 W/m/K) [23], alors que la peau du béton qui est en contact avec l'atmosphère se refroidit plus rapidement, ce qui provoque des gradients thermiques qui sont à l'origine de retrait thermique différentiels qui génèrent des contraintes internes importantes. Le retrait du béton de peau, gêné par le béton à cœur comprimé, induit des contraintes de traction pouvant dépasser largement la résistance à la traction. Par conséquent, des fissures de retrait empêché et/ou une microfissuration de peau peuvent se créer. D'après Le Roy [24], pour les pièces libres de se déformer, le retrait thermique provoque des fissurations de peau par retrait empêché, dès que les épaisseurs dépassent quelques dizaines de décimètres.

L'amplitude de retrait thermique dépend de la composition et la finesse de ciment (liant), et le rapport de la masse d'eau à la masse de liant. L'augmentation de la quantité de ciment augmente la quantité de chaleur dégagée qui augmente aussi avec la quantité des phases plus exothermiques du ciment (C_3A et C_3S). L'hydratation de C_3A conduit à un dégagement d'environ 750j/g, tandis que l'hydratation de C_3S conduit à environ 500j/g. L'accroissement de la finesse augmente et accélère le taux d'hydratation ce qui conduit également à l'augmentation du dégagement de chaleur.

1.4.3. Retrait endogène

Ce retrait est appelé aussi retrait d'auto-dessiccation ou retrait d'hydratation. C'est la cause de la variation négative du volume absolu du matériau qui apparaît lors de l'hydratation. La réaction d'hydratation du ciment avec l'eau est l'ensemble des réactions chimiques qui engendrent une variation de volume au sein de la pâte du ciment durcie [1]. La valeur de cette déformation se situe à environ 8 à 12 % et par la suite elle est freinée par les hydrates. Cependant, la réaction chimique se poursuit pendant très longtemps, créant ainsi une dépression dans l'eau interstitielle des pores capillaires qui provoque un changement de phase liquide-vapeur et conduit ainsi à une auto-dessiccation de la matrice cimentaire [25]. Avec l'avancement de l'hydratation, il y a apparition d'un réseau gazeux (vapeur) connecté dans les pores. La concomitance de ce réseau gazeux (vapeur) avec la phase liquide amène la création d'interfaces liquide/gaz et donc l'apparition de tensions capillaires. Celles-ci

doivent être équilibrées par une contraction de la matrice cimentaire qui se traduit à l'échelle macroscopique par un retrait endogène. Plus le diamètre des pores est petit, plus les tensions capillaires sont importantes. Cela conduit à une auto-dessiccation et donc à un retrait endogène plus important. Cette auto-dessiccation de la pâte de ciment est un phénomène en principe homogène qui ne génère donc pas de gradient de déformation au sein du matériau. Il s'agit d'un phénomène intrinsèque au matériau qui est fortement dépendant de sa formulation [26]. Il est à noter que la réaction d'hydratation dépend de l'humidité relative, elle s'arrête si l'humidité relative interne descend en dessous de 70-80 % environ [27].

Le retrait endogène agit de manière homogène au sein du matériau ; s'il est empêché dans une direction (poutre ancrée à deux extrémités par exemple), il produira des contraintes de traction uniformes dans la section perpendiculaire au déplacement empêché. Une fissuration pourra se produire et affectera toute la section si la déformation de retrait endogène provoque des contraintes de traction qui dépassent la résistance à la traction. En plus les microfissures engendrées par le retrait endogène augmentent la vitesse de séchage après le démoulage du béton, ce qui augmente le retrait de séchage.

1.4.4. Retrait de dessiccation

La déformation de retrait de dessiccation est la réponse mécanique d'un matériau soumis au séchage. Le retrait de dessiccation est provoqué par un départ de l'eau libre du béton lorsqu'il est mis au contact avec un milieu dont l'humidité relative est inférieure à celle du matériau. Du fait de la faible perméabilité du matériau, un retrait de dessiccation différentiel est provoqué par le gradient hydrique existant entre l'intérieur et la surface de la pièce du au séchage.

Le départ de l'eau présente initialement dans les pores du béton induit une déformation du squelette solide. Les expériences de retrait de dessiccation montrent que la distribution des pores et les caractéristiques du gel C-S-H ont une influence prépondérante sur la déformation du retrait de dessiccation [23]. Les résultats des essais de retrait déterminés par rétractomètre (rapprochement des extrémités) et un extensomètre (mesure en surface) en fonction de la perte de masse illustrés sur la

Figure 1.11 mettent en évidence de trois phases caractéristiques du retrait de séchage [16, 17] :

- La première phase correspond à une perte de poids due à l'évaporation rapide de l'eau en surface de l'éprouvette couplée à une microfissuration induite par la dessiccation qui s'oppose à la contraction et par conséquent le retrait est faible.
- Dans la deuxième phase, le retrait de dessiccation est linéaire en fonction de la perte en poids : ceci est provoqué par la contraction du squelette solide par la dépression capillaire [28], la variation de l'énergie de surface [29] et la variation de pression de disjonctive [30].
- La dernière phase présente l'évolution de la perte en poids sans retrait supplémentaire. Cette dernière phase peut s'expliquer soit par le fait que la contraction de la matrice cimentaire devient infime par épuisement de l'eau évaporable, soit par un comportement non linéaire du retrait de dessiccation en fonction de la perte d'eau, soit par un comportement mécanique non linéaire de la matrice cimentaire [30].

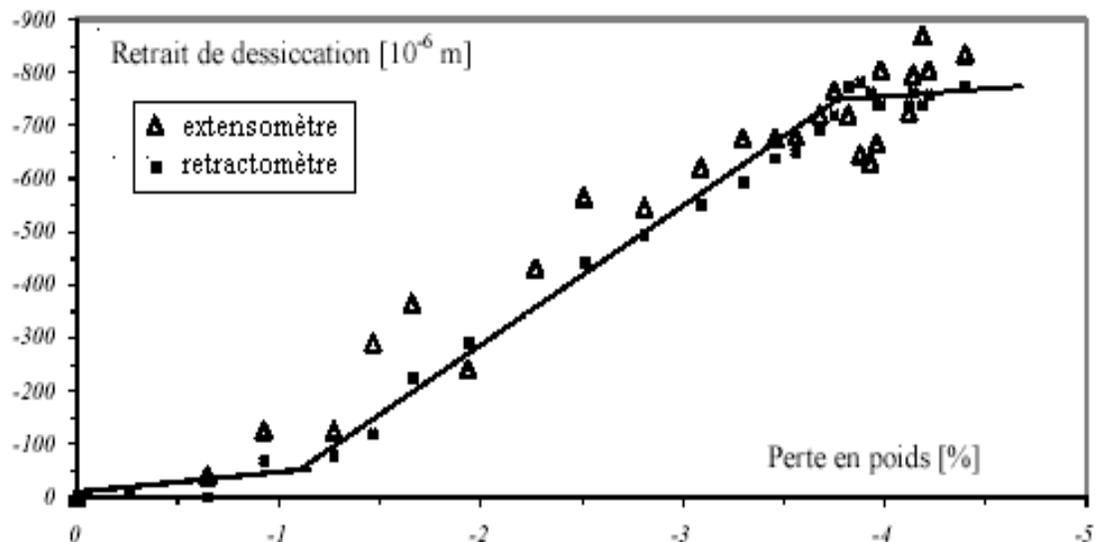


Figure 1.11 : Evolution du retrait de dessiccation en fonction de la perte en poids du mortier [16].

Les trois principaux mécanismes proposés pour expliquer le retrait de dessiccation des matériaux cimentaires sont [6, 11, 30]:

- La pression capillaire : Elle résulte de l'équilibre liquide-vapeur dans la porosité capillaire du béton. La diminution de l'humidité relative au sein du béton (du fait du séchage) induit une diminution de la pression de l'eau liquide, provoquée par la vaporisation de celle-ci. La concomitance des phases liquides (eau) et gazeuses (vapeur d'eau et air sec) entraîne la formation d'un ménisque à l'interface liquide / gaz et donc l'apparition de tension capillaire qui entraîne la contraction du squelette solide et qui provoque ainsi le retrait de dessiccation. Deux lois macroscopiques sont généralement utilisées pour décrire le phénomène : celle de Laplace (eq (1.4)) et celle de Kelvin (eq (1.5)) qui décrivent respectivement l'équilibre mécanique d'un ménisque soumis de part et d'autre à des pressions différentes et l'équilibre hygrométrique eau liquide-vapeur (Figure 1.12).

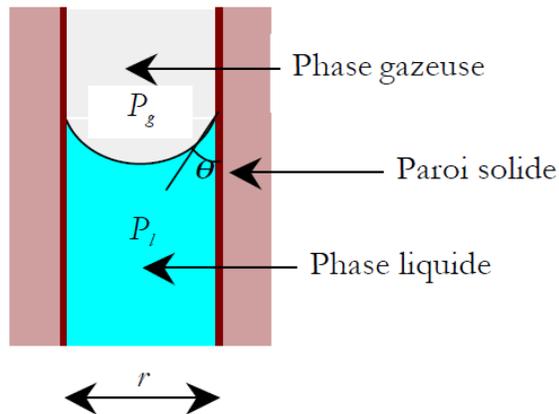


Figure 1.12 : Illustration de la pression capillaire (Schéma d'un capillaire non saturé).

Loi de Laplace :
$$P_l = P_g - \frac{2\sigma}{r} \cos \theta \quad (1.4)$$

Loi de Kelvin :
$$P_l - P_g = \frac{RT\rho_l}{M} \ln(h) \quad (1.5)$$

P_l et P_g sont les pressions dans l'eau et de la phase gazeuse respectivement (Pa) ;
 r est le rayon du pore ou le ménisque existe (m) ; θ est l'angle de mouillage (rad) ;

σ est la tension superficielle de l'interface d'eau liquide-vapeur (N/m) ; R représente la constante des gaz parfaits ($\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$) ; T est la température (K) ; M est la masse molaire de l'eau (kg/mol) ; ρ_l est la masse volumique de l'eau (kg/m^3) et h est l'humidité relative (%).

- La pression de disjonction : l'eau associée à la pression de disjonction est en équilibre avec l'humidité relative environnante. Une diminution de l'humidité relative entraîne un départ de cette eau. Il se produit alors une diminution de l'épaisseur de la couche d'eau adsorbée dans la zone d'adsorption empêchée et donc une diminution de la pression de disjonction. Il en résulte alors une déformation du squelette solide qui correspond à la déformation de retrait.
- La variation de l'énergie surfacique solide : l'énergie surfacique des particules de gel C-S-H crée des contraintes de traction en surface et des contraintes de compression au sein du solide. Lorsqu'il y a adsorption, les tensions surfaciques diminuent et s'il y a désorption, les contraintes induites augmentent, provoquant une contraction du solide et donc une déformation de retrait.

Le phénomène est traduit par la relation de Bangam ;

$$\frac{\Delta l}{l} = A (\gamma_0 - \gamma) \quad (1.6)$$

$\frac{\Delta l}{l}$ est le gonflement linéaire produit par l'adsorption d'eau sur l'interface, γ_0 et γ représentent les énergies superficielles de l'interface sans et avec eau adsorbée respectivement [J m^{-2}], A est une constante dépendant du matériau.

Selon Wittmann [31], les mécanismes du retrait du béton peuvent être subdivisés dans deux régions et il faut les considérer séparément. Dans la région de haute humidité ($h > 0.5$), le retrait est contrôlé par la pression de disjonction. Dans la région de basse humidité, le retrait est contrôlé par l'énergie de surface. Les deux mécanismes sont pratiquement indépendants. Il y a des bétons avec un retrait important dans la région de basse humidité et un retrait faible dans la région de haute humidité.

Le retrait de dessiccation se développe lentement parce qu'il dépend de la diffusion hydrique dans le béton. Le retrait de dessiccation est à l'origine de gradients hydriques qui créent des fissures de la surface. L'ouverture des fissures induites par le séchage varie essentiellement suivant l'intensité de retrait et la géométrie de la structure. Plus les fissures seront profondes et plus leur espacement sera grand. Si ces fissures pénètrent jusqu'à l'armature, elles deviennent un risque pour la durabilité et elles peuvent réduire la vie d'un élément s'il est située dans un environnement agressif.

Le retrait de dessiccation est à l'origine d'autocontraintes induites à différentes échelles : à l'échelle du matériau et à l'échelle de la structure [6, 11] :

➤ A l'échelle des hétérogénéités du matériau : dans le béton les granulats ne subissent pas de variation dimensionnelle sous l'effet du séchage alors que la pâte de ciment subit la déformation de retrait de dessiccation significative. Cette différence de déformation entre la pâte de ciment et les granulats est à l'origine d'un système d'autocontraintes à l'échelle de l'hétérogénéité du matériau (Figure 1.13). Ce système peut conduire à une microfissuration de la matrice cimentaire à l'interface granulat / pâte de ciment affectant les propriétés macroscopiques du béton (propriétés élastiques, résistance, propriété de diffusion). De même, à l'échelle microscopique, les différents constituants de la pâte de ciment ne se déforment pas de façon identique (C-S-H, portlandite, ettringite). En effet, la portlandite, par exemple, est insensible à la diminution de l'humidité relative, ce qui n'est pas le cas du gel de C-S-H.

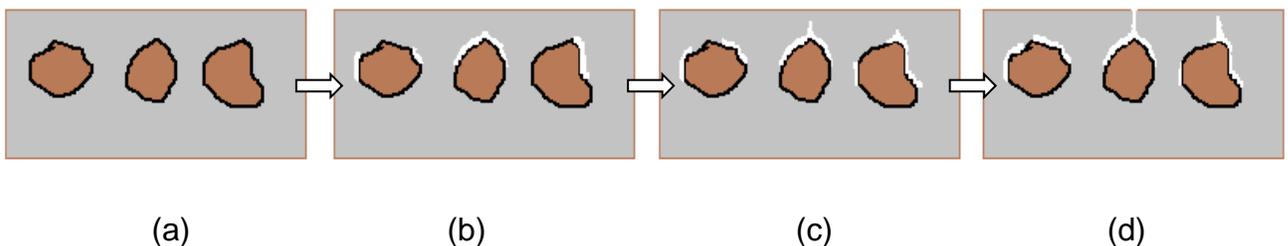


Figure 1.13: Développement des microfissures dues à l'hétérogénéité du matériau (pâte – granulats). a- après coulage ; b- déformation de la pâte (durcissement) ; c- microfissures ; d- fissuration de la pâte.

➤ A l'échelle de la structure : le séchage des matériaux à matrice cimentaire est un phénomène très lent. Il présente un caractère non homogène. Ainsi, la déformation du retrait de dessiccation est différentielle. Elle est plus importante dans les zones exposées au séchage où la teneur en eau décroît rapidement. Ainsi, la zone en surface a alors tendance à vouloir se contracter plus que le cœur. Les conséquences sont la naissance de contraintes de traction en surface. Si ces contraintes dépassent la résistance en traction, elles seront donc à l'origine de l'apparition d'une fissuration de peau. Contrairement à l'étape précédente, la zone de cœur a maintenant tendance à vouloir se contracter plus que la peau, induisant des incréments de contraintes positifs (traction) en cœur et des incréments de contraintes négatifs (compression) en peau ce qui provoque un retrait différentiel (Figure 1.14).

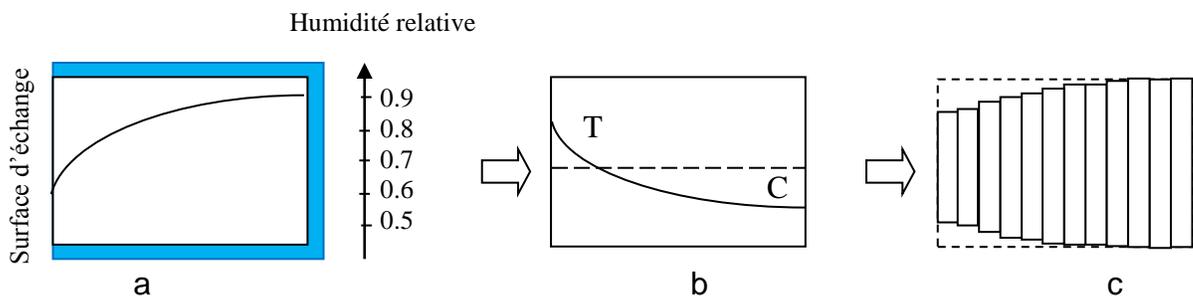


Figure 1.14: a - Profil d'humidité relative d'une éprouvette en dessiccation, b- Variations de la contrainte, c – variation des déformations induites par le séchage différentiel.

1.4.5. Retrait Par Carbonatation

Le retrait par carbonatation résulte de la réaction du CO_2 avec le ciment hydraté. Avec la présence d'humidité, le CO_2 forme un acide carbonique qui réagit avec le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pour former le CaCO_3 . Cette réaction s'accompagne d'une contraction volumique. Le retrait par carbonatation atteint une valeur maximale lorsque le béton est en état d'équilibre dans un environnement où l'humidité relative (HR) est de 50% et non à 100% ou 25%. Dans ce dernier cas, il y a insuffisance d'eau dans les pores de la pâte du ciment pour former de l'acide carbonique. De l'autre côté, quand les pores sont pleines d'eau, la diffusion de CO_2 dans la pâte est très lente [23, 32].

1.4.6. Facteurs influant le retrait

Le retrait du béton est influencé par plusieurs facteurs. Les plus importants sont : l'humidité relative de l'environnement, le type et le dosage de ciment, le rapport E/C, les conditions de conservation, l'âge et les dimensions de l'élément, la quantité et le type des granulats. Dans ce paragraphe on présente quelques résultats expérimentaux observés sur le retrait sous l'effet des facteurs cités.

1.4.6.1. Humidité relative de l'environnement

L'humidité relative de l'air ambiant est l'un des paramètres externes qui a une influence considérable sur le retrait de séchage. Pour un béton (mortier ou pâte de ciment) donné, le retrait est d'autant plus important que l'humidité relative est basse. Dans la littérature, plusieurs banques de données sont disponibles, la plupart de ces données sont obtenues dans des conditions hygrométriques constantes comme dans l'exemple présenté sur la Figure 1.15, alors que dans la pratique ce facteur est variable dans le temps.

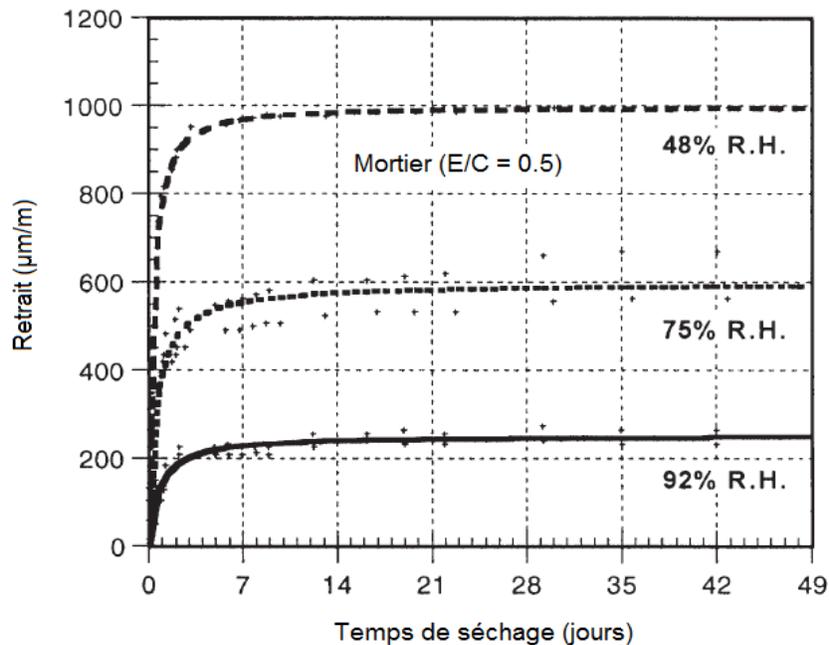


Figure 1.15: Effet de l'humidité relative sur le retrait de séchage des éprouvettes de mortier de 4 x 8 x 32 cm³ [33].

Vandewalle [34] a montré l'effet de la variation de l'humidité sur le retrait du béton (Figure 1.16). Les éprouvettes réalisées sont divisées en quatre séries. La différence entre elles réside dans les conditions d'expositions initiales. Au début les éprouvettes sont exposées aux différentes conditions hygrométriques ; ces dernières sont variables durant l'année et suivent une forme sinusoïdale. Les résultats d'essai montrent que les conditions hygrométriques ont un effet significatif à cours terme mais à long terme toutes les courbes représentant les variations de retrait et qui sont inversement proportionnelles aux variations de l'humidité relative de l'environnement se convergent. La deuxième courbe (Réf) présentée sur la Figure 1.16 montre les résultats du retrait des échantillons conservés à HR constante (HR= 60%). Il est clair qu'à cette humidité, la déformation de retrait est plus élevée par rapport au retrait où HR varie de 65% à 90% (la moyenne est 77,5%).

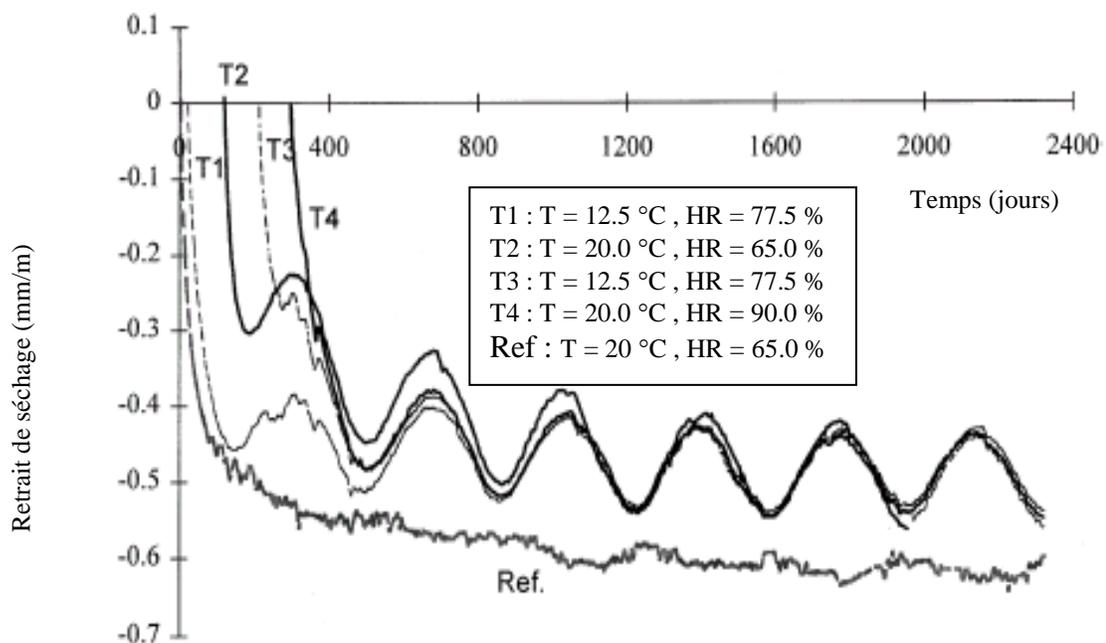


Figure 1.16 : Effet de l'humidité relative sur le retrait de séchage [34].

1.4.6.2. Rapport Eau/Ciment

Si on considère uniquement le retrait de la pâte de ciment hydraté, on constate qu'il est d'autant plus grand que le rapport E/C est plus élevé. L'augmentation du rapport E/C conduit à l'augmentation du retrait de séchage et à la diminution du retrait endogène. Brooks [35] a montré que le retrait d'une pâte de ciment hydraté est proportionnel au rapport E/C lorsque celui-ci reste compris entre 0,20 et 0,60 alors que pour de faibles valeurs (cas de BHP), le retrait endogène est plus élevé. En plus, le retrait du béton augmente avec l'augmentation du volume de la pâte de ciment (Figures 1.17 et 1.18). Pour un même rapport E/C, il existe une relation linéaire entre les deux [33, 35- 37].

Selon Zhang *et al* [38], le retrait endogène augmente avec la diminution de rapport E/C, et avec une teneur croissante de fumée de silice (FS). Les déformations du retrait endogène des bétons à faible rapport E/L et qui contiennent du FS se développent rapidement, même à un jeune âge. Le retrait total à très faible rapport E/(C+FS) exposé à 65% d'humidité relative après une cure humide initiale de 7 jours ne semble pas être dû au retrait de séchage mais au retrait endogène.

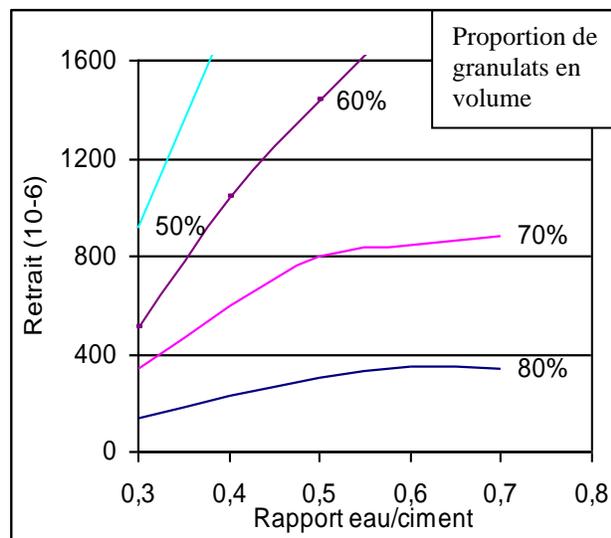


Figure 1.17: Effet du rapport E/C et de la teneur en granulats sur le retrait [37].

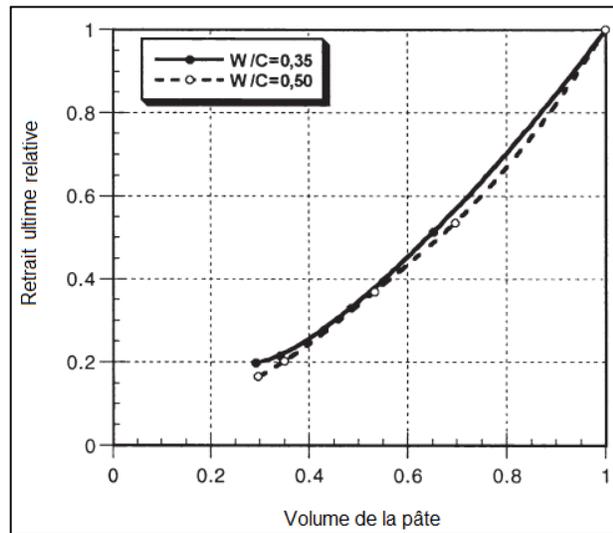


Figure 1.18 : Relation entre le retrait ultime et le volume de la pâte [33].

1.4.6.3. Effet du ciment (Liant)

Le type et la finesse du ciment représentent deux facteurs responsables sur le degré d'hydratation et par conséquent sur la structure de la pâte durcie. Une faible modification dans les composantes chimiques (minéralogiques) du ciment conduit à une variation considérable dans la formation des hydrates et donc sur les propriétés physico-chimiques et mécaniques de la pâte (Figure 1.19).

Selon Ugur *et al* [39] le retrait ultime diminue avec l'augmentation de la résistance. La solution la plus appropriée pour réduire le retrait est de produire des bétons de classes de résistance plus élevée pour les structures sans tenir compte du type de ciment.

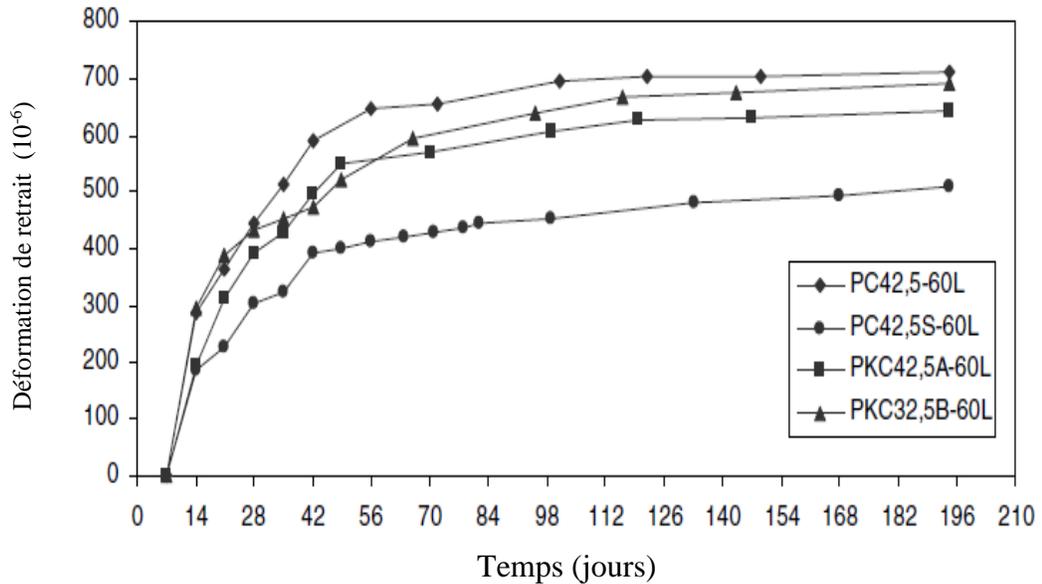


Figure 1.19 : Effet du type de ciment sur le retrait du béton [39].

Les cendres volantes (CV), le laitier granulé de haut fourneau (LGHF), les fumées de silice (FS) et les pouzzolanes naturelles (PN) telles que le schiste calciné, l'argile calcinée et le métakaolin (MK) modifient la microstructure, augmentent le pourcentage des pores fines et influencent l'amplitude des déformations du retrait de dessiccation. En effet, de nombreuses études ont été réalisées pour voir l'effet du type de liant sur la déformation de retrait. Une proportion plus élevée de cendres volantes ou de laitier dans un ciment composé augmente le retrait d'environ 20% pour les cendres volantes et pouvant atteindre 60% pour une teneur plus élevée en laitier [40].

Le retrait endogène des bétons composés avec des rapports E/L allant de 0,27 à 0,42 et des taux de substitution variants de 0%, 30% et 50% de laitier de haut fourneau (LHF) a été évalué par Lee *et al* [41]. Les résultats montrent que les retraits endogènes des bétons de LHF sont plus élevés que ceux des bétons ordinaires sans LHF, et pour un même rapport E/C plus le taux de substitution de LHF est important, plus le retrait endogène est élevé.

Chindaprasirt *et al* [42] ont testé l'effet de la finesse des cendres volantes (CV) sur la déformation du retrait de dessiccation. Ils ont trouvé que tous les mortiers aux cendres volantes présentent un retrait moins important quelque soit la finesse et ceci

à cause du besoin en eau qui diminue avec la présence de ces cendres. Cependant Termkhajornkit *et al* [43] ont montré que l'hydratation des cendres volantes augmente lorsque la finesse augmente et par conséquent le retrait endogène augmente. Les résultats de Tongaroonsri *et al* [44] illustrés sur la Figure 1.20, montrent que la substitution d'une quantité de ciment par des cendres volantes réduit le retrait de séchage à cause de la réaction pozzolanique qui améliore la structure des pores, et que la substitution de 10% du ciment par du calcaire réduit le retrait total par l'effet de Filler.

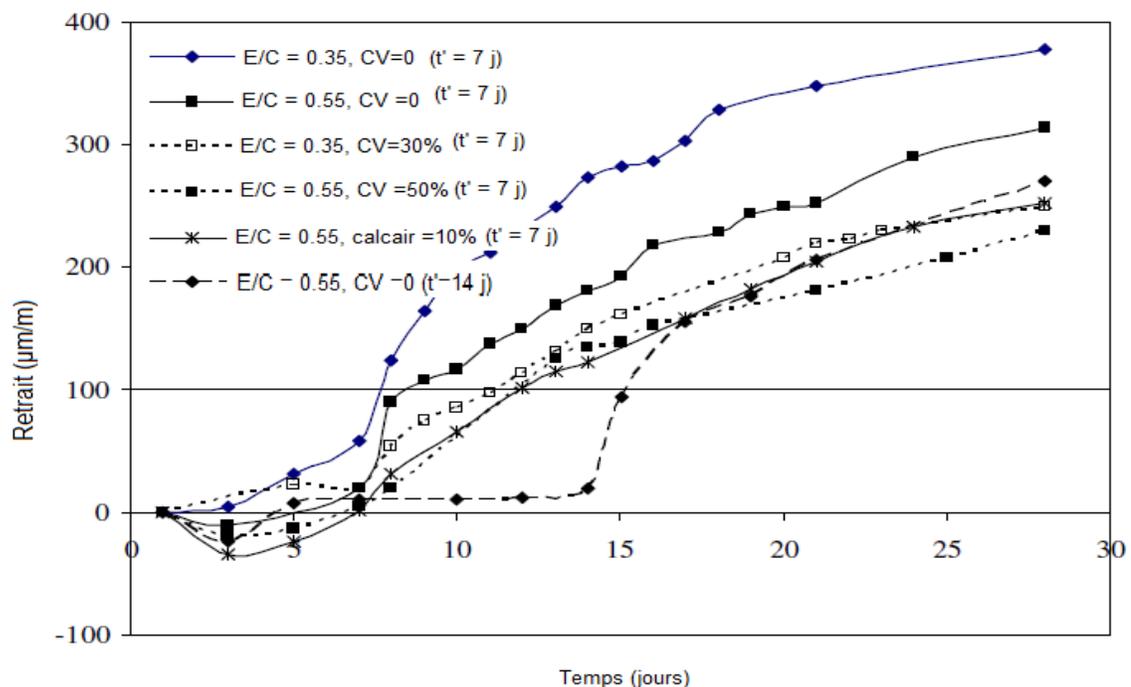


Figure 1.20 : Effet des additions minérales, rapport E/C et la période de cure sur le retrait du béton [44].

Selon Akkaya *et al* [45], le retrait endogène du béton de ciment Portland est plus important que celui du béton avec des liants binaires ou ternaires (90% CP + 10% CV, 80% CP + 10% CV très fine + 10% FS) et ce contrairement au retrait de séchage qui diminue avec la présence de ces ajouts.

L'incorporation de 5% de FS réduit le retrait du béton ordinaire, mais sur le béton léger l'effet de FS est plus important que sur le béton ordinaire [46]. Khatri *et al* [47] ont examiné le retrait d'un béton ayant un rapport E/C égale à 0.35 et ont remarqué

que la substitution de 10% de fumée de silice dans un ciment ordinaire augmente le retrait au jeune âge et réduit celui à long terme. Cet effet est largement réduit lorsque la fumée de silice est substituée avec un ciment portland au laitier.

Itim *et al* [48] ont étudié des mortiers de différents ajouts, et ont remarqué que le retrait endogène augmente de 10%, 8% et 6% lorsque le ciment est substitué par 15% de calcaire, 10% de pouzzolane et 10% de laitier respectivement. Et que l'augmentation de taux de substitution du ciment par le calcaire augmente le retrait endogène et réduit le retrait de séchage.

La substitution d'une partie du ciment par 15% de métakaolin (MK) réduit le retrait de séchage, mais pour des niveaux de substitution supérieurs à 20%, le retrait endogène augmente avec l'augmentation de la quantité de MK [49, 50]. Brooks *et al* [49] ont trouvé qu'à très jeune âge le retrait endogène du béton avec un rapport E/C = 0,28 augmente avec l'augmentation de la quantité de MK (5 à 15%), mais à long terme (après 24 h) le retrait diminue. Philippe *et al* [51] ont trouvé une diminution du retrait endogène de la pâte de ciment pour les deux rapports E/C=0,3 et E/C = 0,5 lorsque les proportions de MK augmentent (15% et 20%).

La quantité des alcalins influencent la réaction d'hydratation et le développement de la microstructure des matériaux à base de ciment à jeune âge [52]. D'après Beltzung [53], l'alcalinité naturelle des ciments favorise le retrait des bétons. Les résultats des retraits sur des mortiers enrichis en NaOH ou KOH montrent une relation quasi linéaire entre le retrait et la teneur totale en alcalin (Figure 1.21). D'après Zhen *et al* [54], les matériaux à matrice cimentaire sont plus sensibles à la fissuration. Cette dernière augmente avec l'augmentation de la quantité des alcalins dans le ciment (liant), surtout lorsque le rapport E/C est faible.

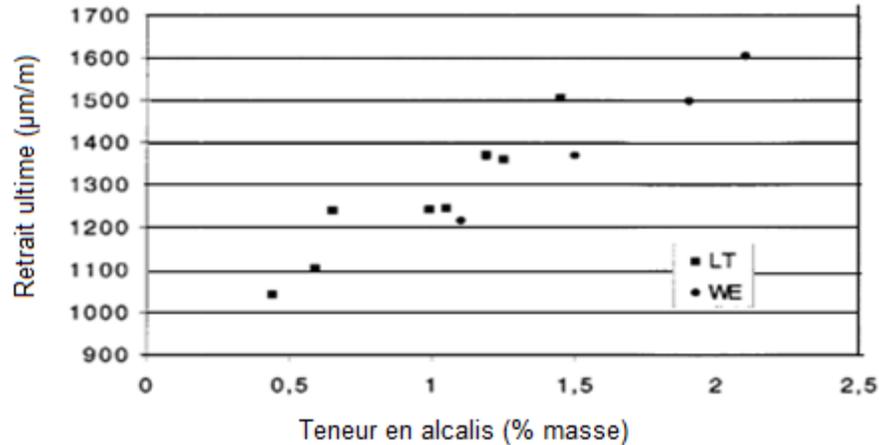


Figure 1.21 : Effet de la teneur en alcalin sur la valeur extrapolée du retrait ultime des mortiers [53].

1.4.6.4. Effet des dimensions des pièces

Le séchage se faisant à partir de la surface du béton, l'amplitude du retrait varie considérablement avec la dimension et la forme de la pièce suivant une loi en fonction du rapport surface/volume. Le retrait total ne peut pas être considéré comme une propriété intrinsèque du béton sans faire référence à la dimension et la forme de l'élément considéré [23]. Plusieurs études ont montré l'influence de la dimension des pièces sur le retrait. Le retrait observé diminue avec l'augmentation de la dimension de l'élément. Mais au-delà d'une certaine valeur, l'effet d'échelle est minime à court terme bien qu'il soit plus prononcé par la suite [23, 55-58] (Figure 1.22). ALOU *et al* [55] ont remarqué que le retrait final décroît linéairement lorsque le diamètre des éprouvettes augmente. D'autres [23] ont constaté que le retrait final est indépendant des dimensions de l'élément du béton, mais que pour des périodes réalistes de plusieurs années le retrait est plus faible dans les éléments de grandes dimensions. A l'état durci le retrait de séchage est le seul le plus influencé par les dimensions des pièces.

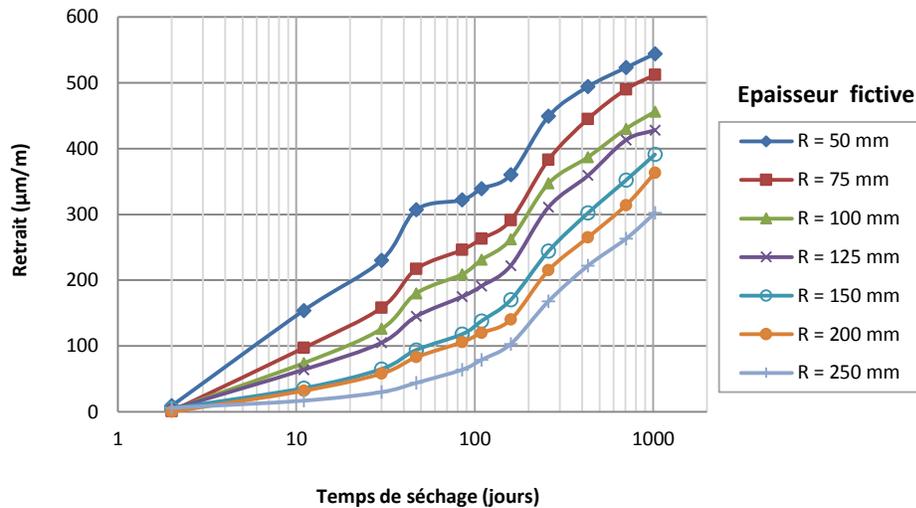


Figure 1.22 : Effet de l'épaisseur fictive des éprouvettes sur le retrait de séchage [55].

1.4.6.5. Effet des granulats

La présence des granulats empêche la déformation de la pâte de ciment et limite le retrait final. L'augmentation de dosage et/ou taille des granulats conduit à la diminution du volume de la pâte et par conséquent à la diminution de retrait [23, 33, 55].

Berthier [59] a montré que plus la taille du granulat est grande plus la fissuration est importante et orientée dans toutes les directions. Les gros granulats jouent un rôle important dans le processus de diffusion de microfissuration du matériau sous l'effet de séchage. Les propriétés mécaniques des granulats déterminent d'une manière générale le degré de contrainte offert. Les granulats de forte absorption (poreuses) ont généralement un faible module d'élasticité ce qui provoque une faible restrainte contre le retrait de la pâte. La forme et la nature des granulats ont aussi un effet sur le retrait (les granulats concassés donneraient un retrait un peu plus élevé que celui des granulats roulés) (Figure 1.23).

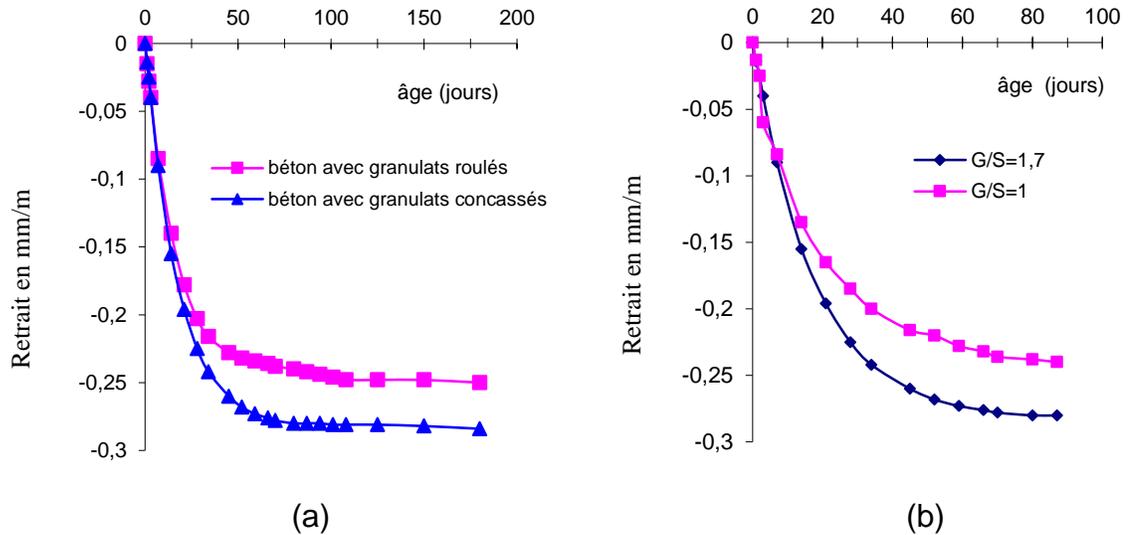


Figure 1.23 : Effets des granulats sur le retrait du béton [59].

- (a)- Effet de type des granulats (granulats granitiques concassés - granulats sélicocalcaires roulés)
 (b) - Effet du rapport Gravier/Sable.

Les granulats naturels les plus courants ne sont généralement pas sujets au retrait. Il existe d'autres présentant du retrait plus élevé et qui sont très répandus dans certains cas. Ballim [60] a trouvé que lorsque les granulats contiennent 50% de schiste et 50% de quartz, le retrait de béton augmente d'environ 38% en comparaison avec le retrait d'un béton qui ne contient que du quartz comme granulats. Selon Bentur *et al* [61], le retrait endogène n'a pas eu lieu dans le béton de granulats légers de surface séchée saturée (SSD). Cependant, une substitution partielle des granulats de poids normal par ce type de granulats légers (SSD) a été efficace pour éliminer le retrait endogène de béton de haute résistance. D'après Zhang *et al* [46], le retrait du béton de poids normal avec des granulats de granit est plus élevé que celui du béton de granulats légers de dosage équivalent dans les six premiers mois. Les bétons composés d'argile expansée, ou de schiste ou de laitier expansé ont des faibles déformations de retrait [23]. Mais le retrait total avec certains types de granulats légers peut être plus élevé. Newman [62] a remarqué que le retrait de béton de granulats légers fins est généralement plus grand que celui du béton de poids normal, et que le retrait de béton de granulats légers fins et dense est similaire à celui de béton de poids normal.

Berra et Ferrara [63] ont comparé le retrait du béton léger composé de gros granulats légers et de sable léger par rapport au retrait de béton de poids normal jusqu'à 100 jours. Les bétons légers avaient des résistances en compression à 28 jours de 40 à 60 MPa, avec des densités de 1650 à 1750 kg/m³. Les bétons de poids normal ont des résistances en compression à 28 jours de 60 à 90 MPa et des densités de 2300 à 2400 kg/m³. Les résultats montrent qu'après une cure humide de 7 jours, le retrait de béton léger a été plus faible que celui du béton de poids normal. Gesoglu *et al* [64] ont aussi constaté que le retrait de séchage des bétons de granulats légers et de résistances élevées est assez faible mais à condition que les granulats légers ont un même degré d'absorption d'eau (Figure 1.24).

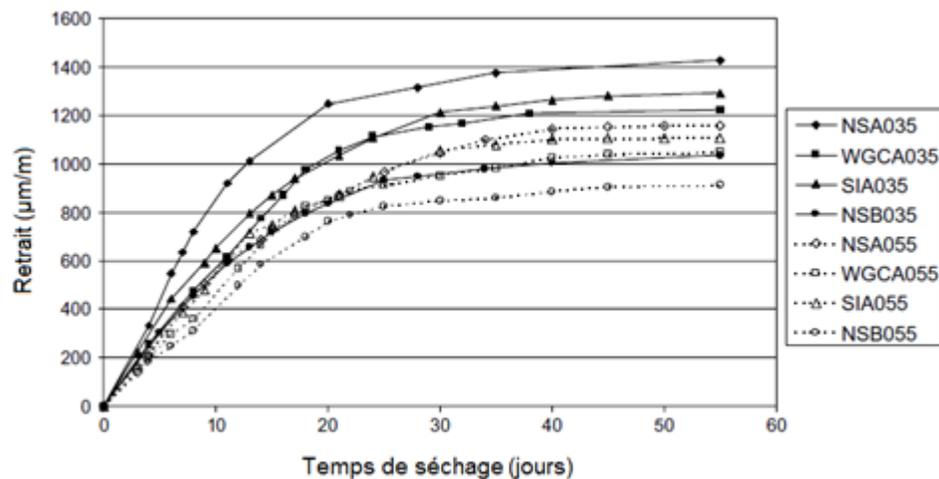


Figure 1.24: Effet des granulats légers sur les retrait des bétons de rapports E/C=0,35 et E/C=0,55 [64].

1.4.6.6. Effet de la cure

Une cure adéquate peut maintenir une humidité interne satisfaisante dans le béton à très jeune âge. La durabilité du béton est contrôlée par la peau qui fournit une barrière protectrice contre le retrait et les fissures qui peuvent réduire la résistance et la durabilité du béton. Le développement de retrait est proportionnel au taux de perte d'humidité dans le béton. Huo et Wong [65] ont montré que les techniques de la cure ont une influence considérable sur le retrait de béton de haute performance (Figure 1.25). L'application de la cure après le démoulage pourrait aider

à retenir l'humidité dans le béton, de cette façon la probabilité de fissuration du béton sous l'effet de retrait de séchage diminue. Quand le béton est bien protégé les particules du ciment continuent à réagir avec l'eau ce qui développe la résistance du béton contre la contraction et par conséquent les potentielles des fissures ou de microfissures diminuent [65].

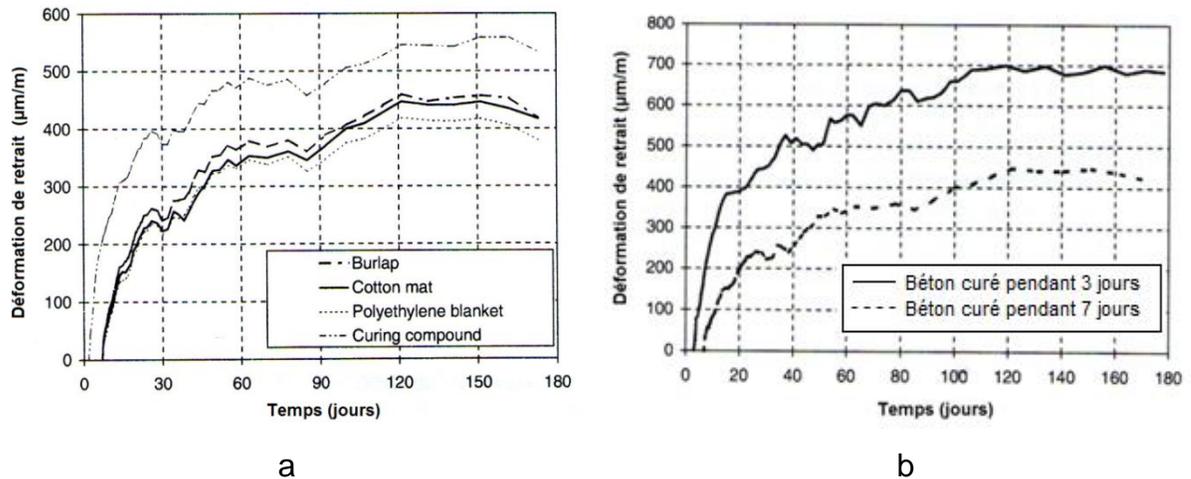


Figure 1.25 : Effet de la cure sur le retrait; a – effet de technique ; b – effet de la période [65].

1.4.6.7. Effet des Adjuvants

Le retrait peut être minimisé en gardant la quantité d'eau par volume de matériaux aussi bas que possible mais cette solution provoque des problèmes sur l'ouvrabilité car le béton devient très ferme ce qui rend difficile la mise en œuvre. Pour cela il est nécessaire d'utiliser des méthodes qui minimisent les exigences de l'eau pour limiter le retrait sans perdre l'ouvrabilité du béton.

D'après Shoya et Sugita [66], la meilleure solution pour diminuer le retrait est d'utiliser des adjuvants réducteurs de retrait (SRA). Ils ont observé que l'addition de 2% de ces adjuvants (SRA) réduit le retrait plastique d'environ 20% (Figure 1.26). Selon Saliba [67], l'ajout des adjuvants réducteurs de retrait réduit le retrait endogène, et surtout le retrait de séchage (Figure 1.27). Bentz *et al* [68] aussi ont constaté que l'addition d'un SRA diminue le retrait endogène dans les mortiers scellés de faible rapport E/C. Les résultats de Shah *et al* [69] ont montré que l'addition de l'adjuvant réducteur de

retrait réduit le retrait plastique ainsi que les fissures qui peuvent être causées par ce dernier.

En général, un béton préparé avec un faible rapport E/C présente un fort retrait endogène. Au jeune âge le retrait endogène est retardé par la forte présence de superplastifiant (SP) [70]. L'addition de SP réduit le volume total des pores et raffine la structure des pores [71]. Erika [72] a montré que les SP augmentent le retrait endogène de 50% par rapport à un béton sans SP.

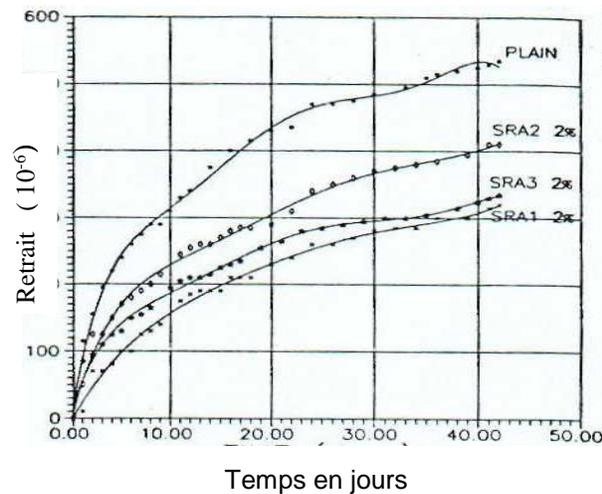


Figure 1.26 : Effet de type des adjuvants réducteurs de retrait sur le retrait de béton [66].

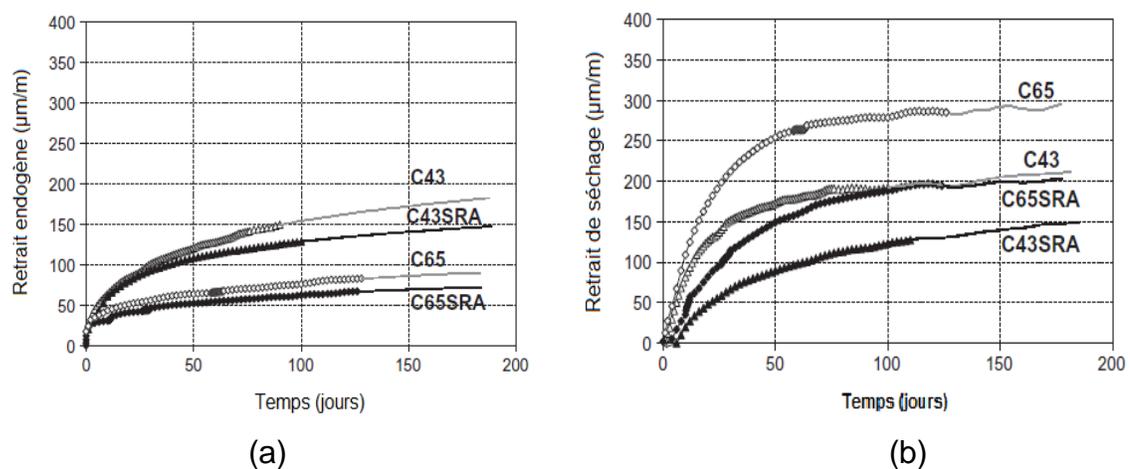


Figure 1.27: Influence de rapport E/C et de l'adjuvant réducteur de retrait (SRA) sur a- retrait endogène et b- retrait de séchage [67].

Alexander et al [73] ont observé l'augmentation de 10% à 25 % de retrait de béton à haute performance (BHP) contenant du superplastifiant après 20 mois de l'essai. En outre, des études comparatives entre béton à haute résistance (BHR) et béton de résistance normale (BRN) réalisées par Ngab *et al* [74] montrent que les éprouvettes de BHR subissent des déformations de retrait plus grandes que les éprouvettes de BRN. Toutefois, des essais entrepris par Brooks et Waimwright [75] pour comparer les propriétés des bétons de hauts dosages en ciment (500-730 kg/m³) en fonction du temps avec et sans adjuvant superplastifiant, montrent que les retraits des bétons adjuvantés étaient inférieurs à ceux des bétons témoins. Ils ont supposé que le retrait faible des bétons adjuvantés peut être expliqué en terme du volume élevé des granulats par rapport au béton témoin. Mais dans une autre étude sur les déformations à long terme du béton réalisée par Brooks [35], une augmentation de retrait de séchage de 3 et 130 % dans les bétons préparé avec superplastifiant et plastifiant respectivement a été observée.

Alsayed [76] a étudié le retrait de séchage de 12 éprouvettes prismatiques de béton contrôlées pendant trois ans sous les conditions de laboratoire et sur un chantier à climat chaud et sec. Il a conclut que le plastifiant augmente la déformation de retrait de séchage de trois années, ainsi que la vitesse d'évolution de retrait de béton durant le premier mois par rapport à un béton avec superplastifiant.

1.4.6.8. Effet des armatures

Les armatures s'opposent au retrait de la pâte. L'addition des fibres d'acier est nécessaire non pas seulement pour renforcer le béton mais aussi pour diminuer l'épaisseur des fissures dues au retrait. Des études antérieures sur l'influence des fibres d'acier sur le retrait montrent que les déformations de retrait sont généralement plus petites pour les bétons de fibres comparées à celles du béton normal, cette réduction dépend de la forme et de la quantité de fibres [59, 77- 80].

Kovler et Bentur [80] ont trouvé que le retrait du béton non armé et celui du béton armé de rapport E/C=0,7 et de période de cure égale à un jour sont identiques pendant quelques heures, et ce avant l'apparition des fissures. Mais après la fissuration, les déformations de retrait deviennent différentes, comme il est représenté dans le Tableau 1.1.

Tableau 1.1: Effet des fibres et de plastifiant sur les fissures de retrait à 42 jours [80]

Bétons	L'épaisseur maximale des fissures (mm)
Béton non armé	0,72
SRA 2% *	0,3
SFRC 0,25 % **	0,24
PFRC 0,5% ***	0,23

* Béton contient les adjuvants réducteurs de retrait.

** Béton contient les fibres d'acier.

*** Béton contient fibre polypropylène.

1.5.Le Fluage

Une pièce en béton, soumise à l'action d'une charge constante subit une déformation instantanée élastique, réversible suivie par une déformation lente appelée fluage.

Le fluage est l'augmentation graduelle de la déformation du béton avec le temps sous une contrainte constante. Cette déformation peut être deux à trois fois plus grande que la déformation due au chargement (élastique). Tout dépend de la qualité du béton. Lors de déchargement il se produit immédiatement une diminution (recouvrance) de la déformation élastique qui est généralement inférieure à la déformation créée au moment de la mise en charge. Ce retour de la déformation instantanée est suivie d'une diminution graduelle de la déformation différée appelée le fluage réversible (Recouvrance de fluage).

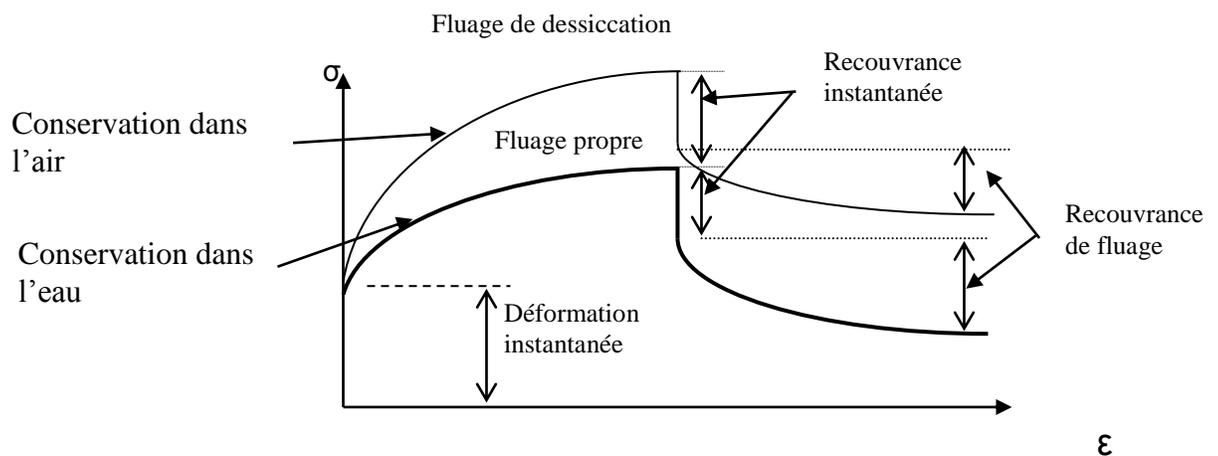


Figure 1.28 : Développement du fluage et du fluage de recouvrance d'un béton conservé dans l'eau et autre dans l'air.

Le fluage total observé sera la somme du fluage propre et du fluage dû au séchage (Figure 1.28). Le fluage propre se produit quand le béton est chargé dans des conditions ambiantes constantes (sans changement avec le milieu externe). Le fluage de dessiccation c'est le fluage additionnel dû à la variation de l'humidité quand le même béton est exposé au séchage pendant qu'il est sous charge. Certains auteurs appellent fluage spécifique le fluage en microns par mètre obtenu par unité de charge, c'est à dire le rapport fluage/contrainte appliquée.

1.5.1. Mécanismes de fluage

D'après Tamtsia et Beaudoin [81], le fluage propre des bétons reste un phénomène aujourd'hui encore mal connu. Expérimentalement il est caractérisé par une forte dépendance à l'âge du matériau lors du chargement. Enfin, la déformation du fluage propre d'un béton sec (dont on a enlevé toute l'eau évaporable) est négligeable [82]. Le fluage de dessiccation reste aussi un phénomène encore mal expliqué. Plusieurs mécanismes ont été proposés pour expliquer ou même pour modéliser cette déformation.

1.5.1.1. Mécanismes du fluage propre

L'analyse de la cinétique de la déformation du fluage propre des pâtes de ciments et des bétons met en évidence deux régimes cinétiques distincts qui expriment deux mécanismes de fluage propre [83, 84]:

- A court terme : la déformation de fluage est caractérisée par une cinétique rapide pendant quelques jours après le chargement. La redistribution de l'eau induite par la contrainte due à un mécanisme de type diffusif semble être une hypothèse des plus probables, cohérente avec le caractère différé du fluage à court terme [85]. Les contraintes sont retransmises à l'échelle microscopique à travers les produits d'hydratation qui entourent les pores capillaires. Ce transfert d'effort microscopique induit localement un déséquilibre thermodynamique entre les molécules d'eau en adsorption libre dans ces zones de transmission et celles qui sont plus loin (porosité capillaire). Pour restituer l'équilibre, les molécules d'eau diffusent dans les couches

d'eau adsorbée (diffusion surfacique) vers la porosité capillaire, entraînant la déformation du squelette solide.

- A long terme : la déformation de fluage propre est caractérisée par une cinétique très lente.

Le mécanisme essentiellement retenu est du type microcisaillement au niveau des particules d'hydrates, les feuillets de C-S-H, lubrifiés par l'eau des espaces interfoliaires, et de façon générale, les surfaces des hydrates en zone d'adsorption empêchée, seraient susceptibles d'avoir un mouvement de glissement relatif. Certains chercheurs [84, 86] proposent que l'effet du vieillissement observé soit d'origine mécanique, lié à la relaxation des micro-précontraintes dans les zones d'adsorption empêchée. Les micro-précontraintes sont générées par la pression de disjonction, ainsi que par des variations volumiques importantes et fortement localisées induites par l'hydratation ou le séchage. La relaxation des micro-précontraintes se situe à l'échelle des nanopores de la pâte de ciment. Les liaisons entre les surfaces solides sur-tendues localement et instables, sont susceptibles de se rompre [30]. Elles se reforment dans des zones adjacentes de moindre surtension du fait du glissement des feuillets de C-S-H. Les forces de liaison se relaxent dans le temps, et ce sont d'autres sites qui seront alors le siège de ruptures potentielles. Ce processus en chaîne épuise successivement les sites de fluage qui ont été activés par le chargement mécanique. Cet épuisement conduit au vieillissement observé au niveau de la cinétique du fluage en fonction de l'âge du matériau.

1.5.1.2. Mécanismes du fluage de dessiccation

Le fluage de dessiccation correspond à la déformation additionnelle observée quand le béton est chargé et subit en même temps un changement d'état hydrique interne. En effet, une éprouvette préalablement séchée flue moins qu'une éprouvette saturée, alors que plus l'humidité relative décroît durant un test de fluage, plus le béton flue [87].

Dans la littérature, deux phénomènes sont proposés pour expliquer l'origine de la déformation de fluage de dessiccation [11]:

- Le premier phénomène est lié à la fissuration du béton : proposé par Wittmann et Roelfstra [87], qui ont suggéré que l'effet structural soit la principale cause du fluage de dessiccation.
- Le deuxième phénomène est lié au comportement intrinsèque du matériau béton, en sus de l'effet structural.

Il semble que le fluage de dessiccation est fortement lié au retrait de séchage.

- **Fluage de dessiccation intrinsèque** : Des expériences menées par Bažant *et al* [27] ont montré qu'il y avait une part du fluage de dessiccation liée uniquement au comportement du matériau, indépendamment de tout effet lié à la géométrie de la structure. Des éprouvettes de pâte de ciment d'épaisseur faible (1,9 mm, et donc non sujettes à une microfissuration importante) subissent une déformation de fluage de dessiccation importante.

- **Fluage de dessiccation structural** : Lorsqu'une éprouvette sèche sans chargement extérieur, les contraintes de traction sont dues aux gradients de teneur en eau, et sont tellement élevés qu'ils conduisent à de la fissuration en peau et à cœur. Cette fissuration relaxe les contraintes induites par le séchage et réduisent l'amplitude du retrait. Elle est liée en partie à la géométrie de la structure. Lorsqu'une éprouvette est chargée constamment en compression et sèche, la fissuration due au séchage est moins prononcée que celle du spécimen non chargé [30]. Ainsi, la déformation mesurée est supérieure à la somme des composantes élémentaires : retrait de dessiccation et fluage propre. La déformation supplémentaire est appelée fluage de dessiccation structural. Il semble néanmoins que la contribution de ce fluage de dessiccation structural ne représente qu'une part peu importante (mais pas négligeable pour autant) du fluage de dessiccation total [88].

1.5.2. Facteurs influant le fluage

Comme le retrait, plusieurs facteurs affectent le fluage, ces facteurs n'ont pas un effet seulement sur la grandeur finale du fluage, mais aussi sur la cinétique à chaque instant. Ils peuvent être divisés en facteurs intrinsèques et extrinsèques. Les facteurs extrinsèques sont ceux qui peuvent être modifiés après ou lors de la coulée, tels que la température, l'humidité relative, la dimension des pièces et les conditions de

conservations. Les facteurs intrinsèques sont fixés une fois pour toutes lors du coulage du béton. Ils comprennent la résistance, le module d'élasticité, le dosage et la taille des granulats dans le mélange de béton, le rapport eau/ciment et le ciment.

1.5.2.1. L'humidité relative de l'environnement

L'humidité relative est un des paramètres essentiels comme dans le cas du retrait car la valeur finale du fluage dépend des conditions hygrométriques. Plus l'humidité relative est basse, plus le fluage est important. Plusieurs recherches [8, 12, 18, 23, 32, 88-92] ont montré que le fluage est important dans des régions sèches tandis que dans des régions où l'humidité relative est importante, le fluage de séchage est très petit ou même négligeable. Le fluage propre est indépendant de l'humidité de l'environnement. Selon Troxell *et al* [92], le fluage de séchage varie linéairement avec l'humidité relative (Figure 1.29).

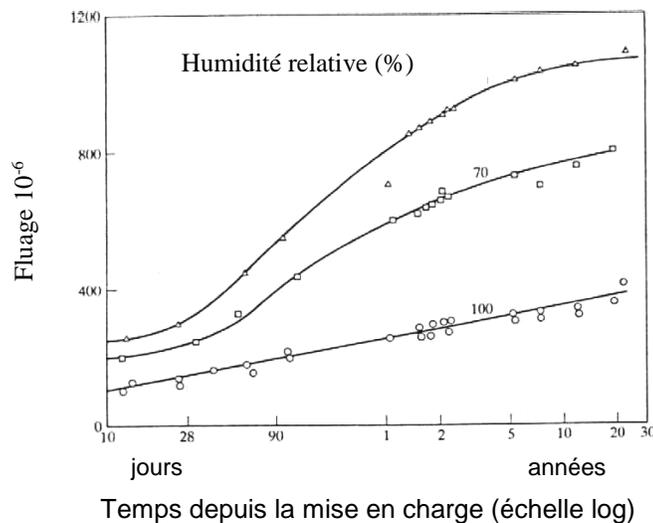


Figure 1.29 : Effet de l'humidité relative de l'environnement sur le fluage d'un béton curé pendant 28 jours [92].

1.5.2.2. La température

De nombreux chercheurs [90, 93, 94] ont trouvé que le fluage augmente avec l'accroissement de la température. Certains ont trouvé qu'au-delà d'une température donnée (60 à 80 °C) le fluage pouvait rediminuer. Il y aurait donc selon eux un fluage maximal pour une température voisine de 70°C (Figure 1.30). D'autres par contre, opérant dans des conditions expérimentales sans doute un peu différentes, ont

trouvé qu'au contraire il y avait une augmentation constante du fluage avec la température [93]. Ils ont obtenu des valeurs de fluage doublées à 80°C et quadruplées à 140°C par rapport à 20°C, et d'autres [93] ont trouvé que le fluage pouvait être multiplié par six à 300°C et par quinze à 500°C. D'après Neville [23] le fluage est d'autant plus important lorsque la température est élevée, même si celle-ci n'agit que pendant un temps court. De toute façon, et bien que le problème soit complexe et certains résultats contradictoires, la température exerce sur le fluage une action non négligeable. Mais sous des conditions normales l'effet de la température sur le fluage n'est pas prononcé. Une petite variation de la température n'a pas d'effet considérable, mais pour des variations importantes cet effet devient non négligeable.

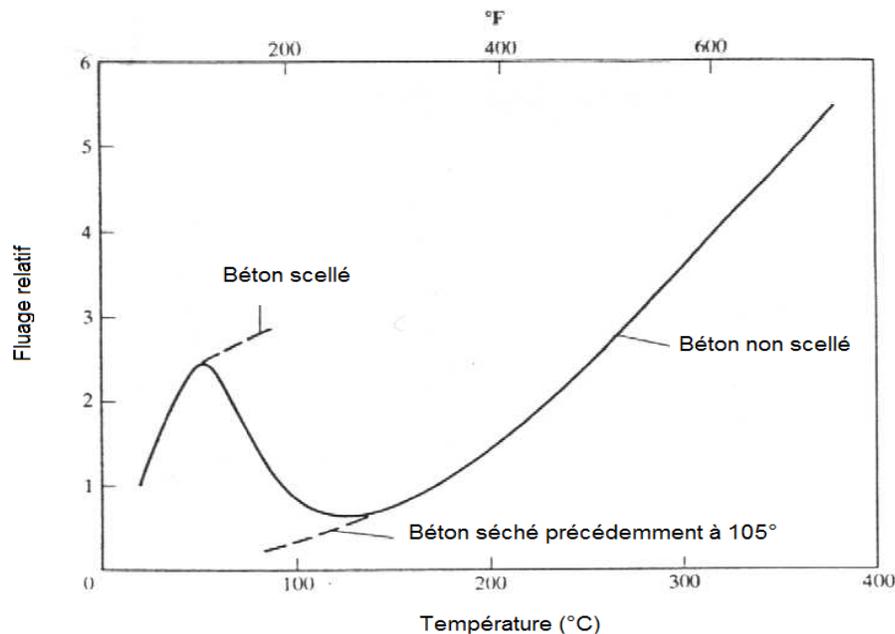


Figure 1.30 : Effet de la température sur le fluage relatif [94].

1.5.2.3. Rapport contrainte/résistance

La déformation instantanée comme le fluage sont proportionnels à la charge appliquée, lorsque celle-ci reste à l'intérieur d'un certain domaine (ce domaine serait tel que le rapport contrainte appliquée/résistance du béton soit inférieur à 0,5). Au-delà de cette limite, la réponse est fortement non linéaire. Dès que la contrainte dépasse 85 % de la résistance, la rupture se produit inévitablement après quelques minutes [95- 96]. D'après Berthier [59], la bonne résistance mécanique d'un béton

n'est pas un critère suffisant de la qualité du béton. Il a trouvé que deux bétons ayant sensiblement la même résistance ont des modules nettement différents et un comportement sous charge différent aussi.

1.5.2.4. L'âge du béton au moment du chargement

L'âge du béton au moment du chargement est également un paramètre très important. Plus le béton est chargé tôt et plus le fluage est important [33, 96 - 99] (Figure 1.31). Même à résistances mécaniques égales, les déformations instantanées et le fluage sont d'autant plus élevés quand le béton est chargé à un âge plus jeune.

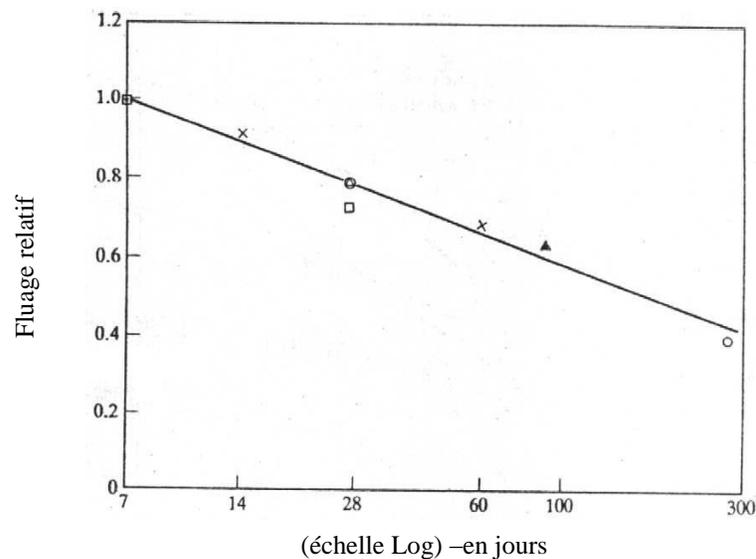


Figure 1.31: Effet de l'âge du béton au moment de la mise en charge sur la déformation du fluage relatif [97].

1.5.2.5. Dimension de l'éléments et le pourcentage d'armature

Le fluage est d'autant plus important que le rapport volume/surface de la pièce sollicitée soit plus faible [77, 88] (Figure 1.32). Selon certains chercheurs, le temps nécessaire pour produire un fluage déterminé serait proportionnel au rapport $(V/S)^{1.5}$ (élément conservé dans l'air) [77]. Le fluage propre est indépendant de la dimension de la pièce. Par contre le fluage de dessiccation est très influencé.

L'incorporation d'un pourcentage de fibres d'acier dans une matrice de béton permet d'augmenter la résistance à la fissuration du béton et offre à ce matériau un meilleur comportement en traction, à la fatigue et une meilleure ductilité par rapport au béton sans fibres. L'ajout des fibres au béton peut aussi réduire le fluage [98, 99]. Par contre, d'après Bissonnette et Pigeon [100] les fibres d'acier augmentent le fluage du béton.

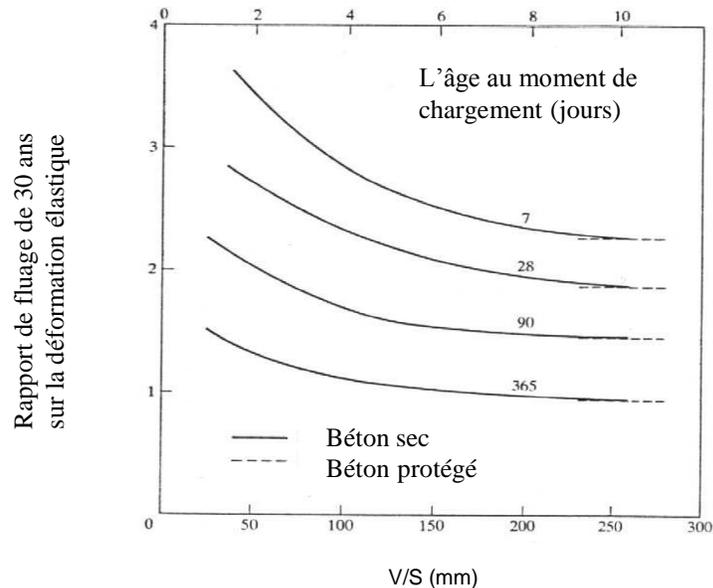


Figure 1.32 Effet du rapport volume/surface sur le rapport fluage/déformation élastique pour un béton séché et un béton conservé à une humidité relative de 60 % [88].

1.5.2.6. Effet du rapport E/C

Le fluage du béton dépend de la pâte de ciment durci, car le fluage des granulats est très faible. En effet, on sait que dans un béton c'est surtout la pâte pure de ciment qui flue. Celle-ci ne représente environ que 30% du volume du matériau. Le fluage lié étroitement au rapport eau/ciment (Figure 1.33), l'augmentation de ce dernier provoque l'augmentation de fluage et inversement [59, 100]. Il a été constaté expérimentalement que le fluage obtenu sur la pâte pure est deux à trois fois plus élevé que celui obtenu sur un béton confectionné avec le même ciment et dosé par exemple à 350 kg/m³. Cette constatation a lieu aussi bien pour une conservation

dans l'eau que pour une conservation dans l'air. Le même phénomène est observable en ce qui concerne les déformations instantanées sous charge [89].

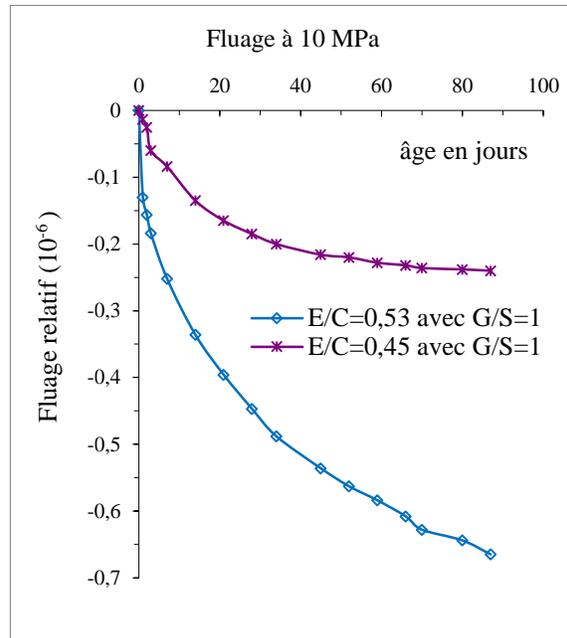


Figure 1.33 : Effet du dosage en eau et en ciment sur le fluage [59].

1.5.2.7. Nature du ciment

Le fluage varie suivant la composition et la finesse de ciment. Par ailleurs, la déformation de fluage dépend aussi du type de liant utilisé (ciment, fumé de silice, laitier, ..). Les constituants secondaires ajoutés (laitier, cendre volante,...) modifient le fluage dans la mesure où ils modifient les propriétés mécaniques [15, 23]. Mais selon Huet *et al* [101] ces effets ne peuvent pas être reliés directement aux valeurs différentes de la résistance ou de la finesse du liant utilisé.

En effet, la relation entre le fluage et le type de ciment est compliquée. Elle dépend des propriétés physico-chimiques du ciment et du degré d'hydratation de la pâte de ciment durci [23]. Akkaya *et al* [45] ont observé une légère augmentation sur le coefficient de fluage avec l'ajout de matériaux cimentaires supplémentaires. Selon Tazawa et Yonekura [102], le fluage des bétons aux fumées de silice est supérieur à celui des bétons ordinaires. De Larrard [103] a confirmé que les bétons à hautes

performances fluant moins que les bétons ordinaires. Il a trouvé que le coefficient de fluage passe de 1,48 pour le béton ordinaire à 0,55 pour le béton à très haute performance. Il a constaté aussi que le fluage de dessiccation est réduit de 96% puisque le rapport de la déformation passe de 0,69 pour le béton ordinaire (BO) à 0,2 pour le béton à très haute performance (BTHP) (Tableau 1.2).

Tableau 1.2: Comparaison des résultats du fluage après huit mois de BO et BHP [103]

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

Les résultats des essais de Brooks *et al* [49] sur des mélanges de béton contenant 0%, 5%, 10% et 15% de métakaoulin (MK) montrent que le fluage total, le fluage propre et le fluage de séchage du béton sont considérablement réduits en particulier pour des taux de substitutions élevés de MK.

Leemann *et al* [104] ont étudié l'influence du volume de la pâte et du type de ciment (I, II et III) sur le comportement du béton auto-plaçant (BAP) et du béton vibré classique (BVC) (module d'élasticité, la résistance à la flexion et à la compression, les déformations de retrait et de fluage de séchage, le développement de la contrainte). Les dosages en ciment des deux types de béton sont : $C_{BVC} = 230 \text{ kg/m}^3$ et $C_{BAP} = 530 \text{ kg/m}^3$ respectivement. Pour chaque type de béton (BAH et BVC), ils ont testés trois mélanges de même rapport E/C (0.4) mais de différents types du ciment (I, II et III). Ils ont constaté que outre le volume de la pâte, le type de ciment joue un rôle fondamental, et en ce qui concerne le fluage, l'influence du type de ciment sur le fluage et le coefficient de fluage est au moins identique et parfois plus grande que l'influence du volume de pâte (Figure 1.34).

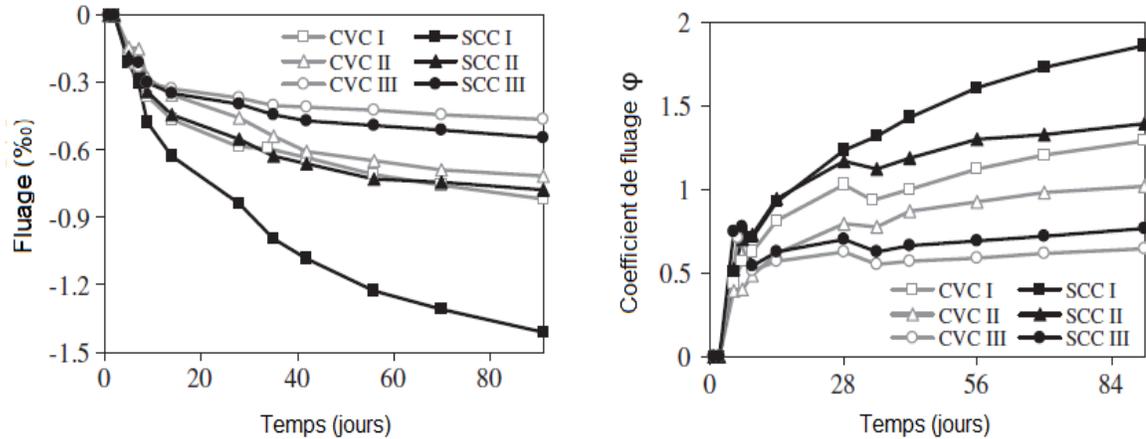
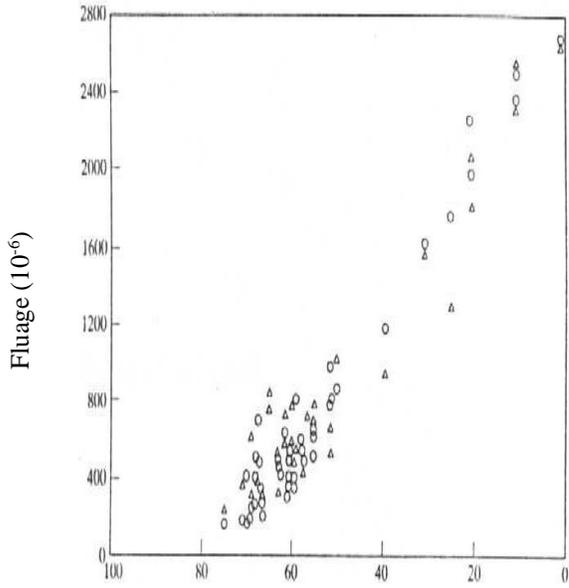


Figure 1.34: Effet du type de ciment sur la déformation et le coefficient de fluage [104].

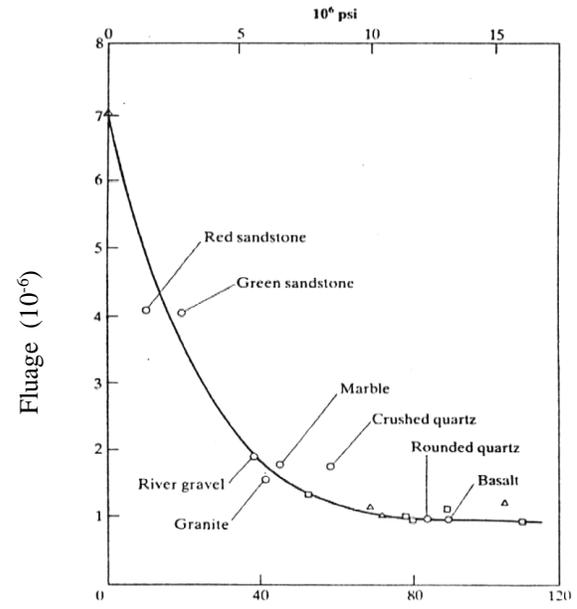
1.5.2.8. Granulats

L'augmentation de la teneur en granulats diminue l'amplitude de la déformation de fluage propre d'un mortier par rapport à celle d'une pâte de ciment. Comme dans le cas du retrait de dessiccation, le siège de la déformation de fluage est la pâte de ciment durcie, car les granulats ne se déforment pas.

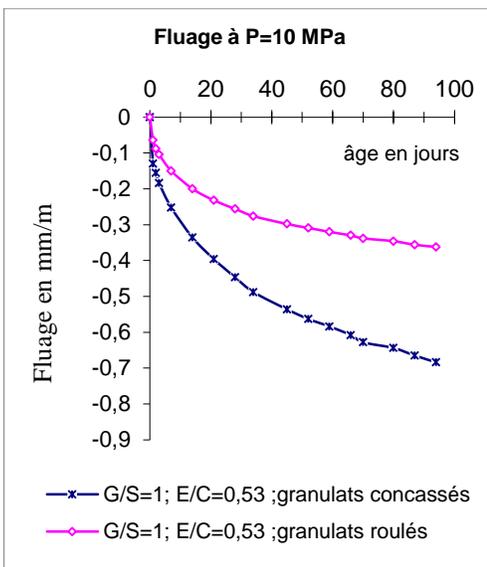
Les granulats interviennent sur 80% du volume du béton et s'opposent au fluage de la pâte qui les entoure par leur module de déformation. Dans le cas courant ils sont plus ou moins compressibles, plus ou moins poreux. Le module élastique des granulats a une influence considérable sur le comportement de béton sous charge et spécialement sur le fluage. Le fluage peut varier du simple au triple suivant le type et la densité des granulats utilisés [103]. D'après Berthier [59], le fluage du béton dépend de type et du dosage des granulats, le fluage est plus important lorsque le béton contient des granulats concassés (Figure 1.35). Newman [62] a constaté que l'augmentation de la résistance des granulats légers concassés augmente la résistance en compression des bétons qui à son tour induit une diminution importante du fluage spécifique (Figure 1.36). De plus, l'amplitude de la déformation de fluage se stabilise plus tôt pour les bétons de granulats durs.



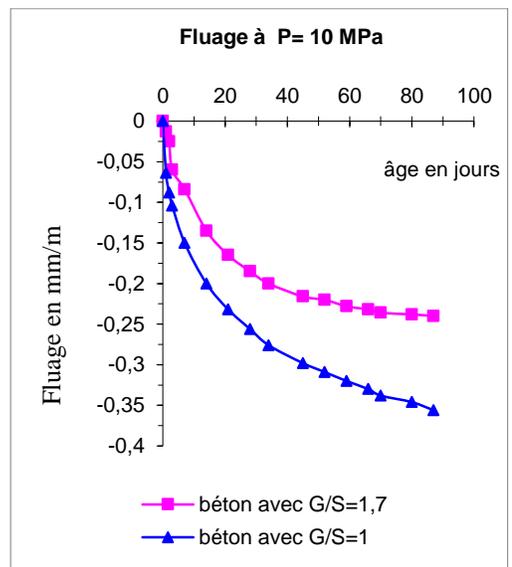
Quantité des granulats en % de volume
a - Effet de dosage des granulats [23]



Module élastique des granulats en GPa
b - Effet de qualité des granulats [23]



c - Effet de forme des granulats (concassés-roulés) [59]



d - Effet du rapport Gravier/Sable [59]

Figure 1.35 : Effet des granulats sur le fluage.

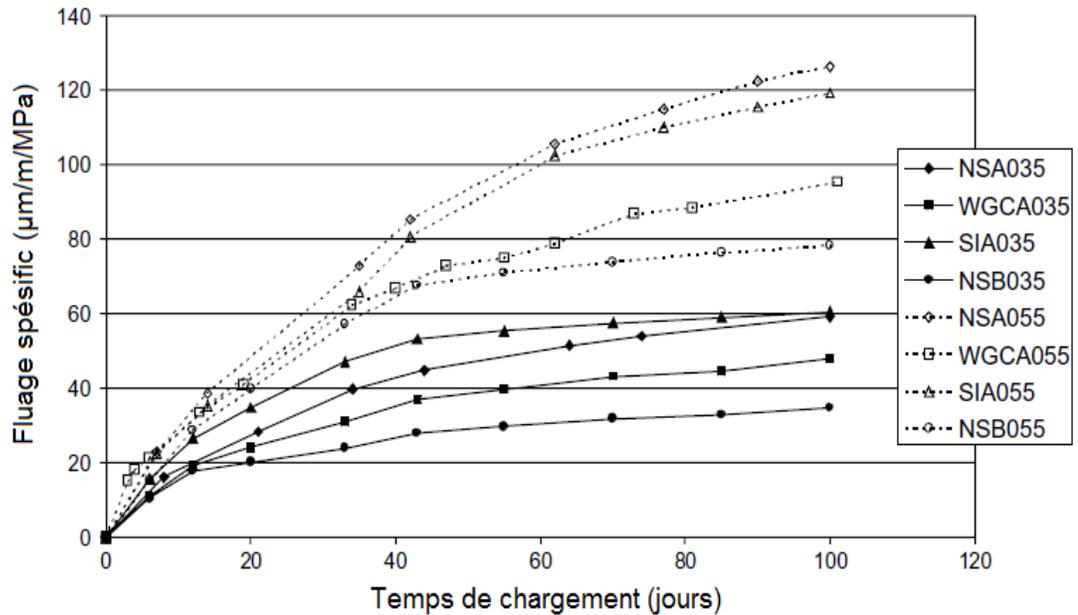


Figure 1.36 : Fluage spécifique des bétons de différents granulats légers [62].

1.5.2.9. Adjuvants

Les adjuvants modifient assez peu le fluage lorsque les propriétés mécaniques sont inchangées. Par contre, si un adjuvant augmente les résistances, le fluage est diminué, et inversement si un adjuvant fait baisser les résistances mécaniques le fluage augmente.

Les adjuvants réducteurs d'eau et retardateur de prise augmentent le fluage propre dans de nombreux cas, mais pas toujours [23]. D'après Brooks [35] les adjuvants plastifiants et superplastifiants augmentent le fluage de 3 à 130%. Melbouci et Sliwinski [105] ont trouvé dans l'étude de l'influence de certains adjuvants sur les propriétés de béton que le médafluide et le médaplast augmentent la résistance du béton et diminuent le fluage.

1.6. Modélisation du retrait et du fluage du béton

Depuis les premières observations du retrait du béton au siècle précédent et la découverte du fluage du béton par Hatt en 1907, de nombreuses recherches ont été consacrées à ces deux phénomènes. C'est en 1911, qu'Eugène Freyssinet en fait la désagréable expérience lors de la construction du pont du Veudre sur l'Allier, où Il a constaté sur ce pont des déformations considérables qui compromettent l'intégrité de la structure. Le pont ne sera sauvé que par l'utilisation de vérins pour compenser l'amplitude des déformations importantes subies. Cette aventure lui révéla l'existence de déformations qui ont occupé certains des meilleurs esprits dans le domaine de la recherche du ciment et du béton et des sciences des matériaux après Freyssinet : Glanville, Dischinger, Troxell et al (1958), Pickett, McHenry, L'Hermite et al (1965), Arutyunian, Aleksandrovskii (1959), Powers, Hansen and Mattock (1966), Rüschi, Neville et al.(1983), Trost, Dilger, Wittman, Hilsdorf, Müller, Huet, Carol, Bazant et d'autre [106].

Vue la complexité de ces deux déformations, elles restent jusqu'à présent mal connues. De nombreuses théories ont été établies pour expliquer le comportement différé observé. Sur la base de certaines de ces théories, plusieurs modèles mathématiques ont été proposés pour estimer les déformations de retrait et de fluage et ses effets sur la stabilité des structures à long terme. Certains de ces modèles ont été inclus dans des codes pratiques pour faciliter l'analyse structurale. D'après Acker et Ulm [12] pour l'ingénieur la déformation ultime est plus importante que la vitesse d'évolution. La précision de ces modèles et la possibilité de les applique dans le calcul des ouvrages reste le point de discussion de plusieurs chercheurs.

D'après Almanaseer *et al* [107], les modèles B3 et GL2000 sont les plus performants pour la prévision du retrait, alors que les modèles CEB 90, B3 et GL2000 sont meilleurs pour estimer le fluage. Huo et Wong [65] ont remarqué que le modèle CEB-90 estime bien le retrait du béton a haute performance (BHP) préparé avec du ciment portland type I, de la cendre volante (classe C) et de la fumée de silice et que le modèle ACI-209 estime mieux le retrait de béton à haute performance (BHP) à très jeune âge, tandis-que le modèle GL2000 peut prédire le retrait a long terme de façon

raisonnable. Selon Mokarem *et al* [108] le modèle de GL2000 estime bien le retrait de séchage du béton au cendre volante et de laitier mieux que les modèles B3 et CEB-90. Alors que pour le béton à la fumée de silice le modèle ACI est le meilleur comparativement avec les autres modèles cités.

Mazloom *et al* [109] ont étudié l'effet du taux de substitution de la fumée de silice (0%, 6%, 10% et 15%) sur le retrait et le fluage des bétons de haute résistance et sur la précision des deux modèles ACI et CEB. Ils ont remarqué que les deux modèles sous-estiment le retrait, mais à long terme, le modèle ACI surestime le retrait. Ils ont observé aussi que les deux modèles sur estiment le fluage. D'après McDonald et Roper [110], la forme et les dimensions des éprouvettes représentent un problème pour les deux modèles ACI, CEB. Ces deux modèles estiment le retrait des éprouvettes cylindriques mieux que le retrait des éprouvettes prismatiques.

Les recherches réalisées sur l'évaluation des modèles de prévision de retrait et de fluage ont été étendues à l'étude des effets de ces deux phénomènes sur le comportement des structures. Plusieurs études ont été élaborées dans ce domaine pour l'évaluation de la flèche, l'analyse des contraintes, évaluation des fissures, ou l'analyse la serviabilité et durabilité des structures. Nous citons par exemple l'étude de Suksawang et Nassif [111] qui ont constaté que le module élastique de béton de haute résistance contenant de pouzzolane a un effet important sur la précision de fluage prédit et que les modules d'élasticité calculés par les modèles étudiés (ACI, CEB, B3 et GL2000) doivent être révisés pour tenir compte de l'effet du pouzzolane sur le béton de haute résistance. En parallèle ils ont constaté que le modèle ACI représente le meilleur modèle de fluage pour le béton de haute résistance en comparaison avec les trois modèles cités.

Dans l'étude du comportement des éléments précontraints, Paumsen *et al* [112] ont remarqué que les deux modèles CEB et ACI ont presque les mêmes précisions, où la flèche estimée a mis travée par les deux modèles était d'ordre 16% et 19% respectivement.

D'après les recherches présentées dans la littérature, il semble que les modèles ; ACI CEB, B3 et GL sont les plus utilisés que ce soit pour estimer les déformations différées ou bien pour l'analyse des structures. Pour cette raison nous avons choisi dans notre étude ces modèles pour évaluer la performance du modèle de prédiction du retrait de séchage que nous allons proposer.

1.6. 1. Modèle du code ACI-209-92 (American concrete institute)

Le modèle ACI-209 [113] est basé sur les travaux par Branson et christiason. Il est recommandé par l'institut américain du béton 'American concrete institute'. Il a été incorporé dans la plus part des codes du bâtiment dans les Etats-Unis. Le modèle est purement empirique, basé sur les données expérimentales de retrait et de fluage obtenues dans les Etats-Unis. Les formules de retrait et de fluages cédées dans ce modèle représentent le comportement moyen pour des centaines d'échantillons testés.

- Limite d'application du modèle

- L'humidité relative de l'environnement : $40\% \leq HR \leq 100\%$
- Type de ciment : ciment type I et III selon ASTM (RN et RS selon CEB)
- Durée minimale de cure du béton : $t_0 \geq 1$ jours

1.6. 1.1. Evaluation du retrait

Le retrait $\varepsilon_{sh}(t, t')$ a un instant t (jours) mesuré depuis la fin de cure du béton t' (jours), est déterminé par l'expression suivante:

$$\varepsilon_{sh}(t, t') = \frac{t - t'}{B + (t - t')} \varepsilon_{sh\infty} \times k1 \times k2 \quad (1.8)$$

Avec : B: Facteur tenant compte de l'effet de la cure sur le retrait

$$B = \begin{cases} 35 & \text{pour une cure humide à température ambiante } (t' \geq 7 \text{ jours}) \\ 55 & \text{pour une cure sèche } (t' \geq \text{de } 1 \text{ à } 3 \text{ jours}) \end{cases}$$

$$\varepsilon_{sh\infty}: \text{déformation de retrait ultime : } \varepsilon_{sh\infty} = 780.10^{-6} \quad (1.9)$$

K1: facteur tenant compte de l'effet des dimensions de la pièce sur le retrait

$$k1 = 1,14 - 0.0035 / (V/S) \quad (V/S \text{ en mm}) \quad (1.10)$$

K_2 : facteur tenant compte de l'effet de l'humidité relative sur le retrait

$$K_2 = \begin{cases} 1,4 - 0,01 \times HR & \text{si } 40\% \leq HR \leq 80\% \\ 3,0 - 0,03 \times HR & \text{si } 80\% \leq HR \leq 100\% \end{cases} \quad (1.11)$$

HR: humidité relative (%)

1.6.1.2. Evaluation du fluage

La déformation de fluage $\varepsilon_{fl}(t)$ évolué en fonction de la valeur du coefficient de fluage $\varphi(t, t_0)$ (eq 1.12), ce dernier est définie par les paramètres d'intervalle de temps $(t-t_0)$ et du coefficient de fluage ultime ($\varphi_{\infty}(t_0)$) (eq 1.13) :

$$\varepsilon_{fl}(t) = \frac{\sigma(t)}{E(t')} \varphi_{\infty}(t, t') \quad (1.12)$$

$$\varphi(t, t') = \frac{(t-t')^{0.6}}{10+(t-t')^{0.6}} \varphi_{\infty}(t') \quad (1.13)$$

$\varphi_{\infty}(t')$: Coefficient de fluage ultime

$$\varphi_{\infty}(t') = 2.35 K_1^c(t') K_2^c K_3^c K_4^c K_5^c K_6^c \quad (1.14)$$

Avec : K_1^c est un facteur tenant compte de l'effet de l'âge au chargement sur le fluage

$$K_1^c = \begin{cases} 1.25(t')^{-0.118} & \text{Pour une cure humide à température ambiante } (t_0 \geq 7 \text{ jours}) \\ 1.13(t')^{-0.095} & \text{Pour une cure immergée ou à 100\% HR } (t_0 \geq 1 \text{ jours}) \end{cases} \quad (1.15)$$

$$(1.16)$$

K_2^c : Facteur tenant compte de l'effet de l'humidité relative sur le fluage

$$K_2^c = 1.27 - 0.0067 \times HR \quad (\text{HR en pourcentage}) \quad (1.17)$$

K_3^c : facteur tenant compte de l'effet des dimensions de la pièce sur le fluage

$$K_3^c = \begin{cases} 1.14 - 1.47 \times d_{\min} & \text{Pour } t - t' \leq 365 \text{ jours} \\ 1.10 - 1.09 \times d_{\min} & \text{Pour } t - t' > 365 \text{ jours} \end{cases} \quad (1.18)$$

$$(1.19)$$

$$d_{\min} = 2V/S \text{ est l'épaisseur minimale de l'élément de béton (en mm)} \quad (1.20)$$

K_4^c : Facteur tenant compte de l'effet de l'affaissement sur le fluage

$$K_4^c = 0.082 - 0.17 \times S \quad \text{Avec } S \text{ la valeur du slump du béton frais} \quad (1.21)$$

K_5^c : Facteur tenant compte de l'effet de dimensions des granulats sur le fluage

$$K_5^c = 0.088 - 0.024 \times \left(\frac{f}{a}\right) \quad \text{Avec } \frac{f}{a} = \frac{\text{fines granulats}}{\text{total granulats}} \text{ en poids} \quad (1.22)$$

$$K_5^c = \begin{cases} 1.0 & \text{Pour } A \leq 6\% \\ 0.46 - 0.09 \times A & \text{Pour } A > 6\% \end{cases} \quad (1.23)$$

Avec A air occlus (%) ($A \geq 1$)

Le module élastique $E(t')$ à l'âge de chargement du béton est fournie par la relation suivante :

$$E(t') = E(28) \left(\frac{t'}{\alpha + \beta t'} \right)^{1/2} \quad (1.25)$$

Avec ; α et β sont deux paramètres dépendants de la classe du ciment portland et du type de cure :

Pour cure humide à température ambiante :

$$\alpha = 4.0 \text{ et } \beta = 0.85 \quad \text{Pour un ciment normal (R ou type ASTM I)} \quad (1.26)$$

$$\alpha = 2.3 \text{ et } \beta = 0.92 \quad \text{Pour un ciment haute résistance (RS ou type ASTM III)} \quad (1.27)$$

Pour cure en étuve en atmosphère humide:

$$\alpha = 1.0 \text{ et } \beta = 0.95 \quad \text{Pour un ciment normal (R ou type ASTM I)} \quad (1.28)$$

$$\alpha = 0.7 \text{ et } \beta = 0.98 \quad \text{Pour un ciment haute résistance (RS ou type ASTM III)} \quad (1.29)$$

Le module élastique à l'âge 28 jours peut être calculé en fonction de la résistance à 28 jours (eq 1.30), soit estimé par essai, soit à partir de la résistance calculé.

$$E(28) = 4734 \sqrt{f_{c28}} \quad (1.30)$$

1.6. 2. Modèle du code CEB 90 (Comité Euro-Internationale du béton)

Le modèle du code CEB-90 [114] est recommandé par le modèle CEB-FIP code 1990 (comité euro international du béton et la fédération internationale pour la précontrainte). Ses premières versions sont les modèles CEB-FIP 1970 [115] et CEB-FIP 1978 [116].

- Limite d'application du modèle

- L'humidité relative de l'environnement : $40\% \leq HR \leq 100\%$
- Résistance du béton : $15 \text{ MPa} \leq f_c \leq 60 \text{ MPa}$
- La contrainte appliquée : $\sigma \leq 45\% \times \bar{f}_c$
- Durée minimale de cure du béton : $t_0 \geq 0.5$ jours

1.6.2.1. Evaluation de retrait :

Le retrait total à un instant t (jours) considéré depuis le début de retrait t' (jours) est estimé par :

$$\varepsilon_{cs}(t, t') = \varepsilon_{cs0} B_s(t - t') \quad (1.31)$$

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

$$B_s(t - t') = \left[\frac{(t - t')}{350(h_0/100)^2 + (t - t')} \right]^{0,5} \quad (1.32)$$

$$h_0 = 2 \times \frac{A_c}{u} \quad (\text{cm}) \quad \text{représente l'épaisseur fictive de la pièce (mm)} \quad (1.33)$$

Où : A_c est la section transversale de la pièce (mm^2) et μ : périmètre de la pièce en contact avec l'atmosphère (mm)

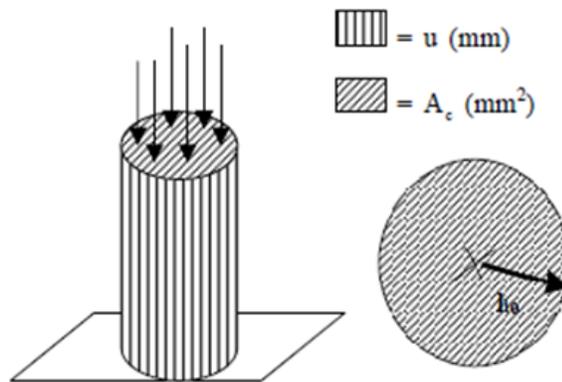


Figure 1.37 : Représentation du rayon moyen h_0

ε_{cs0} : le retrait ultime est exprimé par :

$$\varepsilon_{cs0} = \varepsilon_{cs}(f_{cm}) \times B_{RH} \quad (1.34)$$

Avec :

$$\varepsilon_{cs}(f_{cm}) = [160 + 10 \times B_{cs} \times (9 - f_{cm}/10)] \times 10^{-6} \quad (1.35)$$

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

$$B_{cs} = \begin{cases} 4 & \text{pour ciment à prise lente (S).} \\ 5 & \text{Ciment à prise normal ou rapide (N, R)} \\ 8 & \text{Ciment à prise rapide et haute résistance (RS).} \end{cases}$$

B_{RH} : coefficient qui exprime l'effet de l'humidité

$$\begin{cases} B_{RH} = -1,55 B_{SRH} & \text{pour } 40\% \leq RH \leq 99\% \\ B_{SRH} = 0,25 & \text{pour } RH \geq 99\% \end{cases} \quad (1.36)$$

$$\text{Avec : } B_{SRH} = 1 - \left(\frac{RH}{100} \right)^3 \quad (1.38)$$

f_{cm} : la résistance moyenne en compression du béton à 28 jours (MPa).

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

1.6.2.2. Evaluation du fluage

La déformation de fluage $\varepsilon_{fl}(t)$ à un instant t (jours) sous l'effet de la contrainte appliquée $\sigma(t)$ est déterminée par l'expression suivante :

$$\varepsilon_{fl}(t) = \frac{\sigma(t)}{E(t_0)} \phi(t, t_0) \quad (1.39)$$

Avec : $\phi(t, t')$ est le coefficient de fluage au temps t depuis l'âge de chargement t_0 :

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \times \beta_c(t-t_0) \quad (1.40)$$

ϕ_0 : coefficient de fluage ultime :

$$\phi_0 = \phi_{RH} \times \beta(\bar{f}_c) \times \beta(t_0) \quad (1.41)$$

ϕ_{RH} : facteur tenant compte de l'humidité relative sur le fluage ultime

$$\phi_{RH} = 1 + \frac{1-RH/100}{0.10 \times \sqrt[3]{h_0}} \quad \text{pour } f_{cm} \leq 35 \text{ MPa} \quad (1.42)$$

$$\phi_{RH} = \left[1 + \frac{1-RH/100}{0.10 \times \sqrt[3]{h_0}} \times \alpha_1 \right] \times \alpha_2 \quad \text{pour } f_{cm} > 35 \text{ MPa} \quad (1.43)$$

h_0 est donné par l'équation (1.33)

$$\beta(\bar{f}_c) = \frac{5.3}{(\bar{f}_c/10)^{0.5}} \quad (1.44)$$

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0.1 + (t_0/t_1)^{0.2}} \quad (1.45)$$

$$\beta(t-t_0) = \left[\frac{(t-t_0)/t_1}{(t-t_0)/t_1 + \beta_H} \right]^{0.3} \quad (1.46)$$

Avec $t_1 = 1$ jours et β_H dépend de l'humidité relative et de rayon moyen de l'élément.

$$\beta_H = 1.5 \times [1 + (0.012 \times RH)^{18}] \times h_0 + 250 \quad ; \text{ avec } \beta_H \leq 1500 \quad \text{pour } \bar{f}_c \leq 35 \text{ MPa} \quad (1.47)$$

$$\beta_H = 1.5 \times [1 + (0.012 \times RH)^{18}] \times h_0 + 250 \times \alpha_3 \quad ; \text{ avec } \beta_H \leq 1500 \times \alpha_3 \quad \text{pour } \bar{f}_c > 35 \text{ MPa} \quad (1.48)$$

$$\alpha_1 = [35/\bar{f}_c]^{0.7} \quad (1.49)$$

$$\alpha_2 = [35/\bar{f}_c]^{0.2} \quad (1.50)$$

$$\alpha_3 = [35/\bar{f}_c]^{0.5} \quad (1.51)$$

Le module élastique du béton au moment de chargement t' :

$$E_c(t) = E_{cm} \times \left[e^{s \times \left(1 - \left[\frac{28}{t/t_1} \right]^{0.5} \right)} \right]^{0.5} \quad (1.52)$$

$$E_{cm}(t) = 9.98 \times (\bar{f}_c)^{1/3} \times (B_{cct})^{1/6} \quad (1.53)$$

$$s = \begin{cases} 0.38 & \text{Pour les ciments à prise lente (S selon CEB)(I selon ASTM)} \\ 0.28 & \text{Pour les ciments à prise normale ou rapide (N ou R selon CEB)(II selon ASTM)} \\ 0.20 & \text{Pour les ciments à prise rapide et à haute résistance (RS selon CEB)(III selon ASTM)} \end{cases}$$

\bar{f}_c : résistance en compression

L'effet de type de ciment peut être introduit par la modification de temps t_0 :

$$t_0 = \left[1 + \frac{9}{2 + (t_0)^{1.2}} \right]^\alpha \times t_0 \quad (1.54)$$

Avec :

$$\alpha = \begin{cases} -1 & \text{Pour les ciments à prise lente (S selon CEB)(I selon ASTM)} \\ 0 & \text{Pour les ciments à prise normale ou rapide (N ou R selon CEB)(II selon ASTM)} \\ 1 & \text{Pour les ciments à prise rapide et à haute résistance (RS selon CEB)(III selon ASTM)} \end{cases}$$

1.6.3. Modèle B3-2000 (Bazânt)

Le modèle B3 [117] est la dernière version de plusieurs méthodes de prédiction de retrait et de fluage. Il a été développé par Bazant et Baweja en 1997. La première version de ce modèle a été proposée en 1978 [118] et appelée le modèle BP. Il a été modifié en 1991 et nommé le modèle BP-KX [119]. La version développée du modèle B3 est plus simple que du modèle BP-KX.

- Limite d'application du modèle

- L'humidité relative de l'environnement : $40\% \leq HR \leq 99\%$
- Résistance du béton : $17 \text{ MPa} \leq f_c \leq 70 \text{ MPa}$
- Durée minimale de cure du béton : $t_0 = 1$ jours
- $\sigma \leq 45\% \times \bar{f}_c$
- Dosage en ciment : $160 \text{ kg/m}^3 \leq c \leq 720 \text{ kg/m}^3$
- Rapport e/c : $0.35 \leq e/c \leq 0.85$
- Dosage en granulats : $2.5 \leq g/c \leq 13.5$

1.6.3.1. Evaluation du retrait :

La déformation de retrait au temps t est déterminée par l'expression :

$$\varepsilon_{Sh}(t, t') = -\varepsilon_{Sh\infty} K_h S(t) \quad (1.55)$$

$\varepsilon_{Sh\infty}$: la déformation de retrait ultime exprimée par

$$\varepsilon_{Sh\infty} = -\alpha_1 \alpha_2 (0,019(w)^{2,1} (f_{cm})^{-0,28} + 270) \times 10^{-6} \quad (1.56)$$

w : est le dosage en eau (kg/m^3)

f_{cm} : la résistance en compression du béton à 28 jours (MPa).

α_1 et α_2 qualifient respectivement le type de ciment et le mode de cure du béton.

$$\alpha_1 = \begin{cases} 1 & \text{ciment type I} \\ 0,85 & \text{ciment type II} \\ 1,1 & \text{ciment type III} \end{cases}$$

$$\alpha_2 = \begin{cases} 0,75 & \text{cure humide.} \\ 1,0 & \text{béton curé dans l'eau ou à humidité relative 100\%} \\ 1,2 & \text{béton étanche pendant le séchage} \end{cases}$$

K_h : coefficient d'humidité

$$K_h = \begin{cases} 1-(h)^3 & \text{pour } HR \leq 98\% \\ -0,2 & \text{pour } HR = 100\% \text{ (béton immergé)} \\ \text{Interpolation linéaire} & \text{pour } 98\% \leq HR \leq 100\%. \end{cases} \quad (1.57)$$

h : humidité relative

$$S(t) : \text{fonction du temps : } S(t) = \tanh \sqrt{\frac{t-t'}{\tau_{sh}}} \quad (1.58)$$

Avec τ_{sh} est le temps mis pour atteindre la moitié du retrait (jours)

$$\tau_{sh} = k_t \times [2 \times k_s (V/S)]^2 \quad (1.59)$$

$$k_t = 8,5 \times (t_0)^{-0,08} \times (f_c)^{-1/4} \text{ (en jours /cm}^2\text{)} \quad (1.60)$$

$k_s = 1$ (plaque infinie), 1.15 (cylindre infinie), 1.25 (prisme infini), 1.30 (sphère), 1.55 (cube)

1.6.3.2. Evaluation du fluage

La déformation de fluage totale $\varepsilon_{fl}(t)$ se divise suivant un terme de complaisance de fluage propre et de fluage de dessiccation :

$$\varepsilon_{fl}(t) = \sigma(t) \times J(t, t_0) \quad (1.61)$$

$$\text{Avec : } J'(t, t_0) = C_0(t, t_0) + C_d(t, t_0, t_c) \quad (1.62)$$

$C_0(t, t')$: fonction de fluage propre (10^{-6} /psi)

$C_d(t, t', t_0)$: fonction de fluage de dessiccation (10^{-6} /psi)

- La déformation de fluage propre

$$\varepsilon_{flp}(t) = \sigma(t) \times C_0(t, t_0) \quad (1.63)$$

$$C_0(t, t_0) = q_2 Q(t, t_0) + q_3 + \times \ln[1 + (t - t_0)^n] + q_4 \ln(t/t_0) \quad (1.64)$$

Avec : q_2 est le fluage viscoélastique dû au vieillissement

$$q_2 = 185.4 \times 10^{-6} \times c^{0.5} \times \bar{f}_c^{-0.9} \quad (1.65)$$

$$Q(t, t_0) = Q_f(t_0) \times \left[1 + \left(\frac{Q_f(t_0)}{Z(t, t_0)} \right)^{r(t_0)} \right]^{1/r(t_0)} \quad (1.66)$$

$$\text{Où } Q_f(t_0) = [0.086 \times (t_0)^{2/9} + 1.21 \times (t_0)^{4/9}]^{-1} \quad (1.67)$$

$$Z(t, t_0) = (t_0)^{-0.5} \times \ln[1 + (t - t_0)^{0.1}] \quad (1.68)$$

$$r(t_0) = 1.7 \times (t_0)^{0.12} + 8 \quad (1.69)$$

q_3 : fluage viscoélastique indépendant du vieillissement

$$q_3 = 0.29 \times q_2 \times (e/c)^4 \quad (1.70)$$

q_4 : fluage irréversible

$$q_4 = 20.3 \times 10^{-6} \times (a/c)^{-0.7} \quad (1.71)$$

e: contenu en eau du béton (Kg/m^3)

a: contenu en granulats du béton (Kg/m^3)

c: contenu en ciment du béton (Kg/m^3)

- La déformation de fluage de dessiccation

$$\varepsilon_{fld}(t) = \sigma(t) \times C_d(t, t_0, t_c) \quad (1.72)$$

$$C_d(t, t', t_0) = q_5 \times [e^{(-8H(t))} - e^{(-8H(t_0))}]^{1/2} \quad (1.73)$$

$$q_5 = 0.757 \times (f_{cm})^{-1} \times [\varepsilon_{sh\infty} \times 10^6]^{-0.6} \quad (1.74)$$

$\varepsilon_{sh\infty}$ est la déformation de retrait ultime déterminée par l'équation (1.56)

$$H(t) = 1 - (1-h) S(t) \quad (1.75)$$

$$H(t_0) = 1 - (1-h) S(t_0)$$

Avec $S(t)$ et $S(t_0)$ fonctions de temps déterminées par l'équation (1.58)

1.6.4. Le modèle GL 2000 (Gardner/Lockman)

Le modèle GL 2000 [120] est une version modifiée du modèle GZ proposée par Gardner et Zhao en 1993 et 1997. Le modèle GL 2000 lui-même a été influencé par le modèle CEB-90, et a été développé pour corriger la relaxation négative à jeune âge après le chargement et le recouvrement de fluage du modèle GZ.

- Limite d'application du modèle

- L'humidité relative de l'environnement : $40\% \leq HR \leq 99\%$
- Résistance du béton : $15 \text{ MPa} \leq f_c \leq 60 \text{ MPa}$
- Durée minimale de cure du béton : $t_0 \geq 0.5$ jours

1.6.4.1. Evaluation du retrait :

$$\varepsilon_{sh}(t, t') = \varepsilon_{sh\infty} \cdot \beta(h) \cdot \beta(t) \quad (1.76)$$

$\varepsilon_{sh\infty}$: Le retrait ultime donné par la formule :

$$\varepsilon_{sh}(t, t') = 1000 \cdot K \cdot \left(\frac{30}{f_{cm28}} \right)^{0,5} \times 10^{-6} \quad (1.77)$$

K : dépend du type de ciment :

$$K = \begin{cases} 1 & \text{ciment type I} \\ 0,75 & \text{ciment type II} \\ 1,15 & \text{ciment type III} \end{cases}$$

f_{cm28} : la résistance de compression du béton à 28 jours (MPa).

$\beta(h)$: Le coefficient qui exprime l'effet de l'humidité :

$$\beta(h) = 1 - 1,18 \cdot (RH)^4 \quad (1.78)$$

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

La fonction du temps proposé par le modèle est :

$$\beta(t) = \left(\frac{t - t'}{t - t' + 19,25 \times (V/S)^{0,5}} \right) \quad (1.79)$$

Avec V/S est le rapport volume sur surface en mm

1.6.4.2. Evaluation du fluage

$$\varepsilon_{fl}(t) = \sigma(t) \times J(t, t_0) \quad (1.80)$$

Avec $J(t-t_0)$: valeur de la fonction de fluage au temps t (MPa^{-1}):

$$J(t, t_0) = \frac{\phi}{E_{cmt}} \quad (1.81)$$

E_{cmt} est le module élastique du béton :

$$E_{cmt} = 3500 + 4300 \times \sqrt{f_{cmt}} \quad (1.82)$$

$$f_{cmt} = f_{cm28} \times \frac{t^{3/4}}{a+b \times t^{3/4}} \quad (1.83)$$

$$f_{cm28} = 1.1 f_{ck28} + 5 \quad (1.84)$$

ϕ : Coefficient de fluage donné par l'expression :

$$\phi = \varphi(t') \left[2 \times \frac{(t-t_0)^{0.3}}{(t-t_0)^{0.3}+14} + \left[\frac{7}{t_0} \right]^{0.5} \left[\frac{(t-t_0)}{(t-t_0)+7} \right]^{0.5} + 2.5(1 - 1.08 \times h^2) \left[\frac{(t-t_0)}{(t-t_0)+0.12 \times \left[\frac{V}{S} \right]^2} \right] \right] \quad (1.85)$$

$$\text{Si } t_0 = t' \Rightarrow \varphi(t') = 1 \quad (1.86)$$

$$\text{Si } t_0 > t' \Rightarrow \varphi(t') = \left[1 - \left(\frac{(t-t_0)}{(t-t_0)+0.12 \times \left[\frac{V}{S} \right]^2} \right)^{0.5} \right]^{0.5} \quad (1.87)$$

t_0 : âge du béton au chargement (jours)

t' : âge du béton au début du retrait (jours)

1.7. Conclusion

L'analyse bibliographique a montré que le comportement différé du béton s'avère être délicat vue la complexité des nombreux phénomènes qui l'affectent. La pâte de ciment présente le siège des déformations différées observées sur les bétons. Comme nous l'avons détaillé au paragraphe 1.2, l'hydratation du ciment est un phénomène complexe au cours duquel les différentes phases du matériau s'hydratent selon des cinétiques très différentes. La pâte de ciment hydratée ordinaire contient 50 à 70% de C-S-H et 25 à 27 % de Ca(OH)_2 . La phase C-S-H qui reste mal définie est donc la phase majoritaire dont dépend l'évolution des caractères physiques et plus particulièrement les propriétés mécaniques du matériau.

Nous avons aussi vu que le séchage est un phénomène lent et complexe. Il induit un fort déséquilibre hygrométrique dans le béton. En plus, ces conséquences sont nombreuses ; A part ces effets sur les propriétés mécaniques, et bien que ces effets (sur les propriétés mécaniques) semblent contradictoires d'un auteur à l'autre, mais ils sont tous d'accord qu'il est à l'origine de retrait et de fluage de dessiccation. Et qui sont à leurs tours les phénomènes qui attirent l'esprit de plusieurs chercheurs jusqu'à présent.

L'analyse bibliographique portée sur le retrait et le fluage a mis en évidence la complexité de ce phénomène vu de nombreux mécanismes mis en jeu et le couplage entre ces mécanismes. Il se produit à différentes échelles de la pâte de ciment. Et vu l'hétérogénéité du béton, le phénomène devient plus compliqué. En outre, les déformations sous charge du béton sont difficiles à analyser car le béton est un matériau possédant une certaine hétérogénéité dont les propriétés évoluent suivant les conditions du milieu, l'étude du phénomène se complique par la superposition d'autres contraintes dues par exemple au retrait. Au très jeune âge du béton, le retrait thermique et le retrait endogène sont prépondérants car ils se développent très rapidement pendant les premiers jours. Pour les limiter, il est possible d'adapter les compositions de béton utilisées et de choisir le type de coffrage adéquat. Le retrait endogène est négligeable pour le béton ordinaire. Par contre le retrait de dessiccation est important et plus difficile de le limiter en pratique.

A la vue de ces constatations, il semble que la modélisation de retrait et de fluage sous différentes conditions et pour les différentes compositions n'est pas une tâche facile, et vu la complexité des mécanismes réels et son couplage et sa sensibilité aux mécanismes apparents, la modélisation basée sur des considérations physiques, chimiques ou mécaniques (mécanismes réels) devient délicate. Ce qui nous a fait penser d'adopter une modélisation qui se base sur une analyse statistique, en limitant notre travail à la modélisation du retrait de séchage.

CHAPITRE 2

DEVELOPEMENT D'UN NOUVEAU MODELE DE PREDICTION DE RETRAIT DE SECHAGE DU BETON

2.1. Introduction

Dans les divers domaines de la science, on a souvent à expliquer et/ou à analyser des phénomènes dont on ne connaît le comportement qu'à partir des mesures expérimentales. Pour cette raison, il est intéressant de synthétiser un modèle mathématique dont le comportement est analogue au phénomène réel. La connaissance des paramètres du modèle et des conditions de l'expérience des phénomènes permet de proposer un modèle mathématique nommé modèle déterministe. Mais dans la plupart des cas, on ignore le mécanisme précis du phénomène. On peut alors concevoir un modèle statistique dont on estimera les paramètres à partir des échantillons de mesures.

Ce chapitre présente une analyse de l'influence de certains facteurs (de formulation de béton et des conditions de fabrication) sur l'amplitude de retrait de séchage du béton de résistance normale sans adjuvants et sans ajouts. Cette analyse vise à déterminer une expression mathématique de chaque facteur influant le retrait pour former un modèle. Donc le modèle recherché se base sur une analyse statistique quantitative.

2.2. Principe de modélisation

La statistique permet d'étudier des phénomènes complexes à partir de fait constaté. Une enquête, une série d'expérience ou un extrait d'une base de données constituent le champ à expliquer. Les méthodes statistiques d'analyse des données se divisent en trois grandes classes [121]: les méthodes explicatives, les méthodes descriptives, et les méthodes de prévision.

Dans **les méthodes explicatives** on cherche à relier une variable à expliquer à des variables explicatives. Il s'agit d'ajuster sur les données disponibles un modèle dont la forme dépend de la nature de la réponse. Dans le cas d'une réponse numérique, la liaison est plus souvent linéaire.

Les méthodes descriptives s'appliquent en particulier à toutes les variables qui jouent le même rôle. Il s'agit de mesurer les données et de prendre les grandes dimensions du phénomène étudié. L'objectif des méthodes descriptives est de visualiser et classer les données.

La modélisation et la prévision statistique : Cette méthode consiste généralement à rechercher une relation approximative entre une variable et plusieurs autres. La forme de cette relation étant le plus souvent linéaire. Lorsque la variable à expliquer ou à prévoir est numérique ainsi que les variables explicatives, on parle de régression linéaire. Si certaines variables explicatives sont qualitatives le modèle linéaire général en est une extension. Lorsque l'on cherche à prévoir qualitativement on utilisera une méthode de discrimination.

Un modèle mathématique ne provient pas d'une théorie, il est issu de l'exploration de données et réalise un bon ajustement en faisant varier les paramètres jusqu'à obtenir les meilleures prédictions, c'est-à-dire qu'il ne s'agit pas forcément de comprendre mais de prévoir du mieux possible. Pour nous, ça ne suffit pas car le choix des paramètres à étudier doit être en accord avec les théorèmes qui expliquent le phénomène, sinon on est très loin de la modélisation.

2.3. Modélisation du retrait du béton

Comme il est indiqué dans le chapitre précédent, l'amplitude de la déformation de retrait dépend de plusieurs facteurs : l'humidité relative de l'environnement, la composition du béton, les dimensions des pièces, les conditions de fabrication et de conservation du béton. La complexité de ce sujet réside dans l'effet combiné des paramètres désignés sur la stabilité de la déformation de retrait et qui reste inconnue [122-124]. En plus, la complexité des phénomènes mis en jeu (pression de disjonction, pression capillaire et la tension de surface) et leurs effets sur les propriétés des matériaux cimentaires rend difficile le développement d'un modèle

théorique qui tient compte de tous les facteurs qui influent sur le comportement différé du béton. Pour estimer l'effet de retrait sur le comportement des structures à long terme, il est nécessaire de déterminer la grandeur de cette déformation aux différents âges. Généralement il n'y a pas de données à long terme pour une formulation du béton sélectionnée à l'étape de conception. Sous cette et d'autres circonstances, les concepteurs s'appuient sur la précision globale d'un modèle de prédiction choisie. D'après Acker et Ulm [12], le retrait final n'a pas une grande importance que l'évolution de retrait dans le temps. Bazant [124] indique *“la formulation d'un modèle de prédiction global est une tâche très difficile. Compte tenu de la connaissance limitée, le problème de la formulation du modèle n'a pas de réponse unique, probablement différents modèles peuvent décrire l'état actuel des connaissances aussi bien”*.

La précision de prédiction de la déformation du retrait dépend de la forme de la fonction du temps et des paramètres utilisés. Les facteurs affectant le retrait sont nombreux, la prise en compte conduit à un model très compliqué et pas assurément plus précis. McDonald et Roper [110] indiquent que les modèles de prédiction de retrait qui regroupent plusieurs paramètres ne donnent pas nécessairement une meilleure précision que les modèles simples. L'introduction de quelques facteurs tels que le rapport E/C, qualité des granulats et la quantité d'air dans le béton ne conduit pas certainement à l'amélioration de la précision d'un modèle.

Dans ce chapitre nous voulons formuler un modèle empirique pour estimer la déformation de retrait de séchage du béton de résistance normale, en se basant sur les résultats expérimentaux disponibles dans la littérature. Pour construire cette équation il est nécessaire d'analyser la variation de retrait en fonction des facteurs qui ont une influence considérable sur l'amplitude de retrait de séchage et qui sont :

- 1- Les dimensions des pièces et temps de séchage.
- 2- L'humidité relative de l'environnement
- 3- La composition du béton (volume de la pâte de ciment et type de ciment)
- 4- Les conditions de conservation (type et période de cure)

2.3.1. Effet des dimensions des pièces

L'effet d'échelle est une question récurrente dans l'étude du comportement des structures. Pour un physicien, cet effet est souvent considéré comme un effet secondaire, difficile à éliminer dans les essais. Cela focalise systématiquement les mesures réalisées sur les vrais objets. La géométrie d'une structure constitue une des explications possibles de l'effet d'échelle (exemple : le séchage provoque un gradient d'humidité à l'intérieur du béton et par conséquent un effet structural).

Pour l'ingénieur un modèle quantitatif est nécessaire pour étudier ou analyser une structure. Les essais dans les laboratoires sont pratiquement limités soit par les dimensions des échantillons, soit par la durée d'essai (l'âge du matériau au moment d'observation). Deux fatalités qui exigent de nous à penser à l'extrapolation des données expérimentales disponibles pour évaluer le comportement des structures à long terme (analyse et vérification des structures, évaluation de leur vie, etc.) ou pour l'extrapolation d'une loi d'évolution du comportement à long terme, et extrapolation d'une loi d'échelle pour les grandes pièces.

Dans cette étape, qui représente le point de départ du nouveau modèle de prédiction de retrait de séchage, nous analysons la variation du retrait de séchage mesuré par certains chercheurs en fonction de dimensions des éprouvettes et en fonction du temps de séchage.

2.3.1.1. Essai de F.Alou

A. Données de l'essai – série 1 [55]

Dans la fabrication des bétons, un seul type de granulats et un seul ciment ont été utilisés. Les granulats étaient en 5 classes, essentiellement calcaire. Le ciment utilisé était un ciment portland normal (CPN) (finesse : $\approx 3000 \text{ cm}^2/\text{g}$).

Tous les bétons ont été confectionnés avec un malaxeur forcé afin d'obtenir des mélanges suffisamment homogènes. Les éprouvettes ont été conservées pendant 7 jours dans leurs moules (étanches) à $T = 18 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, puis exposées à $T = 18 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ et $\text{HR} = 65 \pm 5 \%$. Les diamètres des éprouvettes sont de 100, 150, 200, 250, 300, 400

et 500 mm et de longueur constante 1000 mm de. Les caractéristiques du béton étudié sont présentées dans le tableau 2.1 suivant

Tableau 2.1 : Caractéristiques du béton de la série 1 – Essai de F. Alou [55]

Type de Ciment	Ciment (kg/m ³)	E/C	Teneur en air (%)	Masse volumique apparente (kg/m ³)	Affaissement (cm)	f _{c28} (MPa)
RN	332	0,48	1,3	2 430	1	42.5

B. Résultats

Afin d'analyser la variation de la déformation de retrait on trace les valeurs des déformations de retrait en fonction du diamètre des éprouvettes pour plusieurs périodes de séchage.

D'après les résultats schématisés dans la Figure 2.1, il est clair que le retrait tend à diminuer lorsque le diamètre augmente. Cette constatation est en accord avec les résultats de plusieurs chercheurs [37, 55-58, 107, 122-126]. En plus, l'effet de dimension dépend du temps de séchage, lorsque la période de séchage augmente l'effet de dimension diminue. Cette remarque permet de penser qu'il faut introduire les deux facteurs (temps de séchage et l'épaisseur fictive (2V/S) des éprouvettes) dans une seule expression.

Comme première étape nous traçons les courbes de tendance qui s'appuient sur les courbes de retrait mesuré pour les différents âges de béton, et qui ont un coefficient de détermination R² le plus grand (proche de 1). Les résultats schématisés dans la Figure 2.1 montrent que la fonction exponentielle donne une bonne corrélation.

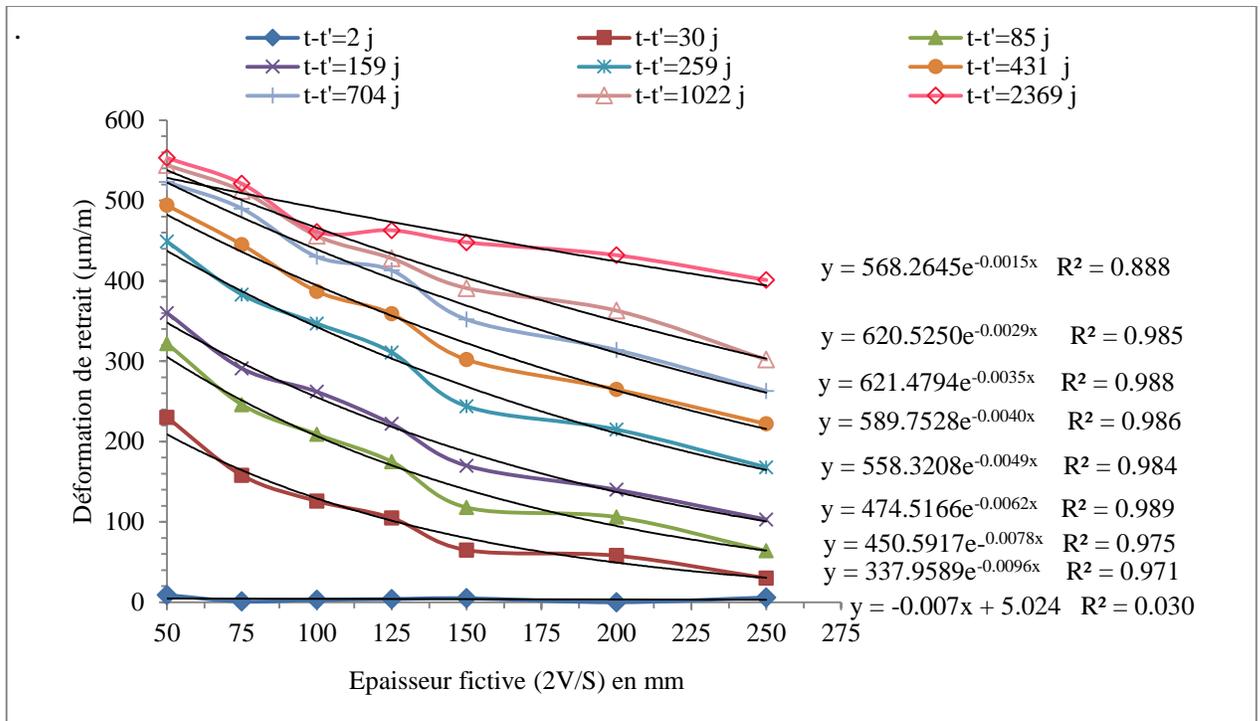


Figure 2.1 : Variation de la déformation de retrait en fonction de l'épaisseur fictive pour différents temps de séchage – Essai de F.Alou.

C. Détermination de l'équation de la déformation de retrait :

Pour les différents âges, les équations qui expriment la variation du retrait en fonction de l'épaisseur fictive (2V/S) présentées dans la Figure 2.1 sont regroupées dans le Tableau 2.2.

Nous analysons la variation de retrait à partir du temps de séchage $t = 30$ jours

Tableau 2.2. : Equations de courbes de tendance des déformations de retrait en fonction de l'épaisseur fictive (2V/S)- Essai de F.Alou

t-t' (jours)	Fonction	R ²
30	$337,96e^{-0,0096x}$	0,9714
85	$450,59e^{-0,0078x}$	0,9752
159	$474,52e^{-0,0062x}$	0,989
259	$558,32e^{-0,0049x}$	0,984
431	$589,75e^{-0,0040x}$	0,9866
704	$621,48e^{-0,0035x}$	0,9888
1022	$620,53e^{-0,0029x}$	0,9851
2369	$568,26e^{-0,0015x}$	0,888

Les équations des courbes de tendance ont la forme suivante :

$$\varepsilon_r = A \times e^{-BX} \quad (2.1)$$

Avec $X = 2V/S$

Pour déterminer l'équation de la déformation de retrait il suffit de déterminer les expressions des deux coefficients A et B de l'équation (2.1). Nous commençons par le coefficient B où nous traçons ses valeurs (tirées des équations schématisées sur Figure 2.1 et présentées dans Tableau 2.2) en fonction du temps comme il est représenté dans la Figure 2.2, et on détermine l'équation de la courbe de tendance :

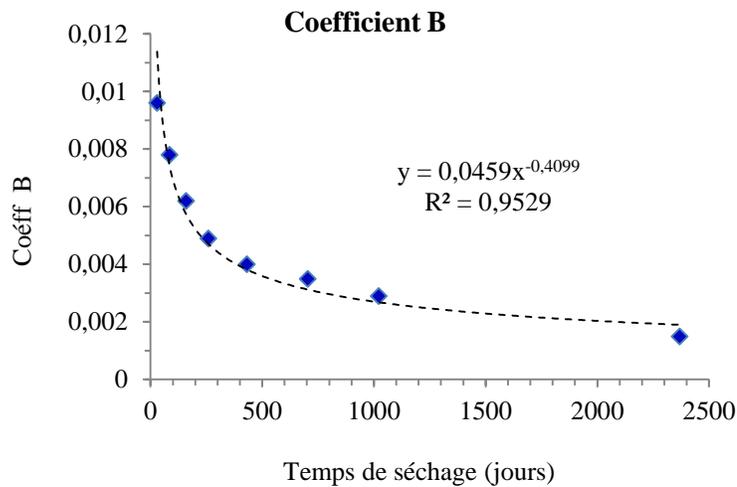


Figure 2.2 : Variation du coefficient B en fonction du temps de séchage - Essai de F.Alou.

Le résultat présenté sur la Figure 2.2 indique que le coefficient B varie en fonction du temps, la courbe de tendance obtenue a l'expression suivante :

$$B = 0,0459 \times (t-t')^{(-0,4099)} \quad (2.2)$$

D'après les valeurs obtenues de A (Tableau 2.1), il semble que les deux dernières valeurs de A diminuent au lieu d'augmenter, et dans ce cas la loi d'évolution de A n'est pas claire. Pour résoudre ce problème, au lieu d'analyser la variation de A en fonction de t-t', on garde la même forme d'équation précédente

(2.2) et on trace les valeurs de A en fonction de $[1/(t-t')^{0,4099}]$ comme il est présenté sur la Figure 2.3.

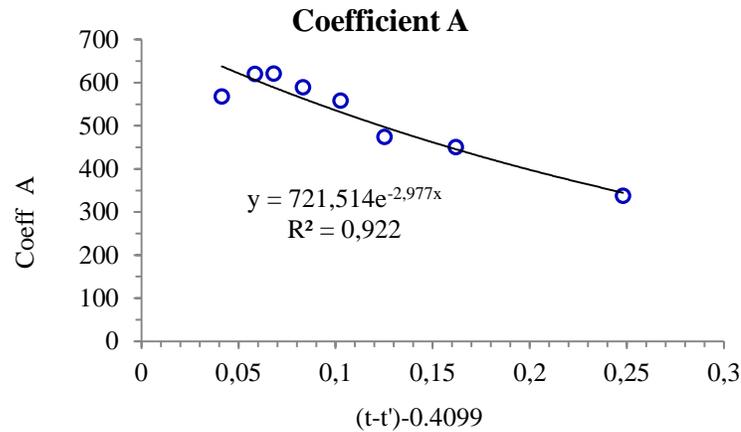


Figure 2.3 : Variation du coefficient A en fonction de $(t-t')^{-0.4099}$ - Essai de F.Alou.

L'équation de coefficient A déterminée a la forme suivante :

$$A = 721.514 \times e^{\left[\frac{-2.977}{(t-t')^{0,4099}} \right]} \quad (2.3)$$

Dans l'équation (2.1) nous remplaçons les deux coefficients A et B par ses expressions (équations : 2.2 et 2.3). L'expression de la déformation de retrait basée sur les valeurs de l'essai de F.Alou est comme suit :

$$\varepsilon_r(t, t') = 721.514 \times e^{\left[\frac{-2.977}{(t-t')^{0,4099}} \right]} \times e^{\left[\frac{-0.0459 \times (2 \times V / S)}{(t-t')^{0,4099}} \right]} \quad (2.4)$$

2.3.1.2. Essai de Bazant

A. Données de l'essai [126]

Les éprouvettes testées ont une forme cylindrique de diamètre 83, 160 et 300 mm et une hauteur qui fait deux fois le diamètre. Aucun adjuvant n'a été utilisé. Toutes les éprouvettes sont exposées à HR=65±5% (T=18°C) après une période de cure humide de 7 jours. Les caractéristiques du béton étudié sont regroupées dans le Tableau 2.3.

Tableau 2.3 : Caractéristiques du béton – Essai de Bazant [126]

type de C	Ciment (kg/m ³)	Eau(kg/m ³)	Sable (kg/m ³)	Gravier (kg/m ³)	Densité	S. Blaine	f _{c28} (MPa)
SL	350	168	1007	893	2,418	2900	36,3

B. Résultats

Nous suivons les mêmes étapes de l'essai précédent, nous traçons les valeurs de la déformation de retrait mesurée en fonction de l'épaisseur fictive (2V/S) des éprouvettes et en fonction du temps, comme il est représenté dans la Figure 2.4 ci-dessous.

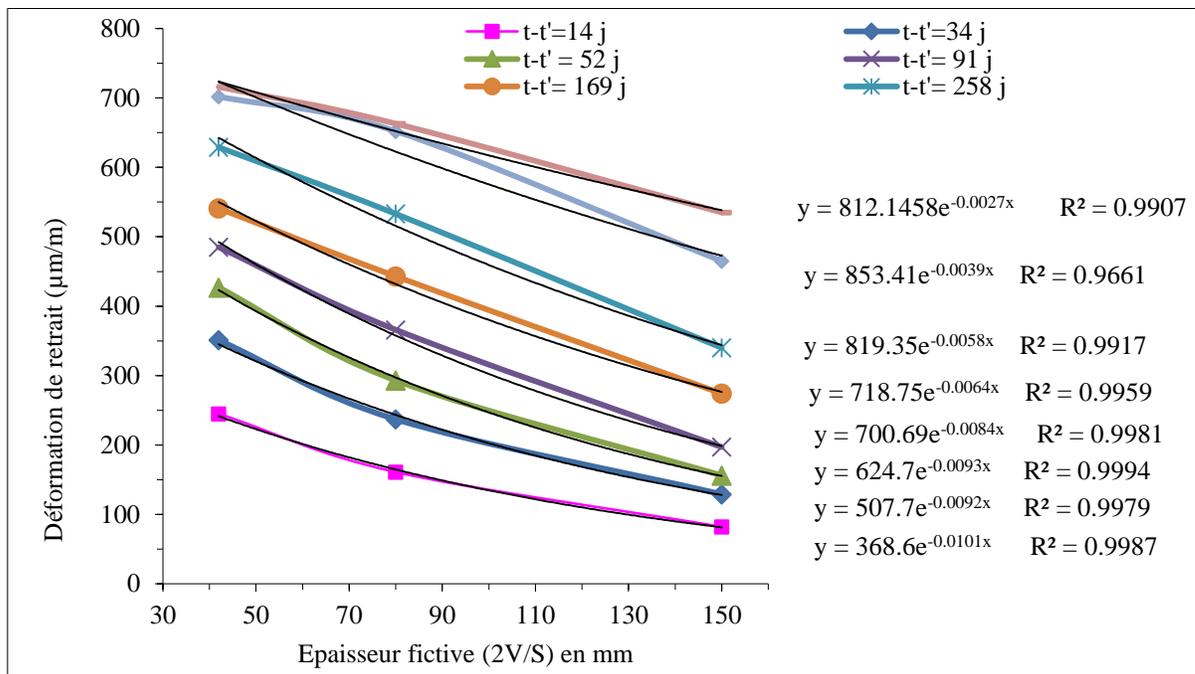


Figure 2.4. Variation de la déformation de retrait en fonction de l'épaisseur fictive pour différents temps de séchage : - Essai de Bazant.

C. Détermination de l'équation de la déformation de retrait :

Les équations tirées de courbes de tendance illustrées dans la Figure 2.4 sont groupées dans le tableau 2.4:

Tableau 2.4 : Equations de courbes de tendance des déformations de retrait en fonction de l'épaisseur fictive (2V/S)- Essai de Bazant

t-t' (jours)	fonction	R ²
14	$368,61e^{-0,0101x}$	0,9987
34	$507,76e^{-0,0092x}$	0,9979
52	$624,74e^{-0,0093x}$	0,9994
91	$700,69e^{-0,0084x}$	0,9981
169	$718,75e^{-0,0064x}$	0,9959
258	$819,35e^{-0,0058x}$	0,9917
554	$853,41e^{-0,0039x}$	0,9661
1105	$812.1458e^{-0,0027x}$	0.9907

Les équations ont la forme suivante :

$$\varepsilon_r = A \times e^{-BX} \quad \text{avec } X = 2V/S$$

Pour déterminer les expressions des coefficients B et A nous suivons les mêmes étapes de l'essai précédent. Les deux Figures 2.5 et 2.6 illustrent les expressions de ces deux coefficients:

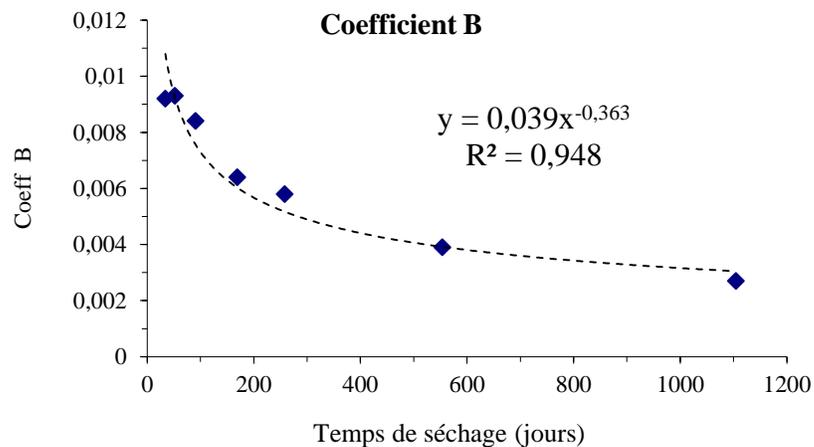


Figure 2.5 : Variation du coefficient B en fonction de temps de séchage - Essai de Bazant.

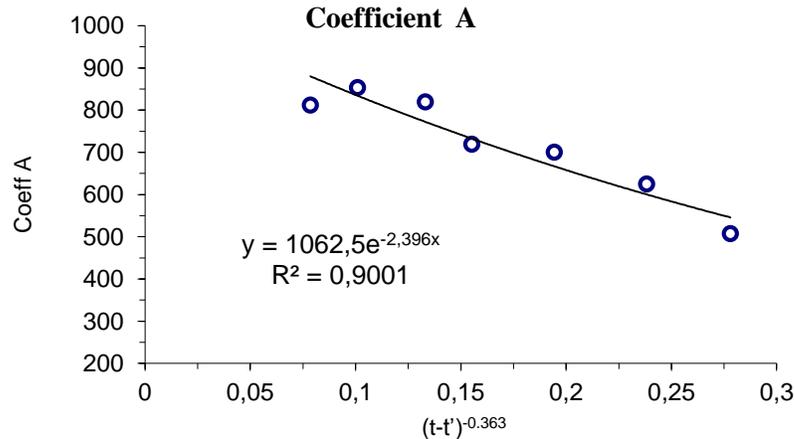


Figure 2.6 : Variation du coefficient A en fonction de $(t-t')^{-0.363}$ - Essai de Bazant.

Donc
$$B = 0.039 \cdot (t-t')^{-0.363} \quad (2.5)$$

$$A = 1206 \times e^{\left[\frac{-2.99}{(t-t')^{0.363}} \right]} \quad (2.6)$$

D'où l'expression de la déformation de retrait qui devient :

$$\varepsilon_r(t, t') = 1206 \times e^{\left[\frac{-2.99}{(t-t')^{0.363}} \right]} \times e^{\left[\frac{-0.039 \times (2 \times V / S)}{(t-t')^{0.363}} \right]} \quad (2.7)$$

2.3.1.3. Essais de Keeton

A. Données de l'essai [126]

Les éprouvettes testées ont une forme cylindrique de diamètre 76, 102 et 152 mm et une hauteur qui fait trois fois le diamètre. Aucun adjuvant n'a été utilisé. La moitié des éprouvettes sont exposées à HR=50% et le reste à HR = 75 % après une période de cure humide de 7 jours. Les caractéristiques du béton étudié sont regroupées dans le Tableau 2.5. Dans cette analyse nous avons utilisé les résultats des bétons exposés à HR =75%.

Tableau 2.5: Caractéristiques du béton – Essai de Keeton [126]

C type	E/C	G/C	Ciment (kg/m ³)	F _{c28} (MPa)	T(°C)
RS (III)	0.46	3.73	425	45.2	23

B. Résultats

Nous suivons les mêmes étapes que pour les deux essais précédents. Les variations des déformations de retrait en fonction de l'épaisseur fictive aux différents temps de séchage sont représentées dans la Figure 2.7 ci-dessous.

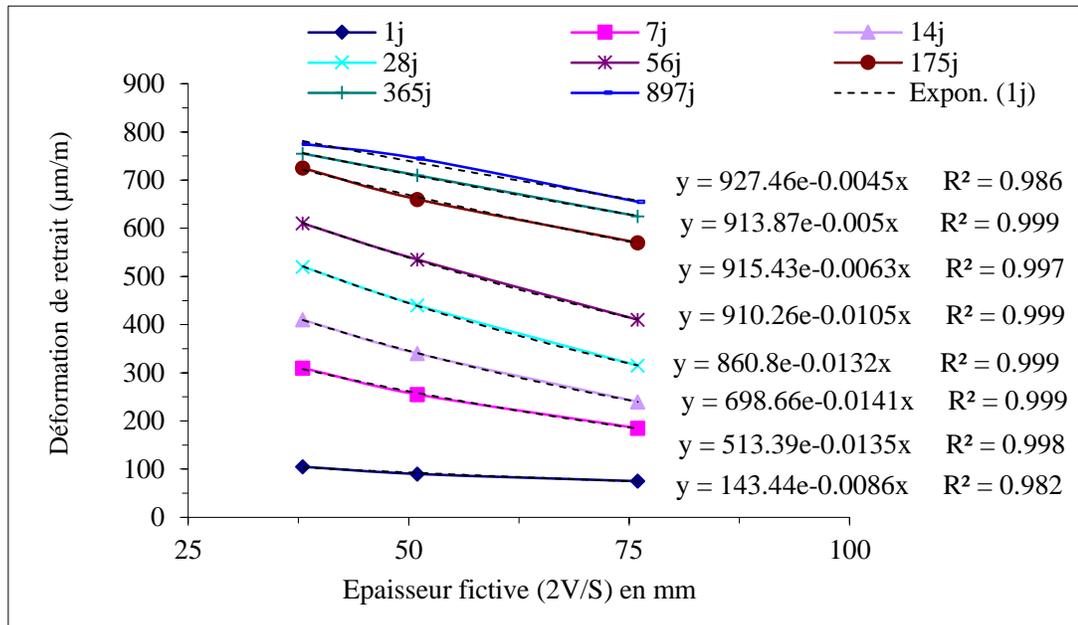


Figure 2.7 : Variation de la déformation de retrait en fonction de l'épaisseur fictive pour différents temps de séchage - Essai de Keeton.

C. Détermination de l'expression de la déformation de retrait

Les équations des courbes de tendance sont regroupées dans le Tableau 2.6.

Les courbes de tendance des valeurs des deux coefficients B et A sont présentés dans les Figures 2.8 et 2.9 respectivement.

Tableau 2.6 : Equations de courbes de tendance des déformations de retrait en fonction de l'épaisseur fictive (2V/S)- Essai de Keeton

t-t' (jours)	fonction	R ²
1	$927.46e^{-0.0045x}$	0,986
7	$913.87e^{-0.005x}$	0,999
14	$915.43e^{-0.0063x}$	0,997
28	$910.26e^{-0.0105x}$	0,9981
56	$860.8e^{-0.0132x}$	0,999
175	$698.66e^{-0.0141x}$	0,999
365	$513.39e^{-0.0135xx}$	0,998
897	$143.44e^{-0.0086x}$	0.982

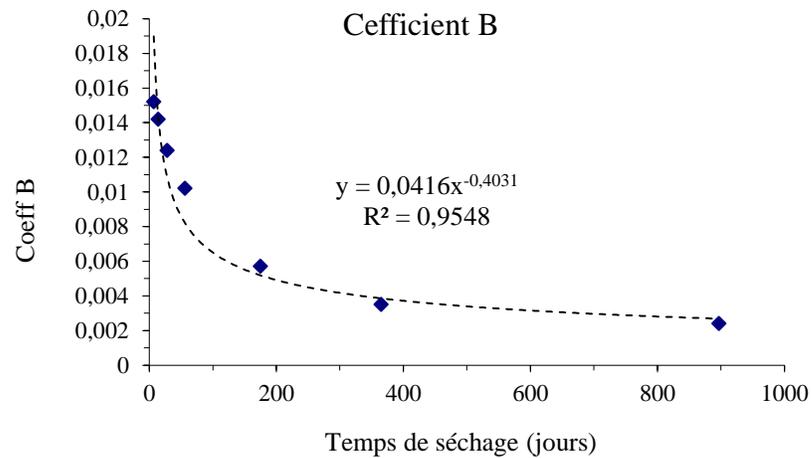


Figure 2-8 : Variation du coefficient B en fonction de temps de séchage - Essai de Keeton.

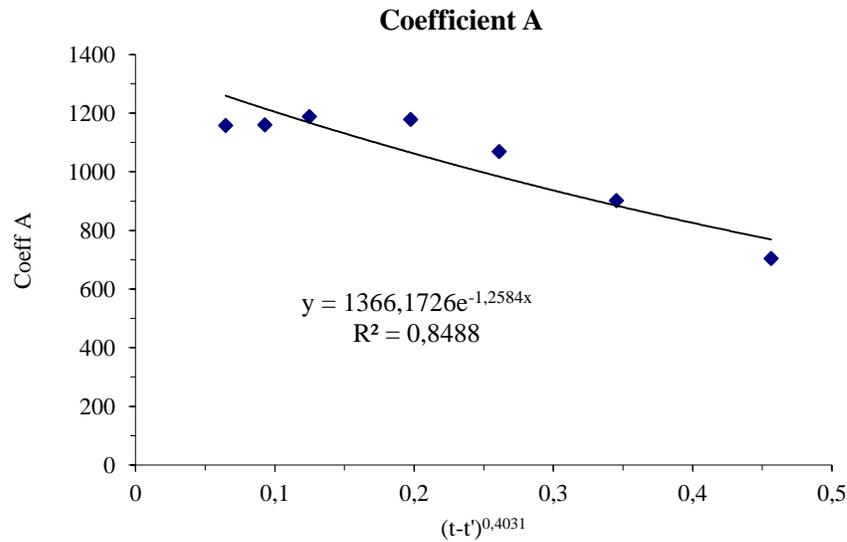


Figure 2.9 : Variation du coefficient A en fonction de $(t-t')^{-0.4031}$ – Essai de Keeton.

La courbe de tendance qui donne des valeurs très proches aux valeurs de B et A sont :

$$B = 0,0416 \times (t-t')^{-0,4031} \quad (2.8)$$

$$A = 1366.1726 \times e^{\left[\frac{-1,2584}{(t-t')^{0,4031}} \right]} \quad (2.9)$$

$$\text{D'où : } \varepsilon_r(t, t') = 1366.1726 \times e^{\left[\frac{-1,2584}{(t-t')^{0,4031}} \right]} \times e^{\left[\frac{-0,0416 \times (2 \times V / S)}{(t-t')^{0,4031}} \right]} \quad (2.10)$$

2.3.1.4. Analyse des résultats des trois essais

Les équations obtenues dans les trois essais ont la même expression de retrait en fonction du temps et de l'épaisseur fictive des éprouvettes :

$$\varepsilon_r = A \times e^{-B \times (2V / S)}$$

$$\text{Avec} \quad A = \lambda \times e^{-\left[\frac{\omega}{(t-t')^\alpha}\right]} \quad (2.11)$$

$$B = \frac{\gamma}{(t-t')^\alpha} \quad (2.12)$$

L'équation (2.1) devient :

$$\begin{aligned} \varepsilon_r(t, t') &= \lambda \times e^{-\left[\frac{\omega}{(t-t')^\alpha}\right]} \times e^{-\left[\frac{\gamma \times (2 \times V / S)}{(t-t')^\alpha}\right]} \\ \varepsilon_r(t, t') &= \lambda \times e^{-\left[\frac{\omega + \gamma \times (2 \times V / S)}{(t-t')^\alpha}\right]} \end{aligned} \quad (2.13)$$

Pour les trois essais nous avons essayé d'obtenir une même forme de l'équation de retrait (équation (2.1)). D'un essai à l'autre les coefficients : λ , ω , α et γ varient (Tableau 2.7). Et c'est tout à fait normal, car dans les trois essais, la composition du béton, propriétés mécaniques (E_{28} et fc_{28}) et aussi HR sont différents. La question maintenant est comment ces coefficients varient ?

Tableau 2.7 : les valeurs des coefficients de l'équation (2.13) des trois essais

Essai	Type de ciment	λ (10^{-6})	γ	ω	α
F. Alou	RN	721.5	0.0459	2.977	0.4099
Bazant	SL	1206	0.039	2.99	0.363
Keeton	RS	1366.2	0.0416	1.258	0.4031

Dans les trois essais précédents nous avons remarqué que α converge vers la valeur 0.4. On fixe donc $\alpha = 0.4$, les équations de coefficient B de trois essais deviennent :

$$B = 0,0459 \times (t-t')^{(-0,4099)} = 0,0459 \times (t-t')^{(-0,0099)} \times (t-t')^{(-0,4)} \approx \frac{2}{fc_{28}} \times (t-t')^{-0,4} \quad (2.14)$$

$$B = 0,039 \times (t-t')^{-0,363} = 0,039 \times (t-t')^{+0,037} \times (t-t')^{-0,4} \approx \frac{1,7}{fc_{28}} \times (t-t')^{-0,4} \quad (2.15)$$

$$B = 0,0416 \times (t-t')^{(-0,4031)} = 0,0416 \times (t-t')^{(-0,0031)} \times (t-t')^{(-0,4)} \approx \frac{1,8}{fc_{28}} \times (t-t')^{-0,4} \quad (2..16)$$

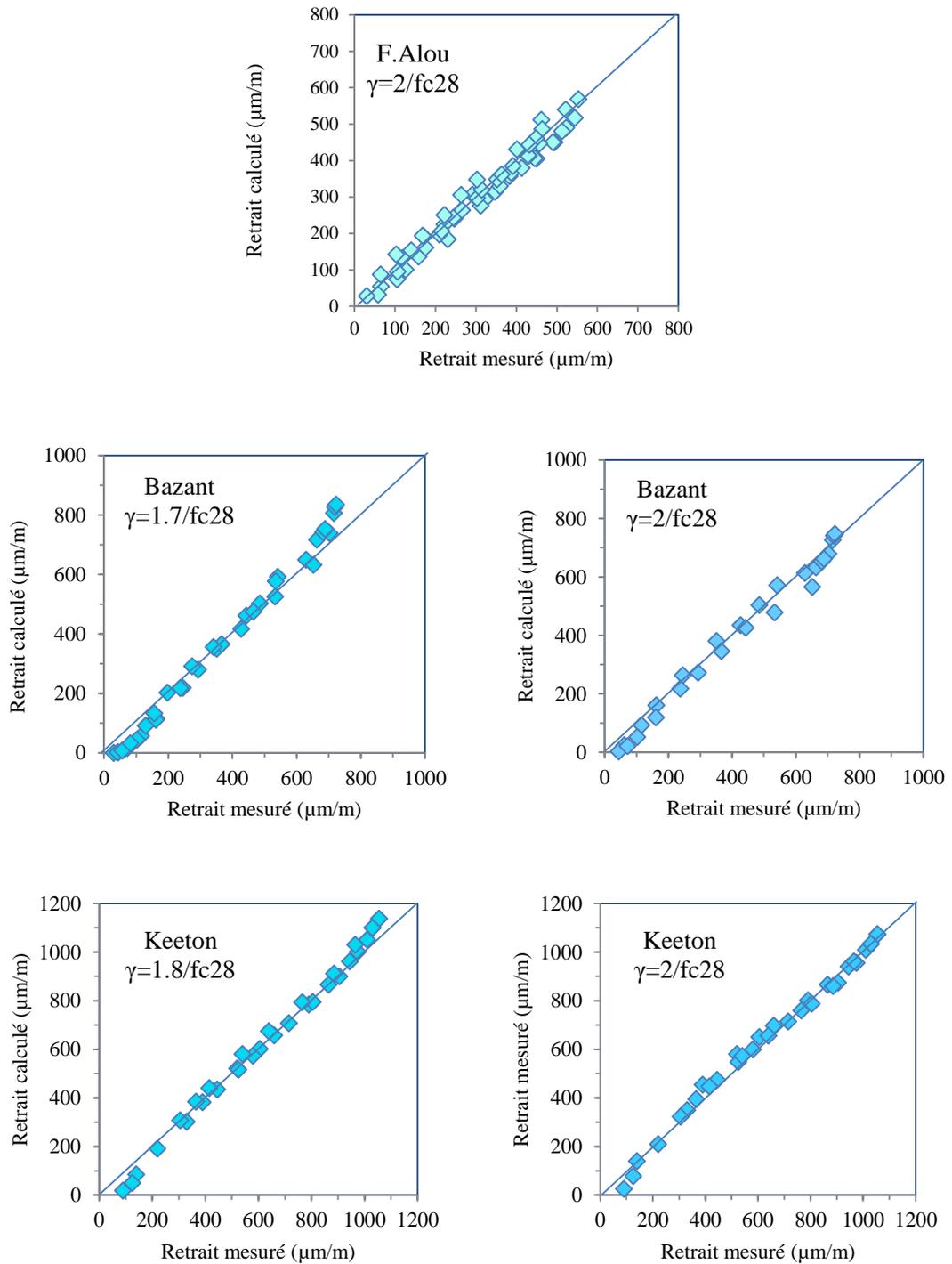


Figure 2.10 : Ajustement du coefficient γ dans les équations de retrait de trois essais ; F. Alou, Bazant et Keeton.

L'ajustement des valeurs de γ , comme il est montré dans les Figures (2.10 – 2.12), donne une bonne corrélation pour les trois essais. Donc lorsque $\alpha = 0,4$ et $\gamma = 2/f_{c28}$ nous obtenons une bonne estimation de la déformation de retrait de dessiccation dans les trois essais. L'application de ces deux coefficients (α et γ) sur d'autres essais [essais de Mamillan, essais de Wallo et essais de Hanson] tirés de la base de données NU- ITI [126] confirment le bon ajustement de ces deux coefficients.

2.3.1.5. Essai de Mamillan

A. Données d'essai [126]

Les éprouvettes testées ont une forme prismatique de côtés 70, 150 et 200 mm et des hauteurs de 280, 560 et 600 mm respectivement. Toutes les éprouvettes sont protégées pendant un jour contre le séchage, puis exposées à l'air où HR= 50% et à la température $T = 20^{\circ}\text{C}$. Les propriétés du béton étudié sont regroupées dans le tableau 2.8.

Tableau 2.8 : Caractéristique du béton- Essai de Mamillan [126]

C type	E/C	G/C	Ciment (kg/m ³)	f _{c28} (MPa)
R (II)	0.49	4.81	350	33.9

B. Détermination de l'expression de la déformation de retrait

Le même procédé suivi dans les 3 essais précédents a été appliqué pour déterminer l'équation de retrait en fonction du temps et de l'épaisseur fictive (2V/S). L'expression de retrait déterminée a la forme suivante :

$$\varepsilon_r(t, t') = 680 \times e^{-\left[\frac{1.47 + 2 \times (2 \times V / S)}{f_{c28} \times (t - t')^{0.4}} \right]} \quad (2.17)$$

La comparaison entre les déformations de retrait expérimentales et celles calculées y schématisée dans la Figure 2.11 montre que les deux coefficients α et γ déterminés précédemment donnent une bonne corrélation de la déformation de retrait de dessiccation.

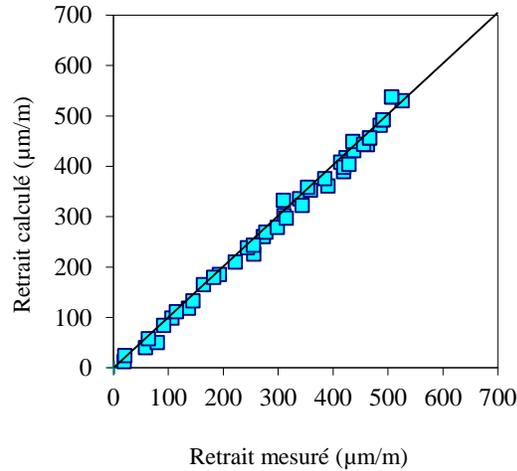


Figure 2.11 : Validation des coefficients α et γ - Essais de Mamillan.

2.3.1.6. Essai de Wallo

A. Données de l'essai [126]

Les éprouvettes testées ont une forme prismatique de côtés 76, 102 et 152 mm et ont une même hauteur de 350 mm. Elles sont protégées pendant 28 jours contre le séchage (scellées), puis exposées à l'air où HR=50% et à la température $T = 20^{\circ}\text{C}$. Les propriétés du béton étudié sont présentées dans le Tableau 2.9 suivant :

Tableau 2.9 : Caractéristique du béton- Essai de Wallo [126]

C type	E/C	G/C	Ciment (kg/m^3)	F_{c28} (MPa)
RN	0.5	4.4	396	46.2

B. Détermination de l'expression de la déformation de retrait

L'équation de retrait en fonction du temps et de l'épaisseur fictive ($2V/S$) déterminée à partir de l'essai de Wallo est comme suit :

$$\varepsilon_r(t, t') = 1200 \times e^{-\left[\frac{1.5 + 2 \times (2 \times V / S)}{f_{c28} \times (t - t')^{0.4}} \right]} \quad (2.18)$$

La comparaison entre les déformations de retrait mesurées et celles estimées par l'équation (2.18) illustrée dans la Figure 2.12 ci-dessous confirme aussi le bon ajustement des deux coefficients α et γ .

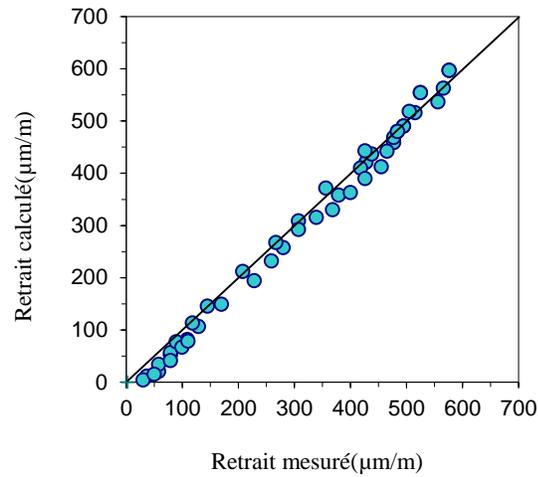


Figure 2.12 : Validation des coefficients α et γ - Essais de Wallo

2.3.1.7. Essai de Hanson

A. Données de l'essai [126]

Dans cet essai Hanson a étudié le retrait des éprouvettes de béton de forme cylindrique de dimensions (diamètre x hauteur) : 102x457, 152x559, et 203x660, 305x864 , 406x1067, 508x1270, et 607x1473 mm. Les éprouvettes sont protégées pendant 8 jours à HR=99% contre le séchage (cure humide), puis exposées à l'air où HR=50%. Les données du béton étudié sont assemblées dans le tableau 2.10.

Tableau 2.10 : Caractéristiques du béton – Essai de Hanson [126]

Type de ciment	E/C	G/C	Ciment (kg/m ³)	F _{c28} (MPa)
R (III)	0.71	6	303	41

B. Détermination de l'expression de la déformation de retrait

L'équation de retrait déterminée qui donne une bonne corrélation comme il est montré dans la Figure 2.13 tout en gardant $\alpha = 0,4$ et $\gamma = 2/f_{c28}$ est comme suit :

$$\varepsilon_r(t, t') = 1200 \times e^{-\left[\frac{0.32 \times f_{c28} + 2 \times (2 \times V / S)}{f_{c28} \times (t - t')^{0.4}} \right]} \quad (2.19)$$

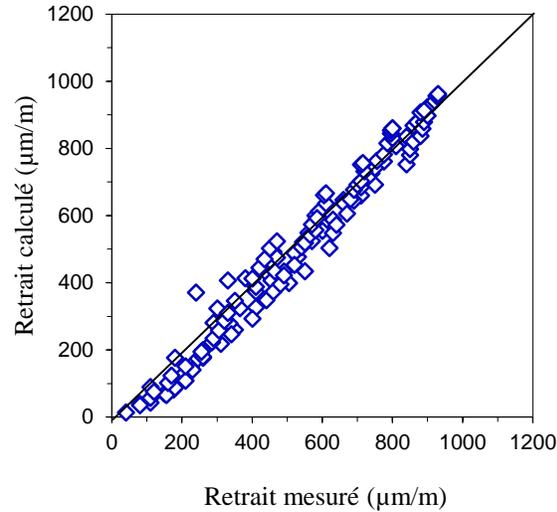


Figure 2.13 : Validation des coefficients α et γ - Essais de Hanson.

L'ajustement des deux coefficients α et γ influe réellement sur les valeurs de ω et λ . Le Tableau 2.11 regroupe les nouvelles valeurs de ω et λ déterminées après l'ajustement des valeurs de α et γ .

Tableau 2.11 : Récapitulation des valeurs des coefficients de l'équation B (t, t') des essais étudiés

Essai	Type de ciment	e/c	F _{c28} (MPa)	λ (10 ⁻⁶)	γ	ω
F. Alou	RN	0.48	42.5	721.5	2/f _{c28}	2.977
Bazant	SL	0.48	33.2	1000	2/f _{c28}	1
Keeton	RS	0.46	45.2	1366.2	2/f _{c28}	0.5
Mamillan	R	0.49	33.9	680	2/ f _{c28}	1.47
Wallo	R	0.50	46.2	1200	2/ f _{c28}	1.5
Hanson	RS	0.71	41	1200	2/ f _{c28}	0.32

Jusqu'à ce point la variation du coefficient ω n'est pas claire. Au début nous avons pensé que ce coefficient dépendait du rapport E/C car il influe sur l'évolution et l'amplitude de la déformation de retrait. Pour confirmer notre raisonnement, nous avons appliqué l'équation sur d'autres bétons où la seule différence réside dans le rapport E/C.

2.3.1.8. Essai de F. Alou

A. Données de l'essai – série 2 [55]

Dans cette série, Alou a maintenu constant le volume de la pâte du ciment, mais il a fait varier le rapport E/C. les éprouvettes sont cylindriques ($\phi=160$ mm et $l=320$ mm) et ont été conservées dans leurs moules pendant 7 jours. Le début des mesures a eu lieu à l'âge de 7 jours dans les conditions suivantes : $T = 18 \pm 1^\circ\text{C}$ et $HR = 65 \pm 5\%$. Les caractéristiques du béton de cette série figurent dans le tableau 2.12.

Tableau 2.12 : Caractéristiques des bétons de la série 2 – Essai de F. Alou [55]

Bétons	A	B	C
Type de ciment	RN	RN	RN
Dosage en ciment (kg/m^3)	400	454	525
E/C en poids	0.65	0.55	0.45
Masse volumique apparente (kg/m^3)	2.323	2.332	2.346
Résistance à la compression (f_{c28}) (MPa)	26.0	36.6	46.1

B. Détermination de l'expression de la déformation de retrait

Dans cette étape nous avons fixé $\alpha=0,4$ et $\gamma = 2$ pour déterminer l'expression de ω . Le calcul montre que pour obtenir une bonne corrélation comme il schématisé dans la Figure 2.14, il faut que ω prenne les valeurs regroupées dans le Tableau 2.13. Les résultats de cet essai montrent que le coefficient ω varie linéairement en fonction de f_{c28} .

$$\omega \approx \frac{f_{c28} - 10}{10} \quad (2.20)$$

Tableau 2.13: Les valeurs de coefficient ω - Essai de F. Alou (série 2)

Bétons	E/c	f_{c28} (MPa)	λ (10^{-6})	ω
B1	0,65	26.0	750	1.7
B2	0,55	36.6	700	2.6
B3	0,45	46.1	700	3.5

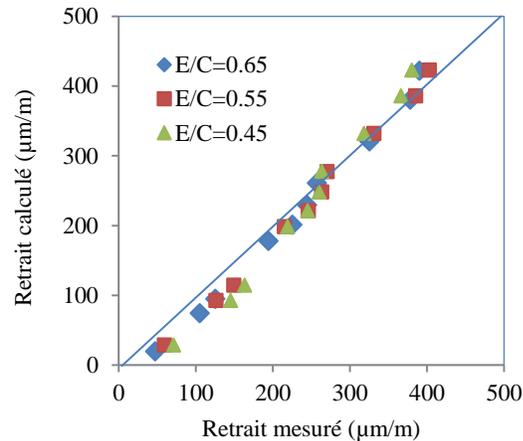


Figure 2.14 : Comparaison des déformations de retrait mesurées avec celles estimées – Essai de F. Alou (série 2).

2.3.1.9. Essai de Hummel

A. Données de l'essai [126]

Dans cet essai, le chercheur a maintenu constant le dosage en granulat et il a fait varier le rapport E/C et le dosage de ciment (ciment type SL). Les éprouvettes ont une forme cylindrique ($\phi=200$ mm et $l=800$ mm) et ont été conservées dans leurs moules pendant 7 jours. Le début des mesures a eu lieu à l'âge de 7 jours dans les conditions suivantes : $T = 20^\circ\text{C}$ et $\text{HR} = 65\%$. Les caractéristiques du béton de cette série sont présentées dans le Tableau 2.14.

Tableau 2.14 : Caractéristiques des bétons – Essai de Hummel [126]

Bétons	A	B	C	D
Dosage en ciment (kg/m^3)	334	350	345	328
E/C en poids	0.55	0.38	0.45	0.65
Résistance à la compression (f_{c28}) (MPa)	26.9	43.1	35.3	18.7

B. Détermination de l'expression de la déformation de retrait

De la même manière et pour $\alpha=0,4$ et $\gamma = 2$, nous avons déterminé l'expression du coefficient ω . Le calcul montre que pour obtenir une bonne corrélation comme il est schématisée dans la Figure 2.15, il faut que ω prenne les valeurs regroupées dans le

Tableau 2.15. Les résultats de la simulation montrent que ω varie linéairement en fonction de f_{c28} mais avec une autre fonction que la précédente :

$$\omega \approx \frac{f_{c28} - 10}{100} \quad (2.21)$$

Tableau 2.15 : Les valeurs de coefficient ω - Essai de Hummel

Bétons	E/c	f_{c28} (MPa)	λ (10^{-6})	ω
B1	0.55	26.9	1015	0.27
B2	0.38	43.1	655	0.43
B3	0.45	35.3	673	0.35
B4	0.65	18.7	1200	0.19

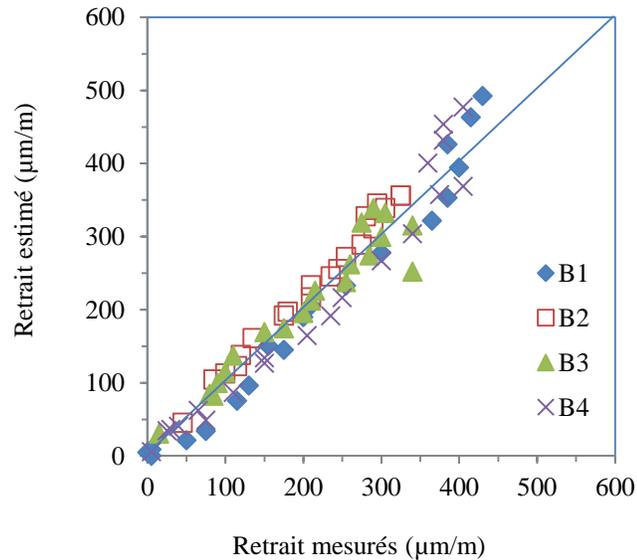


Figure 2.15 : Comparaison des déformations de retrait mesurées avec celles calculées – Essai de Hummel.

2.3.1.10. Récapitulation des résultats des essais étudiés

L'application de l'équation (2.20) sur les déformations de retrait des bétons composés de ciment type RN et l'équation (2.21) sur les bétons composés de ciment type SL et RS donne une bonne estimation des déformations de retrait de séchage. Il est à noter que les modifications apportées sur les valeurs des coefficients α , γ et ω dans certains essais influent sur les valeurs du coefficient λ . Pour déterminer les nouvelles valeurs de ce dernier (λ), nous avons tracé le rapport des déformations expérimentales sur l'équation $\beta(t,t')$ en fonction du temps comme il est schématisé dans la Figure (2.16). Les résultats obtenus indiquent que lorsque le temps de séchage augmente λ tend vers une valeur constante pour chaque essai. Les nouvelles valeurs de λ et ω regroupées dans le Tableau 2.16 sont utilisées pour valider l'expression $B(t,t')$ obtenue. Les résultats de validation illustrés dans la Figure 2.17 montrent que la fonction du temps déterminée dans cette étape d'analyse exprime bien la variation de la déformation de retrait dans le temps en fonction de dimension des pièces, de la résistance en compression du béton et de type du ciment.

Tableau 2.16 : Récapitulation des résultats des essais étudiés

Essais	Type de C	f_{c28} (MPa)	E/C	α	γ	ω	λ
F.Alou serie1	R	42.5	0.48	0.4	$2/ f_{c28}$	$0.1x(f_{c28}-10)$	850
Bazant	SL	33.2	0.48	0.4	$2/ f_{c28}$	$0.01x(f_{c28}-10)$	860
Keeton	RS	45.2	0.46	0.4	$2/ f_{c28}$	$0.01x(f_{c28}-10)$	1200
Mamillan	R	33.9	0.49	0.4	$2/ f_{c28}$	$0.1x(f_{c28}-10)$	800
Wallo	R	46.2	0.50	0.4	$2/ f_{c28}$	$0.1x(f_{c28}-10)$	750
Hanson	RS	41.0	0.71	0.4	$2/ f_{c28}$	$0.01x(f_{c28}-10)$	1300
F.Alou serie2 B A	R	26.0	0.40	0.4	$2/ f_{c28}$	$0.1x(f_{c28}-10)$	750
F.Alou serie2 B B	R	36.6	0.40	0.4	$2/ f_{c28}$	$0.1x(f_{c28}-10)$	700
F.Alou serie2 B C	R	46.1	0.40	0.4	$2/ f_{c28}$	$0.1x(f_{c28}-10)$	700
Hummel Béton B1	SL	26.9	0.55	0.4	$2/ f_{c28}$	$0.01x(f_{c28}-10)$	1015
Hummel Béton B2	SL	43.1	0.38	0.4	$2/ f_{c28}$	$0.01x(f_{c28}-10)$	650
Hummel Béton B3	SL	35.3	0.45	0.4	$2/ f_{c28}$	$0.01x(f_{c28}-10)$	670
Hummel Béton B4	SL	18.7	0.65	0.4	$2/ f_{c28}$	$0.01x(f_{c28}-10)$	1190

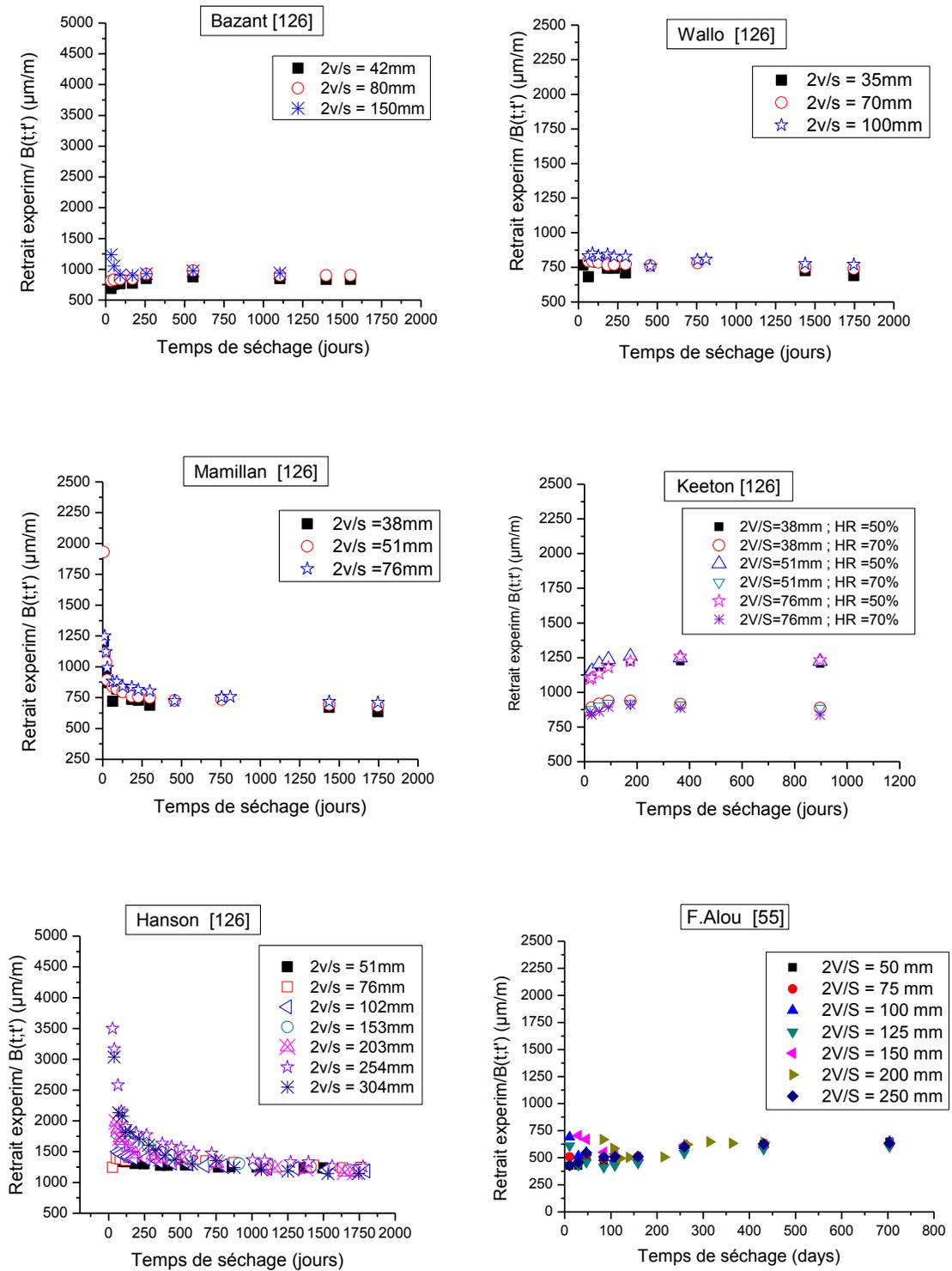


Figure 2.16: Détermination des nouvelles valeurs de coefficient λ de certains essais étudiés.

Nous pouvons admettre que l'expression du retrait en fonction du diamètre de l'échantillon et du temps de séchage est comme suit :

$$\varepsilon_r(t, t') = \lambda \times \beta(t, t') \quad (2.22)$$

Avec $\beta(t, t')$ la loi d'évolution du retrait dans le temps exprimée par :

$$\beta(t, t') = e^{-\left[\frac{f_{c28} \times \omega + 2 \times R}{f_{c28} \times (t-t')^{0.4}} \right]} \quad (2.23)$$

$$R = 2 \text{ V/S (mm)}$$

$$\omega = 0.1 \times (f_{c28} - 10) \quad \text{pour ciment type RN}$$

$$\omega = 0.01 \times (f_{c28} - 10) \quad \text{pour ciment type SL et RS}$$

La valeur du coefficient λ varie d'un essai à autre. Il est possible qu'elle dépende de la composition du béton et des conditions hygrométrique ainsi que des conditions de conservation. Pour déterminer ce coefficient, il est nécessaire d'étudier l'effet du reste des facteurs qui influent sur l'amplitude de la déformation de retrait de dessiccation.

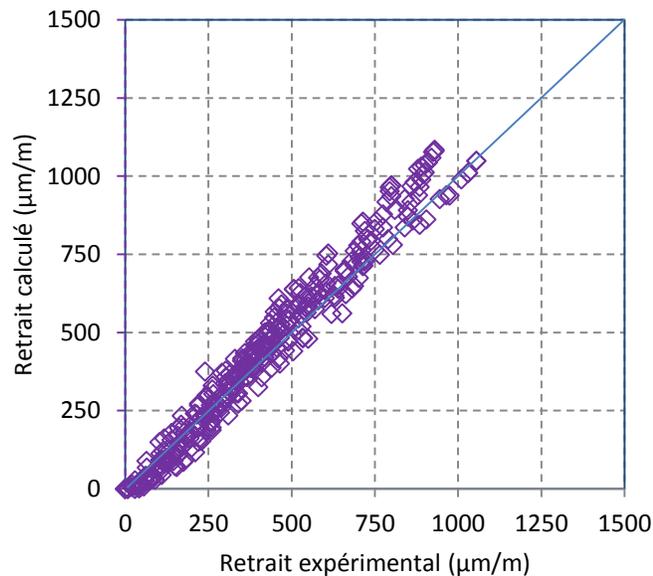


Figure 2.17 : Validation de la fonction d'évolution de retrait $B(t, t')$.

2.3.2. Effet de l'humidité relative de l'environnement

Dans la pratique il est facile de travailler sur la composition du béton et de déterminer les caractéristiques désirées du béton, et c'est possible de jouer sur la période de la cure pour obtenir la résistance souhaitée ou pour minimiser les déformations du béton au jeune âge mais, il est impossible de maintenir une valeur constante de l'humidité de l'environnement. Le retrait de dessiccation pourrait être limité en protégeant le béton contre les variations d'humidité relative. Mais cela n'est pas possible sur une longue période. Nous pouvons donc considérer que la variation de retrait sous l'effet de la variation de l'humidité relative est inévitable.

La diminution d'humidité provoque le phénomène de transport de l'eau au sein du béton vers l'extérieur sous l'effet de séchage. L'humidité relative dans les pores initialement est de 100%, l'ambient est en générale à une humidité relative inférieure. Le déséquilibre hygrométrique entre l'intérieur et l'extérieur va donc provoquer une migration de l'eau hors du béton. Ce transfert est très lent, et les gradients hydriques considérables aux voisinages des surfaces de l'ouvrage, vont subsister très longtemps, de plusieurs années pour les pièces épaisses. Lorsque l'humidité relative diminue au sein du béton, la pression qui s'applique sur les parois des pores (pression capillaire, pression de disjonction) devient négative. Sous l'effet de cette contrainte, le squelette solide se déforme. La réponse macroscopique « le retrait » est donc bien la conséquence de la diminution d'humidité.

L'influence du mode d'action de mécanismes de retrait de dessiccation n'est aujourd'hui pas clairement établie comme le montre le tableau 2.17.

Tableau 2.17 : Mode d'action de mécanismes de retrait de dessiccation

	Humidité relative				
	0	0,2	0,4	0,6	0,8
POWERS (1965)	← Pression de disjonction →				
	← Dépression capillaire →				
ISHAI (1965)	← Energie superficielle → ← Dépression capillaire →				
FELDMAN et SERADA (1970)	← Eau inter feuillet → ← Dépression capillaire et énergie superficielle →				
WITTMAN (1968)	← Energie superficielle → ← Pression de disjonction →				

La relation entre le retrait de dessiccation et le mouvement d'humidité devient plus complexe surtout au cours des cycles séchage - humidification, durant lesquels apparaissent deux composants : réversible et irréversible. Le retrait irréversible est le changement définitif d'une pièce en béton (matériau cimentaire) au cours du premier cycle séchage – humidification [70]. Ce changement est généralement expliqué par le nouveau réarrangement des particules (feuilles) du gel C-S-H pendant le séchage. Neville [23] attribue l'apparition du retrait irréversible à la formation de nouvelles liaisons au sein du gel C-S-H favorisée par le rapprochement des particules. De point de vue modélisation, le retrait du béton est le résultat de trois phénomènes [127] :

- 1- L'augmentation de degré d'hydratation
- 2- La précipitation et polymérisation de C-S-H
- 3- Les contraintes internes introduites par les changements d'humidité et la température.

Le troisième processus implique des variations dimensionnelles importantes dans la microstructure de la pâte durcie. La diffusion d'humidité dans les matériaux à matrice cimentaire est un processus très compliqué. Il dépend de la structure complexe des pores, cette dernière est liée à la composition du béton, technique de protection à jeune âge. Ce qui rend difficile la détermination du coefficient de l'humidité à partir des résultats expérimentaux.

Dans cette étape nous voulons choisir le coefficient de l'humidité à partir des coefficients utilisés dans les quatre modèles (ACI-92, CEB-90, B3 et GL2000) groupés dans le Tableau 2.18.

Tableau 2.18 : Coefficient d'humidité utilisé dans chaque modèle

Modèles	K_{HR}
B3	$1-(HR/100)^3$ $40\% \leq HR \leq 99\%$
ACI-92	$1.4 - (HR/100)$ si $40\% \leq HR \leq 80\%$ $3.0 - 3 \times (HR/100)$ si $80\% \leq HR \leq 100\%$
CEB-90	$1-(HR/100)^3$ $40\% \leq HR \leq 99\%$
GL2000	$1-1.18 \times (HR/100)^4$ $40\% \leq HR \leq 96\%$

Pour faire le choix de ce coefficient, nous avons comparé :

- 1- La variation de quatre coefficients en fonction de HR
- 2- La variation de la déformation de retrait en fonction de HR – Essai de Keeton
- 3- La variation de la déformation retrait / gonflement en fonction de HR – Essai de Troxel

2.3.2.1. Comparaison des coefficients d'humidité des modèles

La comparaison schématisée dans la Figure 2.18 montre qu'il n'y a pas une importante différence entre les coefficients de quatre modèles lorsque HR varie de 40% à 90%.

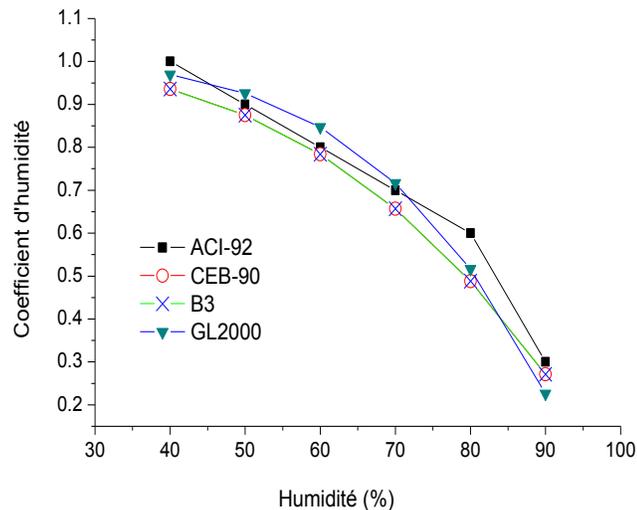


Figure 2.18 : Comparaison des coefficients d'humidité des quatre modèles.

2.3.2.2. Comparaison de la variation de la déformation du retrait en fonction de HR

A. Essais de Keeton

Deux paramètres sont pris en compte dans l'essai de Keeton [126] ; les dimensions des échantillons et HR de l'environnement. Nous voulons introduire le coefficient de chaque modèle K_{HR} dans l'équation (2.23) développée dans le § 2.3.1. On pose ;

$$\lambda = \varphi \times K_{RH} \quad (2.24)$$

L'expression de l'équation (2.23) devient:

$$\varepsilon_r = \varphi \times K_{RH} \times \beta(t, t') \quad (2.25)$$

Pour choisir le coefficient de HR le mieux adapté à l'équation de $B(t, t')$, nous avons comparé les déformations de retrait expérimental avec les déformations calculées par les équations (2.26-2.29) suivantes :

$$\text{CEB et B3} \quad \varepsilon_r = \varphi \times \left(1 - \left(\frac{HR}{100} \right)^3 \right) \times \beta(t, t') \quad (2.26)$$

$$\text{GL2000} \quad \varepsilon_r = \varphi \times \left(1 - \left(1.18 \frac{HR}{100} \right)^4 \right) \times \beta(t, t') \quad (2.27)$$

$$\text{ACI} \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_r = \varphi \times \left(1.4 - \frac{HR}{100} \right) \times \beta(t, t') \quad \text{si } 40\% \leq HR \leq 80\% \\ \varepsilon_r = \varphi \times \left(3 - 3 \times \frac{HR}{100} \right) \times \beta(t, t') \quad \text{si } 80\% \leq HR \leq 100\% \end{array} \right. \quad (2.28)$$

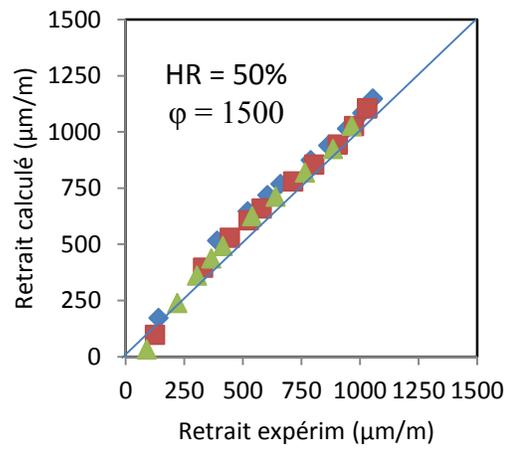
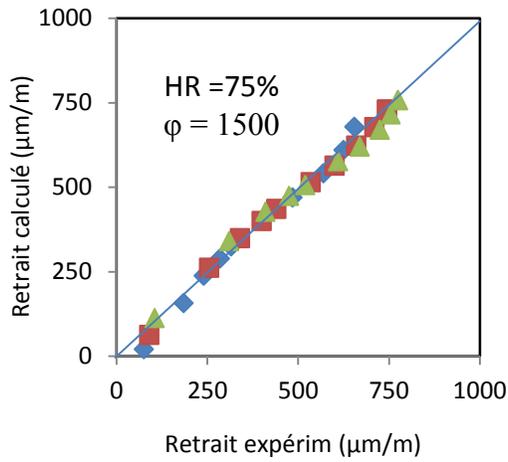
$$\varepsilon_r = \varphi \times \left(3 - 3 \times \frac{HR}{100} \right) \times \beta(t, t') \quad \text{si } 80\% \leq HR \leq 100\% \quad (2.29)$$

Les valeurs de φ ont été déterminées par le calcul du rapport de retrait mesuré $\varepsilon(t, t')$ sur le coefficient $\beta(t, t')$ et le coefficient K_{HR} en fonction du temps (eq 2.30).

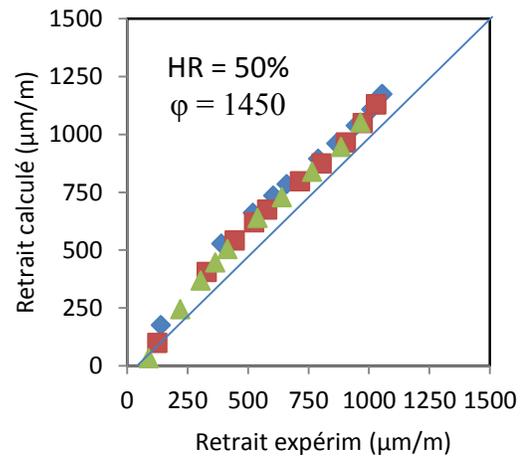
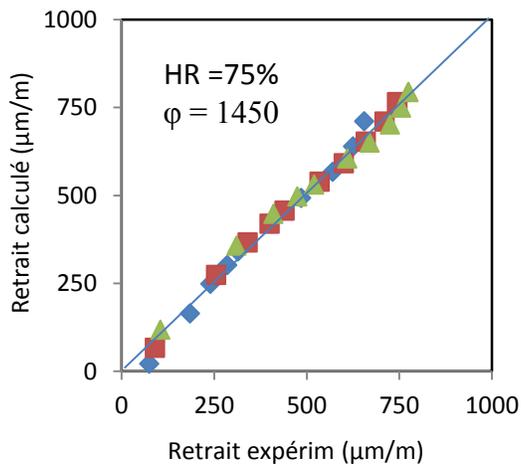
$$\varphi(t, t') = \frac{\varepsilon_r(t, t')}{\beta(t, t') \times K_{HR}} \quad (2.30)$$

Lorsque le temps de séchage augmente, les valeurs de $\varphi(t, t')$ tendent vers une valeur constante pour chaque coefficient de HR. D'après les résultats de calcul schématisés dans la Figure 2.19, il paraît qu'il n'y a pas une grande différence entre les déformations de retrait calculées par les équations de quatre modèles (2.26-2.29). Avec les 3 coefficients d'HR nous avons obtenu une bonne estimation de la déformation du retrait de séchage dans les deux valeurs d'humidité.

CEB – B3



GL



ACI

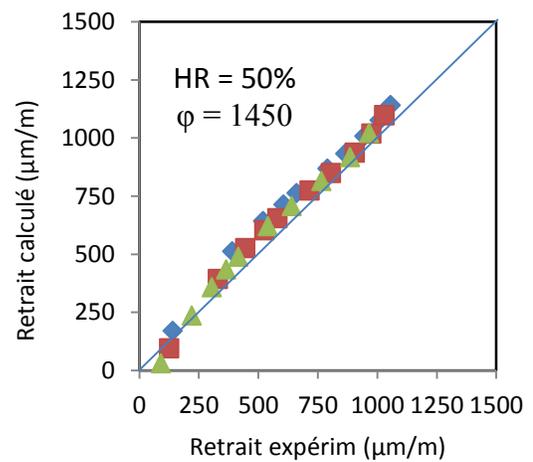
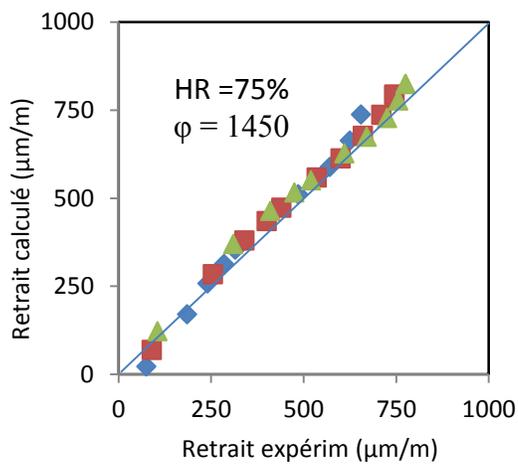


Figure 2.19 : Comparaison des déformations de retrait mesurées avec celles calculées – Essai de Keeton.

B - Essais de Troxel

Dans cet essai Troxel [126] a étudié l'effet de la variation de HR sur le retrait de séchage des éprouvettes cylindriques de 102 mm de diamètre et 356 mm de hauteur, conservé dans un milieu humide ou HR = 99% pendant 28 jours puis il a divisé les éprouvettes en 4 séries :

Série 1 : exposée a HR = 50%

Série 2 : exposée à HR = 70%

Série 3 : exposée à HR = 99%

Série 4 : exposée a HR = 100%

Les caractéristiques du béton utilisé sont présentées dans le Tableau 2.19.

Tableau 2.19 : Les caractéristiques de béton- Essai de Troxel [126]

Type de ciment	Ciment (kg/m ³)	E/C	G/C	f _{c28} (MPa)
SL	320	0.59	5.67	17

Les Figures 2.20 et 2.21 présentent une comparaison des déformations expérimentales du béton et les déformations calculées par les équations (2.26-2.29). Les valeurs de ϕ sont déterminées par l'équation (2.30) de la même manière que pour l'essai précédent. Les résultats montrent que le changement des coefficients d'humidité n'a pas une importante influence sur la grandeur de la déformation du retrait de béton de deux séries 1 et 2 (HR =50% et HR = 70%) depuis le début de mesure jusqu'à 1000 jours. Après cette période nous remarquons une faible différence entre les déformations calculées par les coefficients de CEB /B3 et les coefficients de GL et ACI dans la série 2 (HR = 70%).

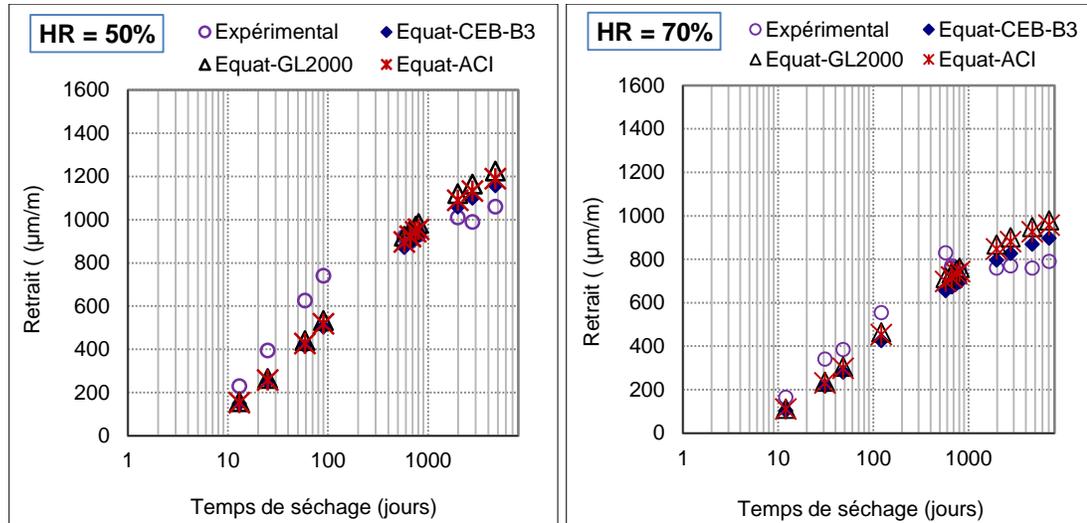


Figure 2.20: Comparaison de l'influence des coefficients de HR des modèles sur les valeurs des déformations de retrait de séchage – Essai de Troxel.

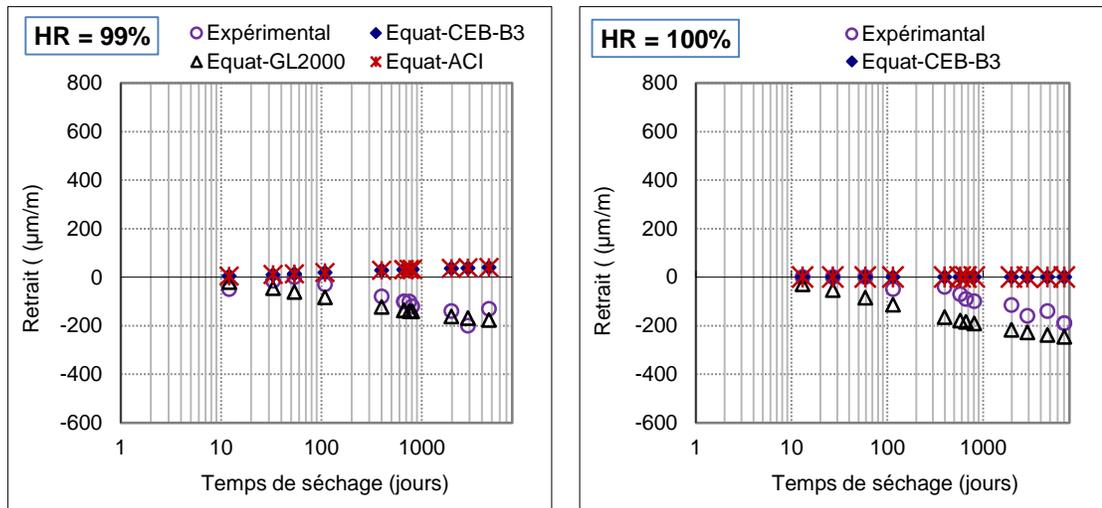


Figure 2.21: Comparaison de l'influence des coefficients de HR des modèles sur les valeurs des déformations de retrait / gonflement – Essai de Troxel.

Lorsque HR est supérieure ou égale à 99% (série 3 et 4), les résultats expérimentaux montrent un gonflement des éprouvettes du béton. Avec le coefficient de GL2000 nous avons obtenu une bonne estimation, surtout à HR = 99%, sachant que selon ce modèle le coefficient K_{RH} n'est pas applicable lorsque HR dépasse 96%. Le coefficient du modèle B3 aussi n'est pas applicable lorsque $HR > 98\%$; il prend la valeur 0.2 lorsque $HR = 100\%$ et lorsque $98\% \leq HR < 100\%$ l'expression de ce coefficient devient :

$$K_{HR} = -12,94 \times HR + 12,74 \quad (2.31)$$

Le coefficient du modèle CEB prend la valeur 0.25 lorsque HR dépasse 99%. L'application des coefficients de deux modèles CEB et B3 (qui expriment le gonflement) sur les deux séries (3 et 4) montre que le coefficient du modèle B3 est le mieux adapté dans le cas de gonflement comme il est représenté dans la Figure 2.22.

Le gonflement est comme le retrait dépend aussi du type de ciment et du rapport E/C, ce qui rend la détermination de la valeur limite de l'humidité relative qui sépare ces deux déformations (retrait et gonflement) difficile. Pour cette raison nous ne pouvons pas préciser l'intervalle d'humidité qu'après la finalisation du modèle.

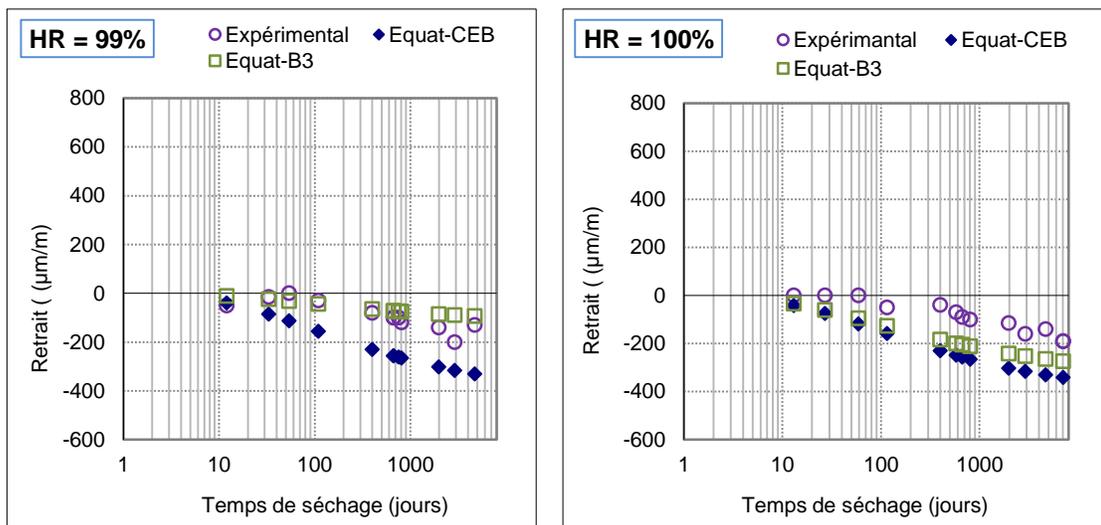


Figure 2.22: Comparaison de l'influence des coefficients de HR des modèles sur le gonflement du béton – Essai de Troxel.

Les résultats de comparaison entre les coefficients d'humidité des quatre modèles nous ont montré que le coefficient utilisé par les deux modèles B3 et CEB est le mieux adapté pour HR inférieur à 99% , et l'intervalle d'application de ce coefficient ne peut être fixé qu'après la validation du modèle. Donc le coefficient qui exprime la variation du retrait de dessiccation en fonction de l'humidité relative choisie est :

$$K_{HR} = 1 - \left(\frac{HR}{100} \right)^3$$

2.3.3. Effet de la cure

Le développement de retrait du béton est proportionnel au taux de perte d'humidité dans le béton, la protection du béton contre l'évaporation après le démoulage pouvait aider à retenir l'humidité dans le béton au jeune âge, et donc le risque de fissuration du béton diminue.

Plusieurs études ont montré que la structure des pores du béton influe de manière significative sur le retrait du béton [128-132]. La structure des pores est affectée par le degré d'hydratation ; ce dernier est gouverné par le type et la période de cure. Il a été constaté qu'au sein du béton, la déformation de retrait du béton conservé pendant une longue durée est moins importante que le béton conservé pendant une courte durée [57, 130]. Pour la peau de béton, le mécanisme est opposé à celui du cœur [65, 128, 129, 131]. La peau du béton est caractérisée par une grande porosité par rapport au cœur et par conséquent une grande diffusivité. Si cette couche perd la quantité d'eau nécessaire à l'hydratation, l'hydratation ne se poursuit pas ce qui provoque une faible résistance à la traction, par conséquent le retrait augmente et le risque éventuel de fissures augmente.

D'après Sanjayan et Sioulas [131], une période de cure de 3 jours est suffisante pour avoir une résistance et une durabilité adéquates. Le règlement ACI-308 [133] spécifie une période de 7 jours de cure humide pour la plupart des structures en béton, et qui peut être étendue lorsque le ciment utilisé est de faible degré d'hydratation.

Pour déterminer le coefficient qui exprime l'effet de la cure nous avons analysé les déformations du retrait de certains essais tirées de la littérature, ou le paramètre étudié soit la cure.

2.3.3.1. Essai de Wesche

Dans cette étude l'auteur [126] a testé l'effet de la période de cure sur plusieurs séries de bétons de même rapport E/C et presque de même dosage en ciment et en granulats ; la différence réside dans les caractéristiques mécaniques des bétons (f_{c28} , E_{c28}). Dans notre étude on s'intéresse aux séries qui ont les mêmes caractéristiques pour étudier l'effet de la période de cure sur le retrait.

Les éprouvettes testées ont une forme cylindrique de 200 mm de diamètre, 800 mm de hauteur, et sont exposées à une température $T = 20^{\circ}\text{C}$ et $\text{HR} = 65\%$ après une durée de cure sèche. Le Tableau 2.20 regroupe les propriétés des bétons étudiés

Tableau 2.20 : Caractéristiques des bétons – essai de Wesche [126]

Bétons	Série A	Série B	Série C
Type de ciment	RN	RS	SL
Dosage en ciment (kg/m^3)	336	337	336
E/C en poids	0,55	0.55	0.55
Granulat/Ciment	5.39	5.4	5.39
Résistance à la compression (f_{c28}) (MPa)	33.2	46.5	33.9
Module d'élasticité (MPa)	32200	37500	27800
Périodes de cure (jours)	3-7	1-3-7	3-7

La Figure 2.23 regroupe les courbes qui représentent les rapports entre les déformations de retrait des bétons de différentes périodes de cure en fonction du temps.

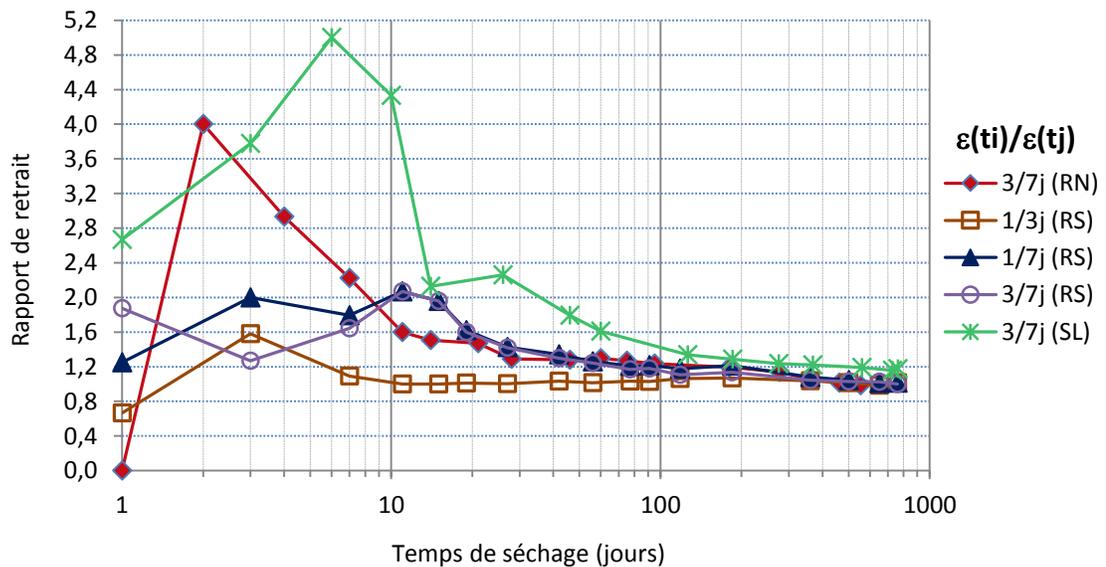


Figure 2.23 : Comparaison des rapports de retrait de trois séries de béton de différentes périodes de cure - Essai de Wesche.

Les résultats de cet essai permet de discerner l'effet de la période de cure sur des bétons de différents types de ciments (SL, RN, RS), ce qui nous oriente à analyser les résultats pour chaque série de béton (selon le type de ciment) ;

➤ *Béton composé de ciment type SL (série A)*

A jeune âge, le rapport des retraits des bétons conservés durant 3 et 7 jours (courbe 3/7(SL)) est le plus grand en comparaison avec les rapports des autres séries. Il atteint la valeur 5 dans 6 jours, puis il chute jusqu'à la valeur 2 après 10 jours depuis le début de séchage. Lorsque le temps de séchage augmente ce rapport tend vers la valeur 1,2.

➤ *Béton composé de ciment type RN (série B)*

Le rapport des retraits des bétons curés durant 3 et 7 jours (courbe 3/7 (RN)) est important dans les dix premiers jours. Il atteint la valeur 4 dans le deuxième jour, puis il diminue de façon linéaire pendant 9 jours où il atteint la valeur de 1.6. Après 28 jours depuis le début de mesure, le rapport des retraits prend la valeur 1.2 durant 300 jours, puis il tend vers 1.

➤ *Béton composé de ciment type RS (série C)*

Trois périodes de cure ont été étudiés dans cette série, ce qui nous a permis de tracer et discuter les rapports de retrait de trois périodes de cure 1/3, 1/7 et 3/7.

- Le rapport des retraits entre les bétons curés durant 1 et 3 jours (courbe 1/3 (RS)) est faible par rapport aux autres bétons. Il varie de 0.7 à 1.6 dans les premiers 7 jours de séchage puis il tend vers la valeur 1 pendant le reste de la période de mesure.
- Les rapports des retraits des bétons de périodes de cure 1, 3 et 7 jours (courbe 1/7(RS) et 3/7 (RS)) varient de 1.2 à 2 dans les premiers 30 jours de séchage puis ils tendent vers la valeur 1.

Les résultats obtenus nous ont permis de conclure que :

- La période de cure influe sur le retrait des bétons composés des ciments types SL et RN de façon remarquable à jeune âge. Cette influence diminue avec l'augmentation de l'âge.
- La période de cure a une faible influence sur le retrait du béton composé de ciment type RS à jeune âge et à long terme cette influence disparaît.

2.3.3.2. Essai de Hilsdorf

L'objet de cet essai selon le chercheur [126] a été l'étude de l'effet de la période de conservation sur des éprouvettes (scellées) de béton de forme cylindrique de 200 mm de diamètre et 800 mm de hauteur. Les caractéristiques du béton étudiées sous différentes périodes de cure sont regroupées dans le Tableau 2.21.

Tableau 2.21 : Caractéristiques des bétons – essai de Hilsdorf [126]

Type de ciment	RS
Dosage en ciment (kg/m ³)	337
E/C en poids	0.55
Granulat/Ciment	5.4
Résistance à la compression (f_{c28}) (MPa)	40.3
Module d'élasticité (MPa)	30200
Périodes de cure (jours)	1-3-7-28-90

De la même manière que pour l'essai précédent nous traçons les courbes de rapport des retraits des bétons de différentes périodes de cure. Les résultats présentés dans la Figure 2.24 montrent que depuis le début des mesures jusqu'à 30 jours, la différence entre les rapports des retraits des bétons de différentes périodes de cure est faible (de 0.5 à 1.2), après cette période (30 jours) tous les rapports tendent vers la valeur 1.

Les résultats de l'essai de Hilsdorf approuvent que la période de cure n'a pas d'influence sur le retrait de béton composé de ciment type RS. Les rapports des retraits déterminés sur des bétons de différentes périodes de conservation composés de ciment type RN ou SL sont important à jeune âge (Figure 2.24). Mais il faut noter que ces rapports sont obtenues sur des déformations de retrait qui ne dépassent pas 10 $\mu\text{m/m}$. pour cette raison on donne une importance aux rapports des retraits mesurés après 28 jours.

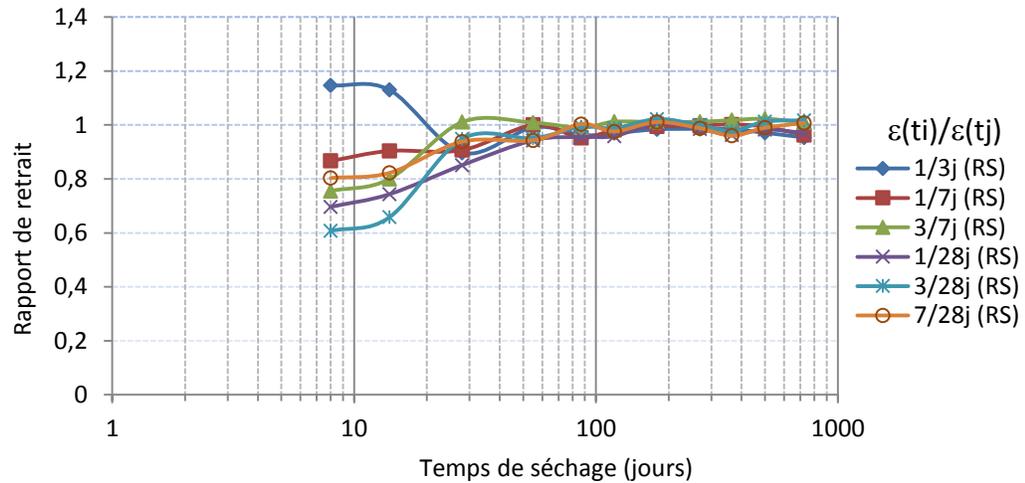


Figure 2.24 : Comparaison des rapports de retrait des bétons de différentes périodes de cure- Essai de Hilsdorf.

2.3.3.3. Essai de Dilger

Deux facteurs sont pris en considération dans cet essai ; l'humidité du milieu de conservation du béton et la période de conservation. Un seul béton a été formulé pour fabriquer des éprouvettes cylindriques de diamètre 100 mm et de hauteur 400 mm et qui ont été séparées en trois séries. Après les périodes de cure considérées, les trois séries de béton sont exposées à HR = 50% et à T = 23 °C. Le Tableau 2.22 résume les données des bétons étudiés ainsi que les techniques de la cure prises en compte dans cette étude.

Tableau 2.22 : Caractéristiques des bétons - essai de Dilger [126]

	Série B1	Série B2	Série B3
Type de ciment	RN	RN	RN
E/C en poids	0,34	0.34	0.34
Granulat/Ciment	4.33	4.33	4.33
Résistance à la compression (f_{c28}) (MPa)	80	80	80
Périodes de cure (jours)	1	3	7
Humidité de milieu de conservation (%)	50	99	99

Les rapports des déformations de retrait des trois séries de béton (B1-B3) en fonction du temps de séchage présentés sur la Figure (2.25) montrent que ; lorsque le temps de séchage dépasse 10 jours depuis le début des mesures, les deux séries B1 et B2

ont les mêmes déformations, nonobstant que les deux séries n'ont pas une même période de cure et que l'humidité du milieu de conservation est différente. Ce résultat implique que pour une période de cure ≤ 3 jours, l'humidité de milieu de conservation n'a un effet qu'à jeune âge.

Lorsque la période de cure augmente (7 jours), le rapport de retrait entre les séries B1 et B3 (ou entre B2 et B3) varie entre 1 et 1.2 à partir de 21 jours depuis le début des mesures, ce qui confirme les résultats obtenues dans l'essai de Wesche ; pour les bétons composés de ciment type RN, la période de cure influe sur la déformation de retrait.

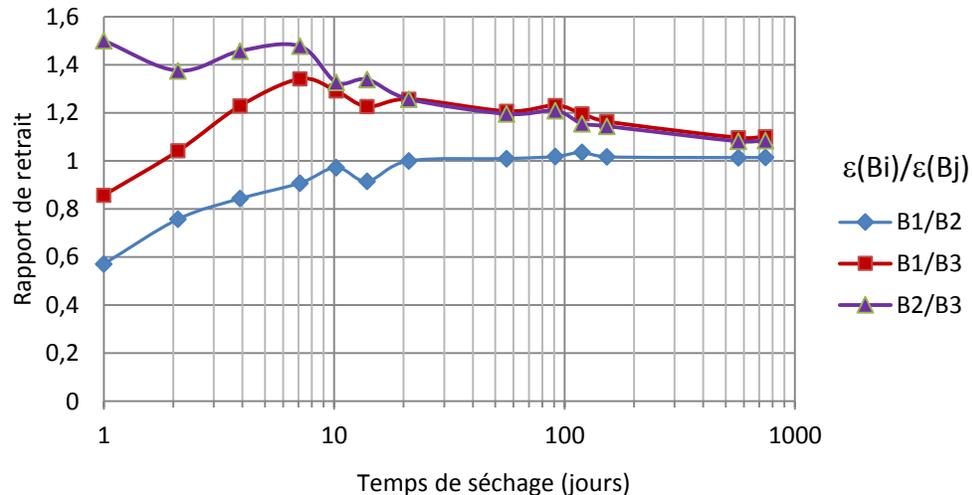


Figure 2.25 : Comparaison des rapports de retrait des bétons de différente période de cure- Essai de Dilger.

2.3.3.4. Essai de York

Trois facteurs ont été étudiés dans cet essai ; l'humidité du milieu de conservation de béton, la température et l'humidité de l'environnement. Les éprouvettes testées ont une forme cylindrique de diamètre 152.4 mm et de hauteur 406.4 mm, séparées en plusieurs séries. Nous avons choisi dans notre étude deux séries qui ont une seule différence qui est l'humidité du milieu de conservation. Après une période de conservation de 90 jours les éprouvettes sont exposées à HR = 99% et a T = 66 °C. Le Tableau 2.23 résume les caractéristiques du béton étudié et les conditions de conservation.

Tableau 2.23 : Caractéristiques des bétons – essai de York [126]

	Série B1	Série B2
Type de ciment	SL	SL
E/C en poids	0,34	0.34
Granulat/Ciment	4.624	4.624
Résistance à la compression (f_{c28}) (MPa)	44.2	44.2
Périodes de cure (jours)	90	90
Humidité de milieu de conservation (%)	60	101

HR = 101% exprime conservation dans l'eau.

Les rapports de retrait entre les deux séries B1 et B2 ($\varepsilon(B1)/\varepsilon(B2)$) en fonction du temps de séchage présentés dans la Figure 2.26 montrent que la déformation de retrait de béton conservé à H = 60% est presque deux fois la déformation du béton conservé dans l'eau (HR = 101%). Dans le premier temps de séchage (10 jours), le rapport de retrait est important, et c'est évident, car la comparaison est entre un béton saturé pendant 90 jours et un béton séché pendant 90 jours sous humidité de 60%. Après 10 jours de séchage le rapport chute de 8.5 à 1.4 à cause de la température élevée (66°C), puis après 60 jours il augmente jusqu'à 2.2.

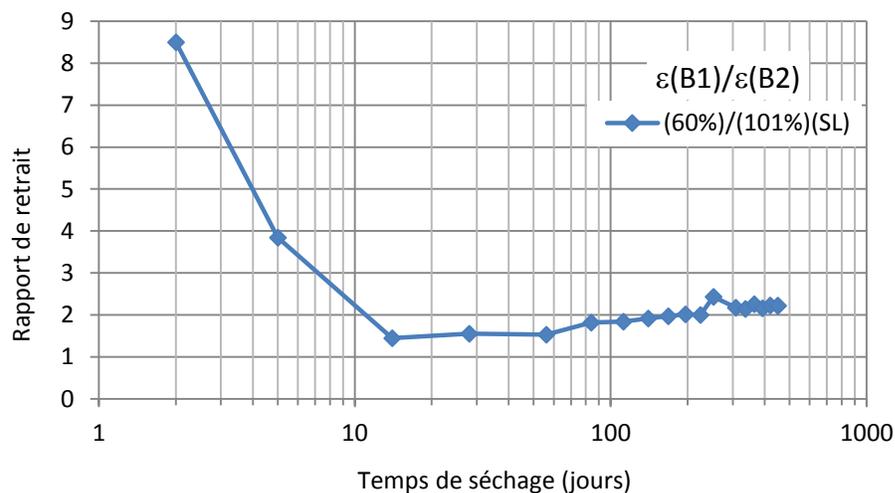


Figure 2.26 : Comparaison des rapports de retrait des bétons de différente période de cure- Essai de York.

Il est à noter que les déformations maximales de retrait de deux séries 1 et 2, ne dépassent pas 70 $\mu\text{m}/\text{m}$ et 35 $\mu\text{m}/\text{m}$ respectivement. Si on essaye d'approfondir dans les données et les résultats de cet essai, nous pouvons constater que réellement les rapports des retraits obtenus entre les deux séries du béton sont dus aux trois facteurs ; période et type de cure et la température.

- La série 1 est conservée à HR = 60% pendant 90 jours puis exposée à l'air où HR = 99% et T=66°C, c'est à dire que cette série est déjà séchée pendant la période de conservation, avant d'être exposée à l'air humide (HR = 99%) et chaud (T = 66°C).
- La série 2 est conservée à HR = 101% pendant 90 jours puis exposée à l'air où HR = 99% et T = 66°C. Dans ces conditions, les éprouvettes sont passées d'une situation qui est le gonflement à une autre opposée qui est le retrait sous l'effet de la température et de faible diminution de HR.

2.3.3.5. Essai de Budelmann

Dans cet essai nous voulons comparer le retrait de deux séries de bétons conservées sous deux conditions différentes. Les éprouvettes testées de 50mm \times 150mm \times 600mm ont été exposées à une température T = 50°C et une humidité relative HR= 65 % après une durée de protection de 150 jours. La série B1 a été conservée à HR= 65% et la série B2 à HR = 95%. Les détails des bétons étudiés sont présentés dans le Tableau 2.24.

Tableau 2.24 : Caractéristiques des bétons- essai de Budelmann [126]

	Série B1	Série B2
Type de ciment	RN	RN
E/C en poids	0,54	0.54
Résistance à la compression (f_{c28}) (MPa)	44.1	44.1
Humidité de milieu de conservation (%)	65	95

Les résultats schématisés dans la Figure (2.27) éclairent la différence entre les retraits des bétons de différentes conditions de conservation. La déformation de retrait du béton conservé à faible HR (65%) est supérieure de 2.5 à 3 fois à celle du béton conservé dans un milieu humide (95%). Cette différence est réellement la conséquence de trois facteurs ; période et mode de conservation et la température.

La série 1 a été conservée à HR = 65% pendant 150 jours, puis exposée à HR = 65% et à T= 50°C.

Donc l'humidité de milieu avant et après la période de conservation reste constante, et le béton a été déjà soumis au séchage avant le début des mesures. Donc il n'y a pas une période de cure mais un changement de température après 150 jours. Par contre, la série 2 a été conservée à HR = 95% pendant 150 jours, puis exposée à HR = 65% et à T=50°C, cette série est donc influencée par la période et le mode de conservation et la température. En plus, et d'après les résultats de l'essai précédent (Essai de York) l'effet de la température sur un béton mouillé (de faible déformation) est différent par rapport à un béton séché. Finalement nous pouvons constater que les rapports des retraits obtenus entre les deux séries sont dus aux effets combinés entre la période et le type de la cure et la température.

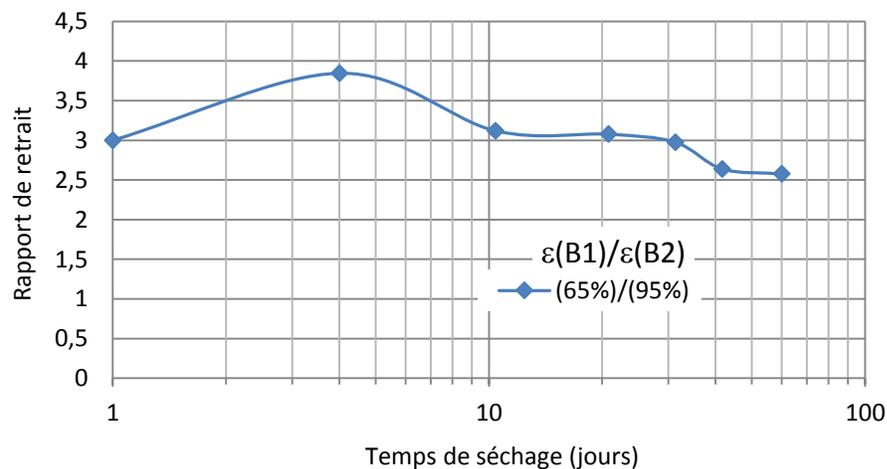


Figure 2.27 : comparaison des rapports de retrait des bétons de différente période de cure - Essai de Budelmann.

2.3.3.6. Conclusion

D'après les constatations tirées à travers l'analyse de l'effet de la période de cure et de type de cure de différents essais nous pouvons conclure sous les deux titres :

➤ Effet de la période de cure

- La période de cure n'a pas d'influence sur le béton composé de ciment type RS : $K_{PC} = 1$

- Les retraits des bétons composés de ciment type SL ou RN sont sensibles aux périodes de cure. Malheureusement, il n'est pas facile d'estimer cette sensibilité dans le modèle, car il paraît qu'elle dépend de la température et de la teneur en eau dans le béton (E/C) et de l'humidité du milieu de conservation. Mais pour une température ambiante nous avons l'impression que le coefficient qui exprime l'effet de la période de cure varie de 1.1 à 1.2 lorsque la durée de cure est inférieure à 7 jours.

➤ Effet de type de cure

Les techniques de la cure sont nombreuses, elles sont toutes pour un seul objectif qui est la protection de béton jeune contre l'évaporation. On peut les classer en deux types : cure sèche et cure humide. Si l'humidité du milieu de conservation est faible par rapport à celle du béton, on aura une diffusion d'humidité de l'intérieur vers l'extérieur sous l'effet de séchage. Dans ce cas on parle de la cure sèche. Si l'humidité de milieu de conservation est élevée ou proche par rapport à celle du béton, on aura soit une faible diffusion d'humidité ou peut être il n'y aura aucun changement d'humidité ou on aura un gonflement, dans ce cas on parle de la cure humide.

Les résultats des essais de York et Budelmann montrent la différence de retrait entre les bétons de cure humide et ceux de cure sèche. Cette différence est importante lorsque les conditions de conservation sont nombreuses et différentes (période de cure, type de cure (humidité de milieu de conservation et la température). Ce qui rend la détermination du coefficient qui exprime l'effet de type de la cure difficile. Dans ce cas il est préférable de déterminer le retrait ultime des bétons de différentes périodes et types de cure, afin d'évaluer les coefficients de la cure.

2.3.4. Effet de dosage en ciment et en eau

Par définition le béton est un matériau hétérogène et donc sa structure composite doit être prise en considération. En général, pour obtenir un béton de bonne qualité, les granulats utilisés doivent avoir un module d'élasticité élevé et une faible porosité. La présence des granulats dans le béton réduit le retrait ultime. Pour la même quantité de granulats, le retrait dépend de la taille globale des granulats. Une diminution de la taille maximale provoque une augmentation de la surface totale

à couvrir par la pâte, et donc une augmentation du retrait. Dans le cas d'un volume de pâte constant, le retrait varie selon le type de ciment et la teneur en eau. La relation entre le retrait et le type de ciment est complexe, elle dépend des propriétés physico-chimiques du ciment. Afin de déterminer une expression de retrait ultime, il est nécessaire d'éliminer l'influence des paramètres pris en considération dans notre étude tels que l'humidité relative, le type et la période de cure et la dimension des pièces.

Au début, nous avons essayé de déterminer une relation entre le retrait et le rapport E/C, mais nous n'avons pas réussi. Lorsque ce rapport (E/C) est élevé, une quantité d'eau s'évapore et une autre reste dans les pores sans variation du volume réel de l'échantillon et donc la quantité réelle d'eau responsable sur la grandeur de retrait n'est pas connue.

Tant que le retrait du béton est proportionnel au retrait de la pâte du ciment, nous proposons d'introduire le volume de la pâte du ciment dans la formulation du modèle. Le ciment influe sur le retrait par deux facteurs : le dosage et le type de ciment, donc la détermination du coefficient qui exprime l'effet de la composition du béton doit être fait sur les différents types de ciment.

Les résultats trouvés dans le paragraphe 2.3.3 ne sont pas définitifs, surtout pour les ciments type RN et SL. Vu le couplage entre la période et le type de ciment dans certains essais nous n'avons pas fixé les coefficients qui expriment l'effet de ces facteurs. Et donc, dans cette partie d'analyse nous divisons les essais selon le type de ciment et selon les conditions de conservation pour déterminer le retrait ultime et les coefficients de la cure.

Les démarches suivies dans cette étape sont :

- 1- La détermination des valeurs de retrait ultime à partir des rapports de retrait mesuré sur les coefficients déterminés (équation 2.30)
- 2- La détermination de l'expression de retrait ultime ainsi que les coefficients de la cure.

2.3.4.1. Béton composé de ciment type RS

Les résultats du paragraphe 2.3.3 montrent que la période de cure n'a pas d'influence sur le retrait du béton composé de ciment type RS. Pour cette raison nous commençons la détermination du retrait ultime sur les bétons composés de ciment type RS. Le Tableau 2.25 regroupe les valeurs du retrait ultime (φ) déterminées par l'équation 2.30 sur des bétons composés de ciment type RS.

Tableau 2.25 : Retrait ultime des bétons composés de ciment type RS

Période de cure (jours)	Type de cure	Chercheurs	E/C	C (kg/m ³)	f _{c28} (MPa)	V _P (l)	φ
8	H = 99%	Keeton	0.46	452	45.2	351.4	1500
8	H = 99%	Hanson	0.71	303	41.3	311.3	1300
1.3.7	H = 65%	Wesche	0.55	337	46.5	292.3	1000
1-3-7-28-90	scellé	Hisdorf	0.55	337	40.3	292.3	1000
1	H = 65%	R+H*	0.6	304	38.5	278.9	900
1	H = 65%	R+H*	0.45	350	50.4	268.6	850
7	H = 65%	R+H*	0.49	401	43.8	323.8	1200

*. Rusch + Hummel [126]

La Figure 2.28 représente les valeurs du retrait ultime (φ) en fonction du volume de la pâte de ciment. Les résultats montrent que les valeurs de φ varient linéairement en fonction du volume de la pâte de ciment des bétons de différents types et périodes de cure. Ce qui confirme que la cure n'a pas d'influence sur le retrait du béton composé de ciment type RS.

Les trois fonctions : exponentiel, logarithmique et linéaire donnent de bonnes corrélations comme il est montré dans la Figure 2.28. Nous avons choisi la fonction exponentielle car elle est plus simple par rapport aux deux autres fonctions pour construire une équation applicable sur le retrait des bétons de ciment type SL et RN. En plus et selon la théorie de diffusion le retrait ultime est une fonction exponentiel [58, 134].

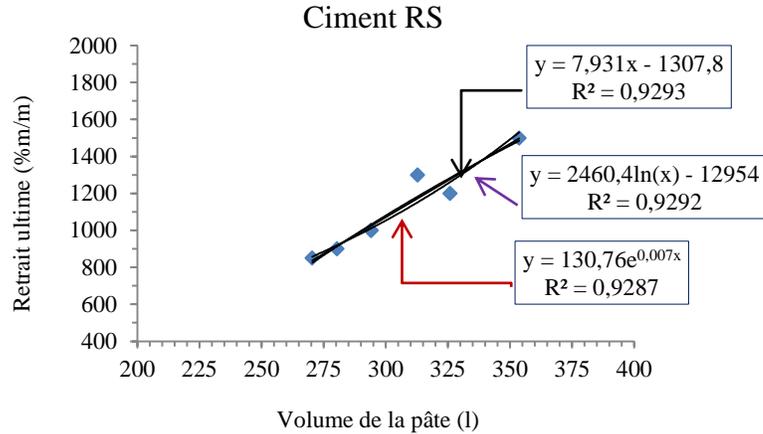


Figure 2.28 : Variation de retrait ultime en fonction du volume de la pâte de ciment type RS.

2.3.4.2. Béton composé de ciment type RN

De la même manière nous déterminons l'équation du retrait ultime en fonction du volume de la pâte de ciment type RN. Le Tableau 2.26 regroupe les données des bétons composés de ciment type RN, ainsi que les valeurs de retrait ultime déterminées par l'équation 2.30.

Tableau 2.26 : Retrait ultime des bétons composés de ciment type RN

Période de cure	Condition de conservation	Chercheurs	E/C	C (kg/m ³)	f _{c28}	V _P (l)	φ
7 j	Scellé	Hummel	0.55	334	41.9	291.44	1100
7 j	H ₀ =65%	Hummel	0.55	334	28.3	293.19	1000
28 j	Scellé	Wallo	0.5	396	46.2	325.7	1400
7 j	H ₀ =65%	Wesche	0.55	336	33.2	293.19	1050
8 j	Scellé	F.Alou	0.48	332	42.5	266.5	900
8 j	Scellé	F.Alou	0.65	266	26	258.7	850
8 j	Scellé	F.Alou	0.55	296	36.6	258.3	800
8 j	Scellé	F.Alou	0.45	332	46.1	256.5	800
7 j	H ₀ =65%	Rusch	0.85	239	16.8	280.25	820
7 j	H ₀ =65%	R+H	0.49	344	48	279.53	960
3 j	Scellé	Weigher	0.50	350	40.7	287.90	1100
3 j	Scellé	Weigher	0.50	350	44.7	287.90	1100
3 j	Scellé	Wesche	0.55	336	33.2	293.19	1300
1 j	Scellé	Lambotte	0.55	300	30.6	261.77	900
1 j	Scellé	Lambotte	0.50	300	29.2	261.77	800
1j	Scellé	Lambotte	0.445	360	41.9	297.2	1100

La variation de retrait ultime en fonction du volume de la pâte de ciment type RN est schématisée dans la Figure 2.29. La différence des conditions de conservation des bétons est probablement la cause qui donne une corrélation plus faible ($R^2=0.758$), donc il est important de séparer les bétons selon la période et mode de cure où nous avons opté pour trois groupes : le premier groupe concerne les bétons scellés pendant une période supérieure ou égale à 7 jours. Le deuxième groupe concerne les bétons scellés pendant 1 et 3 jours et le troisième groupe concerne des bétons protégés à humidité de 65% durant 7 jours. La variation du retrait ultime de ces bétons en fonction du volume de la pâte est illustrée dans les Figures 2.30 à 2.32.

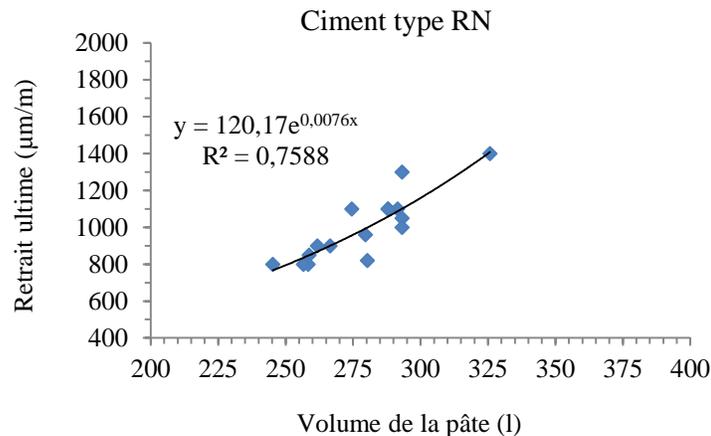


Figure 2.29 : Variation de retrait ultime en fonction du volume de la pâte de ciment type RN.

La séparation des trois groupes de bétons donne des bonnes corrélations de retrait ultime avec le volume de la pâte de ciment. Ce qui exprime que la période et le type de cure doivent être inclus dans la prédiction de retrait des bétons composés de ciment type RN.

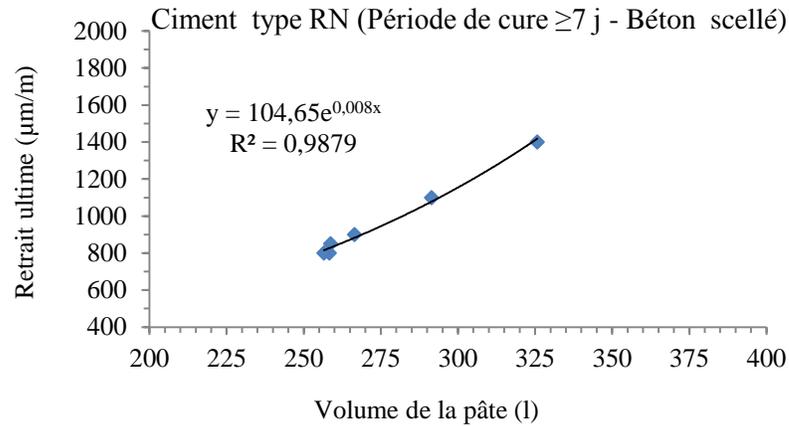


Figure 2.30 : Variation de retrait ultime en fonction du volume de la pâte de ciment type RN – Période de cure ≥ 7 jours - Béton scellé.

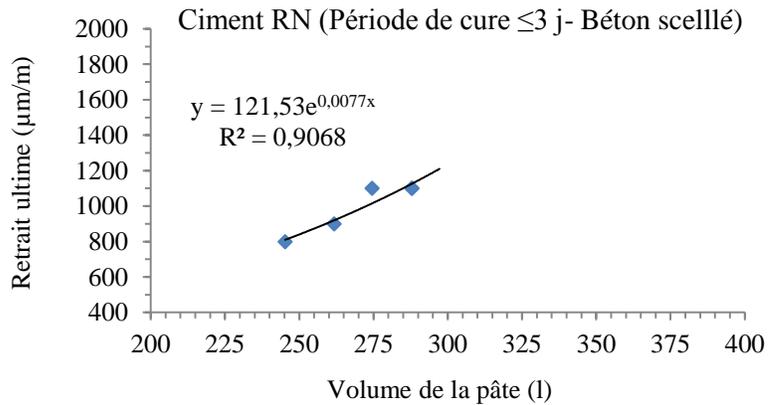


Figure 2.31 : Variation de retrait ultime en fonction du volume de la pâte de ciment type RN – Période de cure ≤ 3 jours - Béton scellé.

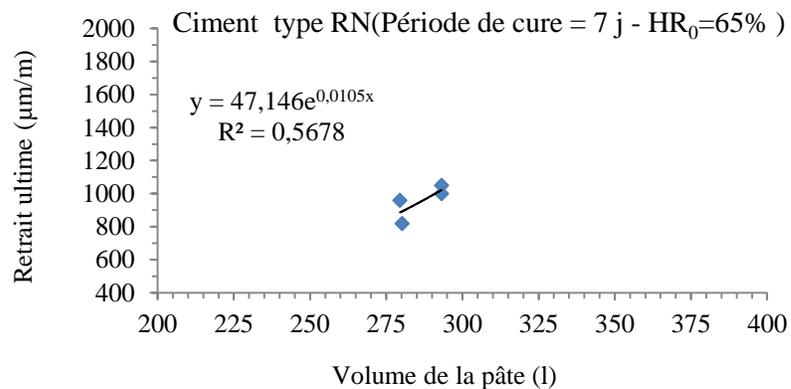


Figure 2.32 : Variation de retrait ultime en fonction du volume de la pâte de ciment type RN – Période de cure 7 jours – Béton curé à $HR = 65\%$.

2.3.4.3. Béton composé de ciment type SL

De la même manière nous déterminons les valeurs du retrait ultime des bétons regroupés dans le Tableau 2.27 en fonction du volume de la pâte de ciment type SL (Figure 2.33). Dans cette série nous avons deux types de cure de même période. Pour cette raison, on a trouvé une corrélation acceptable ($R^2 = 0.81$). Les valeurs du retrait ultime en fonction du volume de la pâte pour chaque mode de conservation sont illustrées dans les Figures 2.34 et 2.35. Les résultats présentés sur les Figures 2.34 et 2.35 indiquent que la mode de conservation influence le retrait de séchage de béton composé de ciment type SL.

Tableau 2.27 : Retrait ultime des bétons composés de ciment type SL

Période-cure	Type - cure	Chercheurs	E/C	C (kg/m ³)	f _{c28} (MPa)	V _P (l)	φ
7 j	Scellé	Bazant	0.48	350	33.2	284.7	1200
7 j	Scellé	hummel	0.45	345	35.3	270.3	950
7 j	Scellé	hummel	0.38	350	43.1	249.7	800
7 j	Scellé	hummel	0.55	334	26.9	295.0	1150
7 j	Scellé	hummel	0.65	328	18.7	322.5	1380
7 j	H ₀ =65%	Stokl	0.45	353	23.9	276.5	950
7 j	H ₀ =65%	Rusch	0.55	337	24.4	297.7	1100
7 j	H ₀ =65%	Rusch	0.55	337	25.8	297.7	1100
7 j	H ₀ =65%	Rusch	0.55	337	26.4	297.7	1200
7 j	H ₀ =65%	Rusch	0.55	337	23.4	297.7	1100
7 j	H ₀ =65%	Rusch	0.55	337	27.8	297.7	1200
7 j	H ₀ =65%	Rusch	0.55	337	28.4	297.7	1100
7 j	H ₀ =65%	Stokl	0.60	358	17.7	334.1	1450
7 j	H ₀ =65%	Wesche	0.55	337	33.9	297.68	1000
7 j	H ₀ =65%	Wesche	0.55	336	33.1	296.8	1110
7 j	H ₀ =65%	Wesche	0.55	336	30.5	296.8	1200

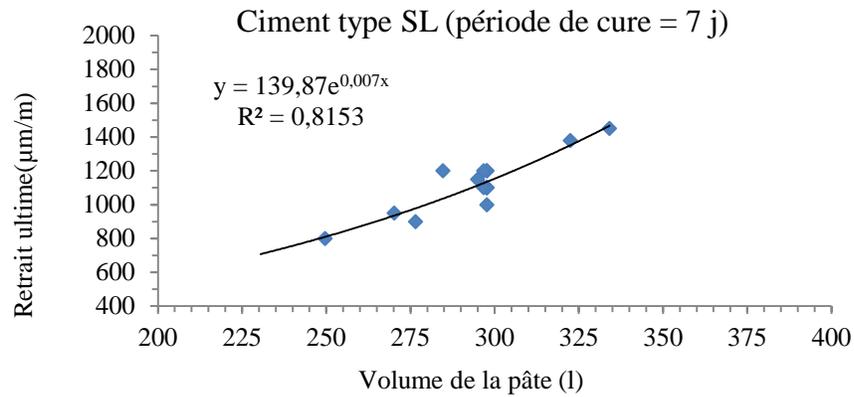


Figure 2.33 : Variation du retrait ultime des bétons composés de ciment type SL en fonction du volume de la pâte

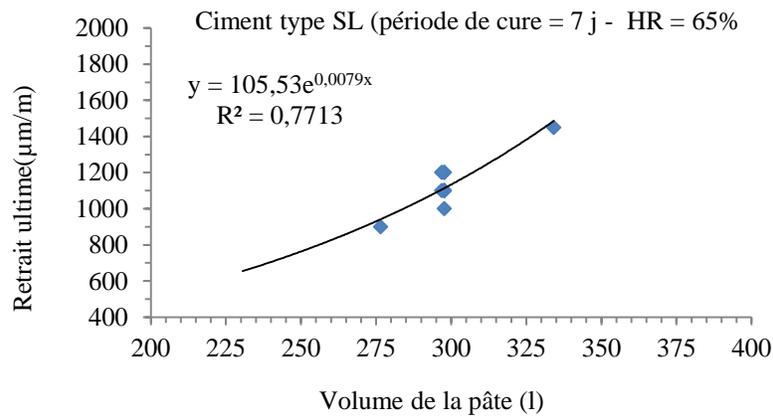


Figure 2.34 : Variation du retrait ultime en fonction du volume de la pâte - bétons composés de ciment type SL curé à HR = 65% durant 7 jours.

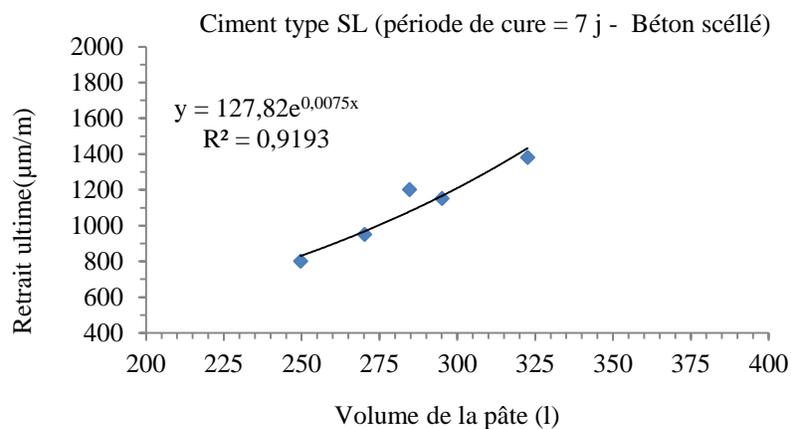


Figure 2.35 : Variation du retrait ultime en fonction de volume de la pâte - bétons composés de ciment type SL scellé durant 7 jours.

2.3.4.4. Analyse des équations de retrait ultime pour les trois type de ciment

Les courbes de tendance déterminées sur les bétons de différents types de ciment (SL, RN, RS) présentées dans les Figures 2.28-2.35 ont la forme suivante :

$$\varphi = \xi \times e^{(0.001 \times k_p \times V_p)} \quad (2.32)$$

$$\text{Si on considère que } \xi = \Psi \times K_{PC} \times K_{TC} \quad (2.33)$$

L'équation 2.32 devient :

$$\varphi = \Psi \times K_{TC} \times K_{PC} \times e^{(0.001 \times k_p \times V_p)}$$

$$\varphi = K_{TC} \times K_{PC} \times \varepsilon_{\infty} \quad (2.34)$$

$$\text{Avec } \varepsilon_{\infty} = \Psi \times e^{0.001 \times k_p \times V_p} \quad (2.35)$$

V_p : le volume de la pâte de ciment

K_{PC} : le coefficient qui exprime l'effet de la période de cure

K_{TC} : le coefficient qui exprime l'effet de type de cure

La comparaison entre les courbes de tendance des séries des bétons étudiés (Figures : de 2.28, 3.30 à 2.35) montrent que Ψ est inversement proportionnel à k_p et tourne autour de 100 ; donc on fixe la valeur de Ψ à 100 et on cherche la valeur de k_p qui donne la meilleure corrélation pour les bétons de différents types de ciment, et en parallèle on cherche les valeurs des coefficients qui expriment l'effet de la cure (K_{PC} et K_{TC}).

Béton composé de ciment type RS

Les constatations tirées dans le paragraphe précédent (2.3.3) sur le retrait du béton composé de ciment type RS et celles observées sur la Figure 2.28, montrent que la cure n'a pas d'influence sur le retrait de séchage, et donc $K_{PC} = K_{TC} = 1$. Pour $\Psi = 100$ nous avons trouvé que $k_p = 7.8$; le retrait ultime donné par l'équation (2.35) devient :

$$\varepsilon_{\infty} = 100 \times e^{0.0078 \times V_p} \quad (2.36)$$

La comparaison entre les valeurs de retrait estimé présentées dans le Tableau 2.25 et celles calculées par l'équation (2.36) est illustrée dans la Figure 2.36.

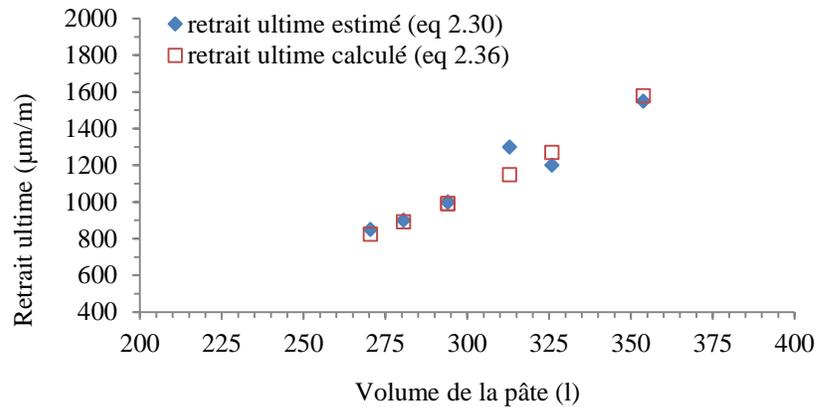


Figure 2.36 : Validation de l'expression de retrait ultime déterminée en fonction de volume de la pâte de ciment (eq 2.36) – béton composé de ciment type RS

Béton composé de ciment type RN

L'application de l'équation (2.35) sur les retrait des bétons composés de ciment type RN (avec $\Psi=100$) donne :

Béton scellé pendant 7 jours : $\varepsilon_{\infty} = 100 \times e^{0.0081 \times V_p}$ (2.37)

Béton curé 7 jours à HR = 65%: $\varepsilon_{\infty} = 100 \times e^{0.0078 \times V_p}$ (2.38)

Béton scellé pendant 1 et 3 jours : $\varepsilon_{\infty} = 100 \times e^{0.0085 \times V_p}$ (2.39)

La comparaison entre les retraits ultimes estimés par l'équation (2.30) et ceux calculés par les équations 2.37-2.39 est représentée dans les Figures 2.37 - 2.39 respectivement.

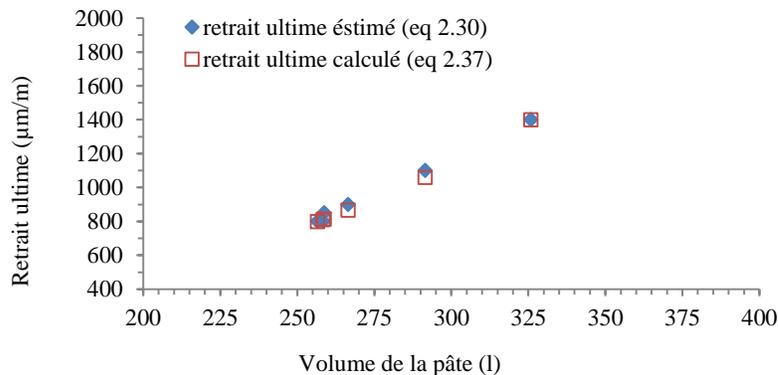


Figure 2.37 : Validation de l'expression de retrait ultime déterminée en fonction de volume de la pâte de ciment (eq 2.37)– béton composé de ciment type RN scellé durant 7 jours en minimum.

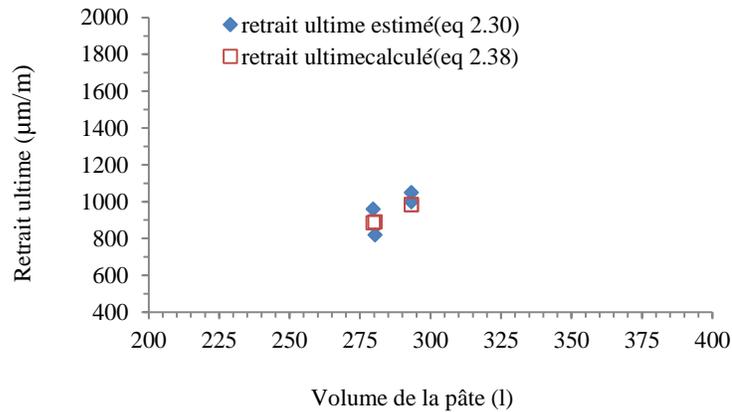


Figure 2.38 : Validation de l'expression de retrait ultime déterminée en fonction de volume de la pâte de ciment (eq 2.38)– béton composé de ciment type RN curé à HR = 65% durant 7 jours.

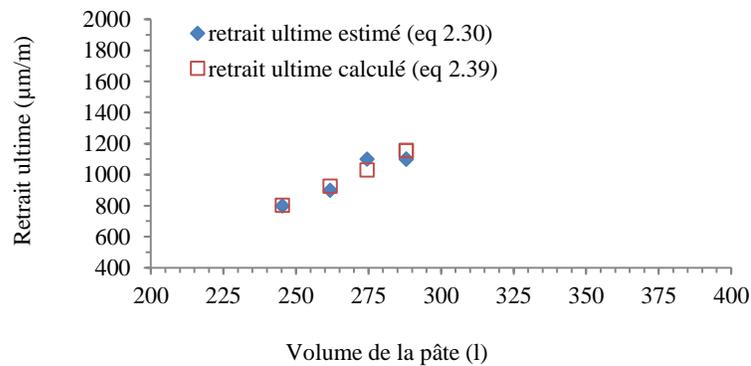


Figure 2.39 : Validation de l'expression de retrait ultime déterminée en fonction de volume de la pâte de ciment (eq 2.39)– béton composé de ciment type RN scellé durant 1 et 3 jours.

A partir des trois équations (2.37-2.39) nous pouvons déterminer les coefficients K_{TC} et K_{PC}

$$k_{TC} = \frac{\varepsilon_{\text{exp}}(t,7)_{65\%}}{\varepsilon_{\text{exp}}(t,7)_{\text{scellé}}} = \frac{e^{0.0081 \times V_p}}{e^{0.0078 \times V_p}} \approx 1.1 \quad (2.40)$$

$$k_{PC} = \frac{\varepsilon_{\text{exp}}(t,3)_{\text{scellé}}}{\varepsilon_{\text{exp}}(t,7)_{\text{scellé}}} = \frac{e^{0.0085 \times V_p}}{e^{0.0078 \times V_p}} \approx 1.2 \quad (2.41)$$

Béton composé de ciment type SL

De la même manière, nous déterminons l'équation du retrait ultime en fonction du volume de la pâte de ciment de type SL de deux séries de bétons. La valeur de K_p qui donne une bonne corrélation pour les deux séries (des bétons scellés pendant 7 jours et bétons conservés à HR = 65%) est égale à 8 et 8.3 respectivement. L'équation du retrait ultime déterminée est la suivante :

$$\text{Béton scellé pendant 7 jours} \quad \varepsilon_{\infty} = 100 \times e^{0.008 \times V_p} \quad (2.42)$$

$$\text{Béton curé à HR=65% pendant 7 jours} \quad \varepsilon_{\infty} = 100 \times e^{0.0083 \times V_p} \quad (2.43)$$

$$k_{TC} = \frac{\varepsilon_{\text{exp}}(t,7)_{65\%}}{\varepsilon_{\text{exp}}(t,7)_{\text{scellé}}} = \frac{e^{0.0083 \times V_p}}{e^{0.008 \times V_p}} \approx 1.1 \quad (2.44)$$

La comparaison entre les retraits ultimes estimés par l'équation (2.30) et ceux calculés par les équations (2.42) et (2.43) est représentée dans les Figures 2.40 et 2.41.

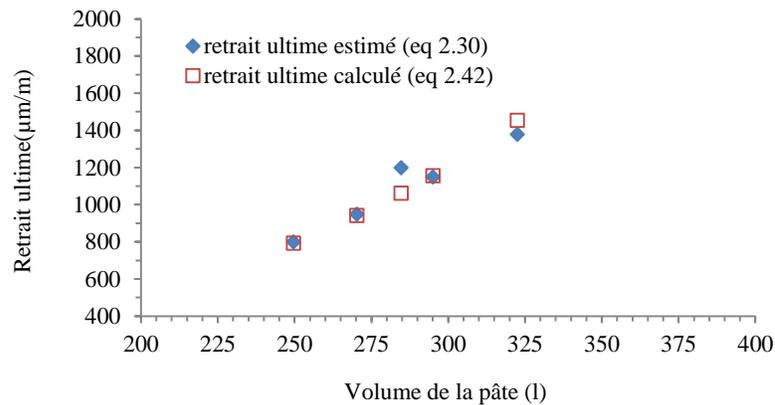


Figure 2.40 : Validation de l'expression de retrait ultime déterminée en fonction de volume de la pâte de ciment (eq 2.42)- bétons composés de ciment type SL scellé durant 7 j.

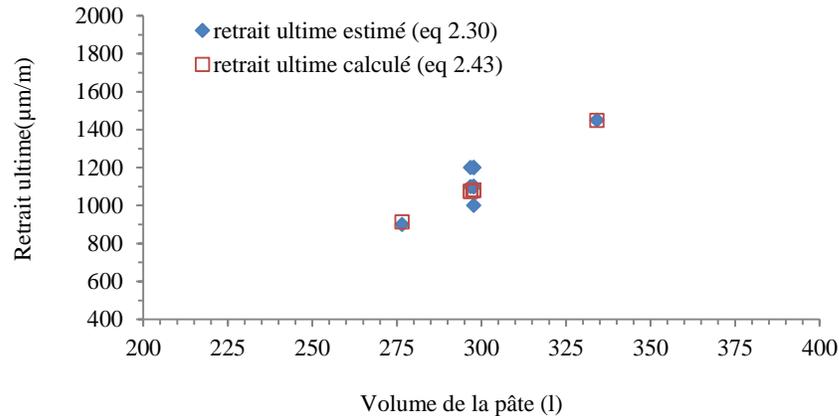


Figure 2.41 : Validation de l'expression de retrait ultime déterminée en fonction de volume de la pâte de ciment (eq 2.43) - bétons composés de ciment type SL curé à HR = 65% durant 7 jours.

Récapitulation des résultats

- Pour les bétons composés de ciment type RS : $\varepsilon_{\infty} = 100 \times e^{0.0078 \times V_p}$
- Pour les bétons composés de ciment type RN:
 - Si le béton est scellé au minimum 7 jours $\varepsilon_{\infty} = 1.1 \times 100 \times e^{0.0078 \times V_p}$
 - Si le béton est conservé à HR faible durant 7 jours $\varepsilon_{\infty} = 1 \times 100 \times e^{0.0078 \times V_p}$
 - Si le béton est scellé pendant 1 ou 3 jours $\varepsilon_{\infty} = 1.2 \times 100 \times e^{0.0078 \times V_p}$
- Pour les bétons composés de ciment type SL
 - Si le béton est scellé au minimum 7 jours $\varepsilon_{\infty} = 1.1 \times 100 \times e^{0.008 \times V_p}$
 - Si le béton est conservé à HR faible durant 7 jours $\varepsilon_{\infty} = 1 \times 100 \times e^{0.008 \times V_p}$

L'application de ces équations (2.40 et 2.41) sur les bétons composés de ciment type SL conservé à HR faible (cure sèche) et les bétons de période de cure ≤ 3 jours donne :

- Béton scellé $\varepsilon_{\infty} = 1.2 \times 100 \times e^{0.008 \times V_p}$
- Béton conservé à HR faible $\varepsilon_{\infty} = 1 \times 100 \times e^{0.008 \times V_p}$

Les valeurs des coefficients d'humidité ainsi que l'expression du retrait ultime obtenues sont validées par d'autres essais. Les résultats obtenus montrent que pour avoir une bonne précision du modèle proposé, il faut faire deux corrections ;

Pour les trois types de ciment : $K_p = 8$.

Pour ciment de type RN et SL :

$K_{PC} = 1.2$ lorsque la période de conservation < 7 jours

$K_{TC} = 1.2$ pour un béton scellé ou conservé dans l'eau

Finalement nous pouvons conclure que l'effet de la cure est exprimé par deux coefficients qui dépendent de type de ciment.

2.3.5. La forme finale du modèle

Le retrait du béton $\varepsilon_{sh}(t, t')$ a un instant t (jours) mesuré depuis la fin de cure du béton t' (jours), est exprimé par :

$$\varepsilon_{sh}(t, t') = \beta(t, t') \cdot K_{RH} \cdot K_{PC} \cdot K_{TC} \cdot \varepsilon'_{sh\infty} \quad (2.45)$$

Où $\beta(t, t')$ représente la loi d'évolution de retrait dans le temps:

$$\beta(t, t') = e^{-\left[\frac{f_{c28} \times \omega + 2 \times (R)}{f_{c28} \times [t-t']^{0.4}} \right]} \quad (2.46)$$

ω est un coefficient qui dépend du type de ciment

$$\omega = 0.1 \times (f_{c28} - 10) \quad \text{pour le ciment à prise normale ou rapide (RN)} \quad (2.47)$$

$$\omega = 0.01 \times (f_{c28} - 10) \quad \text{pour ciment à prise lente (SL) et le ciment à prise rapide ou de haute résistance (RS).} \quad (2.48)$$

$$R = 2V/S \quad : \text{ épaisseur fictive de l'élément (mm)} \quad (2.49)$$

$t-t'$: période de séchage du béton (jours)

$$K_{RH} : \text{coefficient d'humidité} \quad K_{RH} = 1 - \left(\frac{RH}{100} \right)^3 \quad (2.50)$$

K_{PC} : coefficient de la période de cure

Pour les bétons composés de ciment type RN ou SL

$$K_{PC} = \begin{cases} 1.2 & \text{si la période de cure} \leq 3 \text{ jours} \\ 1.0 & \text{si la période de cure} \geq 7 \text{ days} \end{cases} \quad (2.51)$$

K_{CT} : coefficient du type de la cure

Pour les bétons composés de ciment type RN ou SL

$$K_{TC} = \begin{cases} 1.0 & \text{pour cure sèche} \\ 1.2 & \text{pour cure humide} \end{cases} \quad (2.52)$$

Le ciment type RS n'est pas affecté par la période et le type de la cure :

$$K_{CP} = K_{CT} = 1 \quad (2.53)$$

$\mathcal{E}'_{sh\infty}$: La déformation du retrait ultime après correction :

$$\mathcal{E}'_{sh\infty} = 100.e^{\left(\frac{8 \times V_p}{1000}\right)} \quad (2.54)$$

Avec : V_p le volume de la pâte pure de ciment : $V_p = \frac{C}{\rho_c} + E$ (2.55)

C : dosage de ciment (kg/m^3)

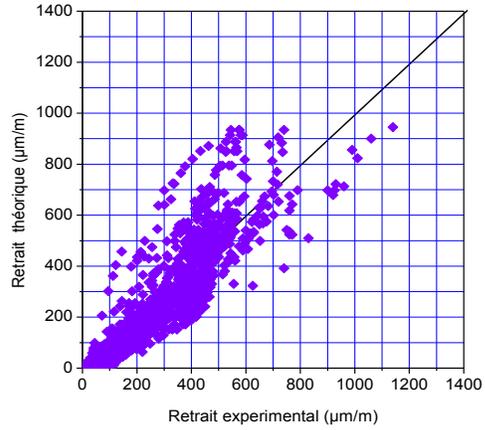
ρ_c : densité du ciment

E : dosage en eau (kg/m^3)

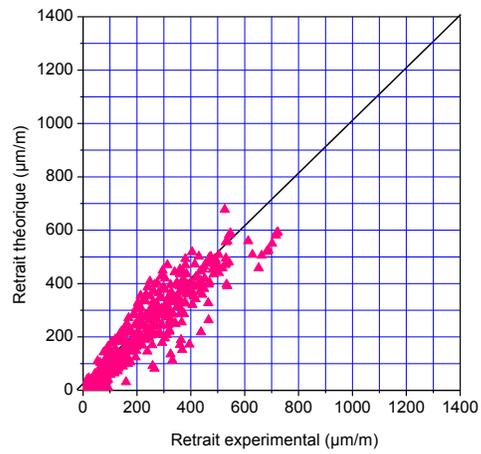
2.3.6. Limites de l'application du modèle

Lors de l'application du modèle, une divergence remarquable a été observée entre les déformations expérimentales et celles estimées sous certaines conditions ; ceci nous a obligé de limiter l'intervalle d'application du modèle. Les résultats de confrontation modèle/expérimental présentés sur la Figure 2.42 montrent que le modèle proposé est applicable sur un béton de résistance normale et sans adjuvants ou ajouts, conservé au minimum durant un jour et avec :

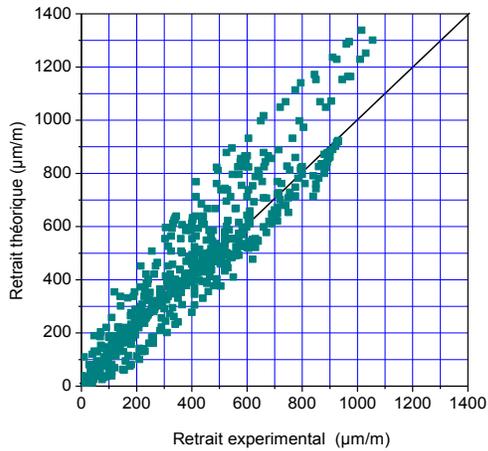
- Résistance en compressive à 28 jours (f_{c28}) : $15 \text{ MPa} \leq f_{c28} \leq 72 \text{ MPa}$
- Humidité relative (RH): $40\% \leq HR \leq 97\%$
- Rapport granulats /ciment (G/C): $2.8 \leq G/C \leq 7.5$



(a)



(b)



(c)

Figure 2.42: Confrontation modèle / expérimentale des déformations de retrait de séchage de béton. a- ciment type RN (75 essais; 1107 valeurs) ; b - ciment type SL (24 essais; 390 valeurs) ; c - ciment type RS (45 essais ; 648 valeurs)

CHAPITRE 3

VALIDATION DU MODELE DEVELOPPE

3.1. Introduction

La précision de l'estimation des déformations différées (retrait et fluage) du béton est importante dans la conception des structures en béton. Un modèle de prévision exacte peut mener à une conception plus sûre, une structure avec un minimum de fissuration, une longue durée de vie. De plus, un modèle précis peut réduire le coût.

Ce chapitre comprend deux parties : dans la première ; la performance du modèle sera comparée à celle des autres modèles par la valeur résiduelle et la sensibilité du modèle à certains paramètres tels que le type du ciment, les dimensions des pièces ainsi que les conditions de conservation. Les modèles comparés dans cette étude sont ceux développés pour estimer le retrait et le fluage du béton cités dans le premier chapitre : le modèle ACI 209 [113], le modèle CEB-90 [114], le modèle B3 [117] et le modèle GL2000 [120]. Pour ces quatre modèles on ne tient compte que des méthodes de calcul de la déformation du retrait de béton (présentées dans le chapitre 1). Dans la deuxième partie, la précision du modèle proposé sera comparée avec celle des modèles cités. Les deux parties de l'étude ne représentent pas seulement une comparaison, mais aussi une analyse et une validation du modèle proposé où les valeurs théoriques des déformations du retrait de séchage seront comparées avec les déformations expérimentales disponibles dans la littérature.

3.2. Analyse des paramètres d'entrée du modèle

Dans la première partie de comparaison, nous utilisons deux méthodes pour analyser la performance du modèle proposé sous l'effet de certains facteurs (la dimension de l'échantillon, le type du ciment et la période et le type de cure) :

1 - La valeur résiduelle (VR) du retrait qui est la différence entre les valeurs expérimentales et les valeurs calculées est proposée pour comparer l'effet de dimension des pièces:

$$VR = VM - VC \quad (3.1)$$

2 - La sensibilité du modèle proposé aux certains facteurs (dimension de l'échantillon, la période et le type de cure et le type de ciment) est déterminée par l'équation suivante:

$$S = \left[\frac{\varepsilon_{sh(V1)} - \varepsilon_{sh(V2)}}{\varepsilon_{sh(V1)}} \right] \cdot 100 \quad (3.2)$$

Avec VC : valeur calculée et VM est la valeur expérimentale

VI : valeur initiale du paramètre. Et V2: valeur du paramètre étudié après le changement.

$\varepsilon_{sh(V1)}$: la déformation de retrait du béton calculée pour la valeur initiale du paramètre étudié égal VI (dimension, le type et la durée de cure, type de ciment).

$\varepsilon_{sh(V2)}$: retrait de béton calculé après le changement de paramètre étudié de la valeur VI à la valeur V2

Il est à noter que les sensibilités des quatre modèles (CEB, B3, GL et ACI) à tous les facteurs qui influencent le retrait sont bien étudiées par Al-Manaseer et Ristanovic [125]. Dans notre étude, nous donnons plus d'importance à la sensibilité du modèle proposé aux facteurs cités précédemment.

3.2.1. Facteurs d'entrée des modèles de prédiction de retrait

Les facteurs d'entrée pris dans la prédiction de retrait et les limites d'application des cinq modèles sont présentés respectivement dans les tableaux 3.1 et 3.2 suivants.

Tableau 3.1: Les facteurs d'entrée des modèles de prédiction du retrait

Facteurs	CEB-90	ACI209	B3	GL2000	Modèle
Humidité Relative de l'environnement	X	X	X	X	X
Résistance en compression à 28 jours	X		X	X	X
Taille d'échantillon	X	X	X	X	X
Forme d'échantillon			X		
Type de la cure		X	X		X
Période de la cure		X			X
Dosage en eau			X		X
Dosage en ciment		X			X
Type de ciment	X		X	X	X

Tableau 3.2: Les limites d'application des modèles.

Facteurs	CEB 90	ACI 209	B3	GL 2000	Model
f_{c28} (MPa)	20-90	-	17.2-69	16-82	15-72
Humidité Relative (%)	40-100	40-100	40-100	20-96	40-97
Volume/Surface (mm)	-	-	-	>19	-
Eau /Ciment	-	-	0.35-0.85	-	-
Granulats /Ciment	-	-	-	-	2.8-7.5

3.2.2. Dimension de l'échantillon

La précision de la prédiction de la déformation à long terme dépend de la forme de la fonction de temps utilisée. Les différents types d'équations généralement utilisés ont l'expression de la puissance, l'expression logarithmique, l'expression exponentielle ou l'expression hyperbolique.

Le retrait diminue lorsque l'épaisseur augmente. Cette augmentation réduit dans le temps. En d'autres termes, l'effet des dimensions des pièces sur le retrait de séchage est inversement proportionnel à la durée de séchage. Cette observation est en accord avec les prédictions des quatre modèles ; CEB, GL2000, B3, et le modèle proposé, tandis que le modèle ACI néglige cette proportionnalité. La sensibilité au changement de dimension des échantillons selon les modèle GL2000, CEB et le modèle proposé dépend de la période de séchage comme il est montré dans les équations 3.3-3.7.

$$\text{CEB-90} \quad S(v/s) = \left(1 - \frac{0.035 \times ((V/S)_{(1)})^2 + (t - t_s)^{0.5}}{0.035 \times ((V/S)_{(2)})^2 + (t - t_s)^{0.5}} \right) \times 100 \quad (3.3)$$

$$\text{ACI-92} \quad S(v/s) = \left[1 - \frac{1.14 - 0.0035 \cdot (V/S)_{(2)}}{1.14 - 0.0035 \cdot (V/S)_{(1)}} \right] \cdot 100 \quad (3.4)$$

$$\text{GL2000} \quad S(v/s) = \left(1 - \frac{t - t_c + 19,25 \times (V/S)_{(1)}^{0.5}}{t - t_c + 19,25 \times (V/S)_{(2)}^{0.5}} \right) \times 100 \quad (3.5)$$

$$\text{B3} \quad S(v/s) = \left[1 - \frac{(V/S)_{(1)}}{(V/S)_{(2)}} \right] \cdot 100 \quad (3.6)$$

$$\text{Modèle proposé} \quad S(v/s) = \left(1 - e^{-2 \times \left[\frac{(2V/S)_{(2)} - (2V/S)_{(1)}}{f_{c28} \times (t-t)^{0.4}} \right]} \right) \times 100 \quad (3.7)$$

La comparaison des valeurs résiduelles calculées à partir des déformations de retrait calculées par les cinq modèles et les déformations du retrait expérimentales tirées de la littérature [55, 126] présentée sur la Figure 3.1 montre que:

- le modèle ACI sous-estime le retrait des bétons à base de ciment type RS lorsque l'épaisseur fictive ($2V/S$) est inférieure à 100 mm. Pour les autres cas, une surestimation a été remarquée où la valeur résiduelle de retrait augmente lorsque V/S augmente. Pour les éprouvettes prismatiques de faible dimension, certaines données montrent une importante déviation des déformations calculées que celles observées pour des pièces de grandes tailles en raison de l'adoption de coefficient qui exprime l'effet des dimensions de l'échantillon incorrect et qui n'est pas relié au temps [110]. Un résultat similaire a été également observé par d'autres chercheurs [125] qui ont noté que si le rapport V/S dépasse 315 mm, les valeurs de retrait calculées sont plus grandes et ne reflètent pas le comportement réel du béton.

- Le modèle B3 donne des valeurs résiduelles négatives lorsque l'épaisseur fictive ($2V/S$) est inférieure à 150 mm, ce qui explique qu'il sous estime le retrait des éprouvettes de faible dimension. Cette sous estimation diminue avec l'augmentation de l'épaisseur fictive. Ce modèle (B3) est très sensible à la variation des dimensions des éprouvettes. Cette sensibilité augmente de façon non linéaire avec l'augmentation de la différence entre les deux épaisseurs fictives comparées $(V/S)_{(1)}$ et $(V/S)_{(2)}$. Ceci est en accord avec les résultats de Al-Manasseur et Ristanovic [125] qui ont noté qu'une réduction de 50% du rapport V/S cause une augmentation de la sensibilité du modèle B3 d'environ 250 %, et si le rapport V/S augmente de 50 %, cette sensibilité est réduite à 20 %.

La déformation de retrait résiduelle calculée à partir des déformations estimées par le modèle GL2000 augmente avec l'augmentation du rapport V/S , c.-à-d. que ce modèle sous estime le retrait des pièces de faible dimension (< 50 mm) et surestime le retrait des pièces de dimension supérieure à 100 mm. Le modèle CEB aussi sous estime le retrait, cette sous-estimation diminue avec l'augmentation des dimensions des pièces.

- Les deux modèles CEB et B3 ont presque la même sensibilité au changement de dimension des pièces (Figure 3.2).

Avec le modèle proposé nous avons obtenu de faibles valeurs résiduelles de retrait (VR) pour différentes valeurs d'épaisseurs fictives étudiées ($2V/S$), ce qui implique que l'expression de la fonction déterminée qui relie des dimensions des pièces au temps exprime bien l'effet de dimension des pièces sur le retrait dans le temps. La sensibilité du modèle proposé au changement de dimension de l'échantillon est fonction de la durée de séchage et de la résistance à la compression du béton. La sensibilité maximale est obtenue au premier temps de séchage et avec une faible valeur de résistance à la compression (Figure 3.3).

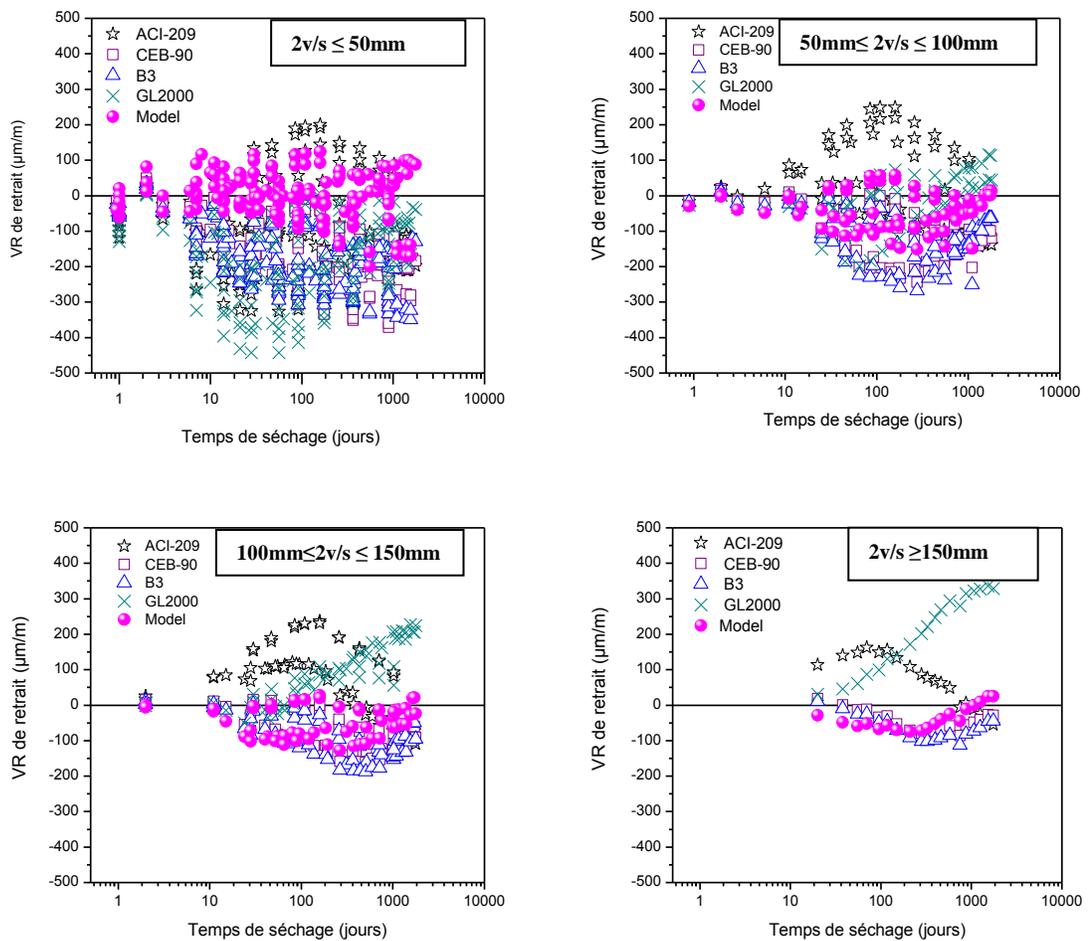


Figure 3.1 : Comparaison des valeurs résiduelles de retrait calculées par les cinq modèles.

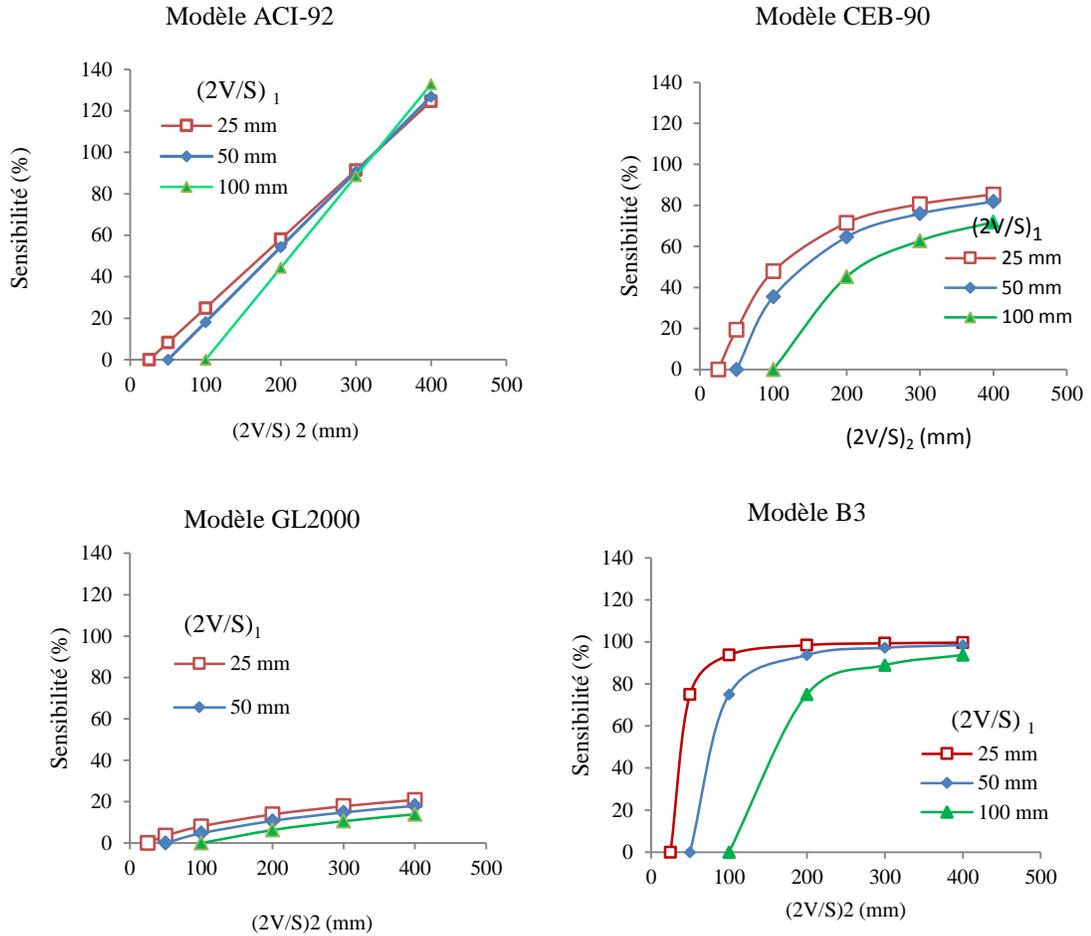


Figure 3.2 : Sensibilité des quatre modèles au changement de dimension des pièces en fonction de la durée de séchage - ($t-t'=100$ jours).

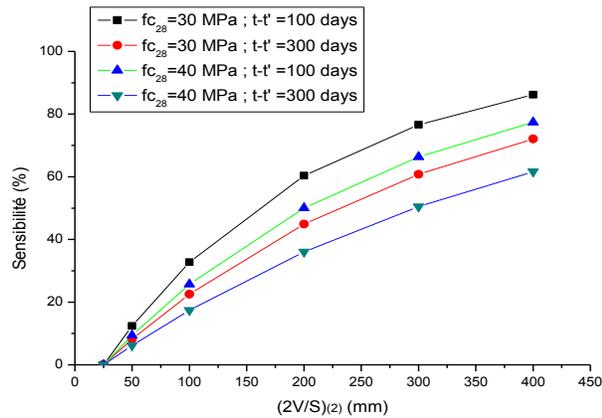


Figure 3.3 : Sensibilité du modèle proposé au changement de dimension des pièces en fonction de la durée de séchage et de la résistance du béton- ($(V/S)_1=25$ mm).

3.2.3. Comparaison des coefficients de la cure

L'effet de la cure est pris en compte par les modèles ACI et B3, alors que les deux autres modèles GL2000 et CEB négligent ce facteur. Le modèle ACI prévoit sept jours de cure humide, et a recommandé une période de 1 à 3 jours pour la cure par vapeur [133]. Le modèle B3 néglige la période de cure mais distingue entre trois types de cure. Les résultats de la confrontation des sensibilités des modèles ACI et B3 et le modèle proposé au changement de type et la période de cure déterminés par les équations 3.8 et 3.9 et présentés dans les tableaux 3.3 et 3.4 montrent que:

- Le modèle B3 est plus sensible au type de cure que le modèle ACI et le modèle proposé.

- Le modèle ACI est très sensible au type de cure pour le premier temps de séchage. Lorsque la durée de séchage augmente, l'effet de la période de cure devient négligeable (Figure 3.4).

- Le modèle proposé est moins sensible au type de cure que le modèle B3 dans le cas de ciment type RN et SL. La sensibilité du modèle proposé à la période de cure est similaire à celle relative au type de cure (Tableau 3.3).

$$S(\text{curing type}) = \left[1 - \frac{k_{CT(2)}}{k_{CT(1)}} \right] \cdot 100 \quad (3.8)$$

$k_{CT(1)}$: valeur initiale du coefficient qui dépend du type de la cure

$k_{CT(2)}$: la valeur de coefficient qui dépend du type de la cure après le changement

$$S(\text{curing period}) = \left[1 - \frac{k_{CP(2)}}{k_{CP(1)}} \right] \cdot 100 \quad (3.9)$$

$k_{CP(1)}$: valeur initiale du coefficient qui dépend de la période de cure

$k_{CP(2)}$: valeur du coefficient qui dépend de la période de cure après le changement

Tableau 3.3: Sensibilité du modèle proposé à la période de cure

Période de cure	3 j à 7 j	7 j à 3 j
S(%)	17	-20

Tableau 3.4: Sensibilité des modèles ACI, B3 et le Modèle proposé au type de cure

Méthodes	ACI		B3		Modèle ciment (RN /SL)	
	par vapeur à Humide	Humide à par vapeur	par vapeur à scellé	Scellé à par vapeur	Sèche à humide	Humide à sèche
S(%) : Max/Min	-57	36	-60	38	-20	17

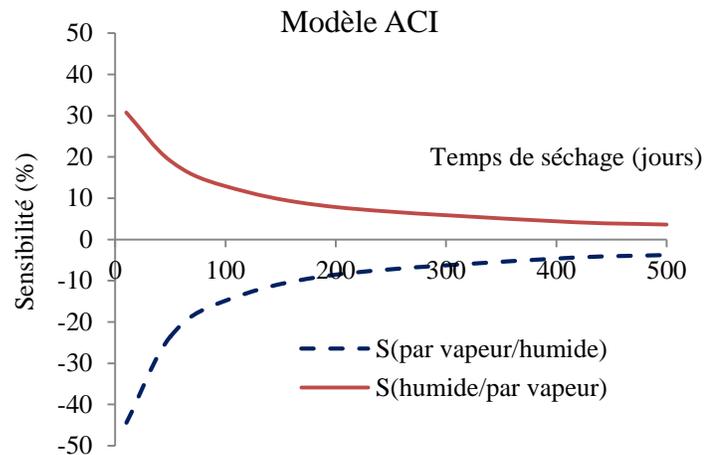


Figure 3.4 : Sensibilité du modèle ACI au changement de type de cure en fonction du temps.

3.2.4. Comparaison des coefficients du type de ciment

Le retrait du béton dépend du retrait de la pâte du ciment. La diminution du retrait de séchage est principalement due à la diminution de la porosité capillaire. Cette dernière est liée principalement au rapport eau/ciment et au type de ciment (finesse et composition). Le rapport eau/ciment est l'un des principaux facteurs contrôlant le retrait de séchage final de la pâte de ciment. La comparaison entre les sensibilités des différents modèles au changement de la résistance à la compression (f_{c28}) ou rapport eau/ciment, est une comparaison entre les différents bétons. Cette partie est présentée dans le paragraphe 3.3. Dans cette section, seul l'effet du type de ciment est étudié.

L'effet de la composition du béton a été pris en considération dans les modèles de prédiction de retrait de façons différentes :

- Le modèle B3 donne plus d'importance à la quantité d'eau et au type de ciment et peu d'importance à la résistance en compression.

- Les modèles CEB-90 et GL2000 limitent l'effet de la composition du béton à la résistance en compression et le type de ciment.

- Dans le modèle proposé, trois paramètres ont été inclus : le volume de la pâte, la résistance à la compression et le type de ciment.

Les bétons de même composition, mais de différents types de ciment ont des propriétés physiques et mécaniques différentes (module d'élasticité, résistance à la compression et la porosité) [135-138]. En d'autres termes, la sensibilité au changement du type de ciment est fonction de la résistance à la compression. Cette constatation est en accord avec les deux modèles CEB et GL2000. Le modèle B3 ajoute à la résistance en compression le dosage en eau, tandis que pour le modèle proposé, la sensibilité au type de ciment est liée à la résistance en compression, la dimension de l'échantillon et à la durée de séchage comme il est présenté sur les équations 3.10 -3.13 :

$$\text{GL2000} \quad S(C) = \left(1 - \frac{k_{(2)} \times (f_{c28})_{(1)}^{0.5}}{k_{(1)} \times (f_{c28})_{(2)}^{0.5}} \right) \times 100 \quad (3.10)$$

$$\text{B3} \quad S(C) = \left(1 - \frac{(0.019\omega^{2.1} \times (f_{c28})_{(2)}^{-0.28} + 270) \times k_2}{(0.019\omega^{2.1} \times (f_{c28})_{(1)}^{-0.28} + 270) \times k_1} \right) \times 100 \quad (3.11)$$

$$\text{CEB-90} \quad S(C) = \left(1 - \frac{10 \times k_{(2)} \times \left(9 - \frac{(f_{c28})_{(2)}}{10} \right) + 160}{10 \times k_{(1)} \times \left(9 - \frac{(f_{c28})_{(1)}}{10} \right) + 160} \right) \times 100 \quad (3.12)$$

$$\text{Proposed model} \quad S(C) = \left(1 - \frac{\beta(t, t')_{(2)} \times \varepsilon_{sh\infty(2)}}{\beta(t, t')_{(1)} \times \varepsilon_{sh\infty(1)}} \right) \times 100 \quad (3.13)$$

Avec $k_{(1)}$: valeur initiale du coefficient qui dépend du type de ciment.

$k_{(2)}$: valeur du coefficient qui dépend de type du ciment après le changement

Pour comparer les quatre équations ci-dessus, il est important d'utiliser les valeurs expérimentales. Dans ce cas, nous avons utilisé les résultats des essais tirés de la base de données NU- ITI [126] représentés dans le Tableau 3.5. Les sensibilités des modèles étudiés au type de ciment présentées dans le Tableau 3.6 montrent que le modèle GL2000 est plus sensible que les modèles CEB-90 et B3, en particulier, lorsque le ciment change de type RN ou RS au type SL. Alors que lorsque le changement est entre les ciments type RS et RN, les deux modèles B3 et GL2000 sont les moins sensibles.

Tableau 3.5: Données des essais [126]

type de Ciment	w/c	a/c	C	f_{c28} (MPa)	E_{28} (MPa)	Géométrie	R (mm)	H_0 (%)	t' (day)	T (°C)	HR (%)
RN	0.55	5.39	336	33.2	32200	C 200×800	100	65	7	20	65
RS	0.55	5.4	337	46.5	37500	C 200×800	100	65	7	20	65
SL	0.55	5.39	336	33.9	27800	C 200×800	100	65	7	20	65

e/c: rapport eau-ciment en poids

g/c: rapport granulats - ciment en poids

C: dosage en ciment sans ajouts, en kg/m³

f_{c28}: résistance à la compression du béton à âge 28 jours, en MPa (pour les cylindres de dimension standard ou convertie à partir d'essais de cube)

E₂₈: Module d'élasticité à âge 28 jours, en MPa

Géométrie: taille et forme des éprouvettes (C cylindre plein , diamètre × la hauteur en mm)

R: épaisseur fictive de l'échantillon ($2\sqrt{V/S}$), qui est ($2 \times$ volume de l'échantillon / surface exposée à l'environnement) en mm

H₀: l'humidité ambiante du milieu de conservation de l'échantillon s'il n'est pas cacheté (%)

t': l'âge du béton au début de l'exposition environnementale, en jours (période de cure)

T: température en °C

HR: humidité relative de l'environnement (%)

D'après les résultats présentés dans les Figures 3.5 et 3.6. Il semble que la sensibilité au changement du type de ciment dépend des propriétés mécaniques qui se développent dans le temps. Le modèle proposé est plus sensible au type de ciment dans le premier temps de séchage, et en particulier si le changement est entre le ciment de type RN et le ciment de type RS (-98 %, 49%). Lorsque la période de séchage augmente, la sensibilité du modèle diminue et converge vers la sensibilité du retrait expérimental.

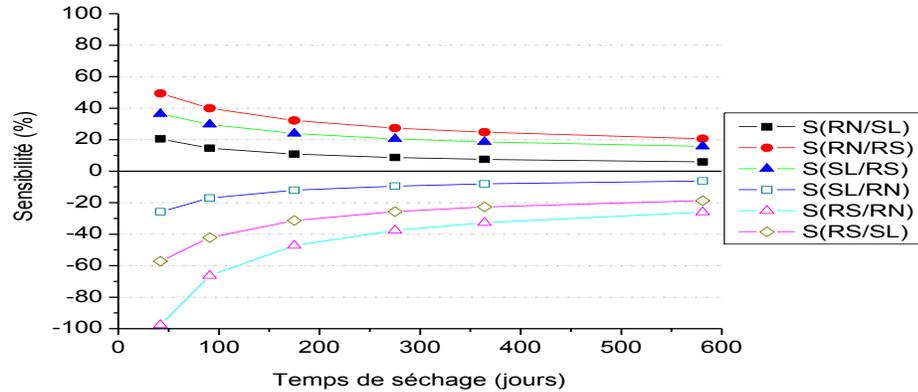


Figure 3.5 : Sensibilité du modèle proposé au changement du type de ciment en fonction du temps.

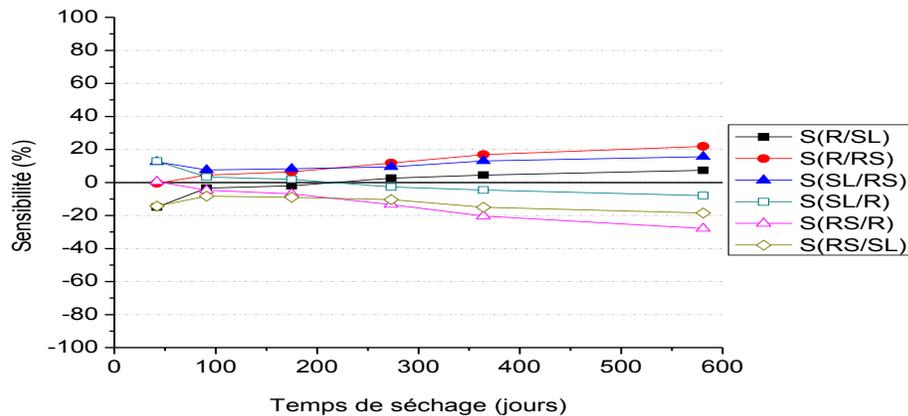


Figure 3.6 : Sensibilité du retrait expérimental au changement du type de ciment en fonction du temps

Tableau 3.6: Sensibilité des modèles GL2000, B3 et CEB au changement du type de ciment

Model	S(RN/SL)	S(RN/RS)	S(SL/RS)	S(SL/RN)	S(RS/RN)	S(RS/SL)
GL2000	-34.7	-3.5	23.2	25.8	3.4	-30.2
B3	-18.1	3.8	18.5	15.3	-3.95	-22.7
CEB-90	-15.5	12.3	24.1	13.4	-14.1	-31.7
Model E*/L**	20.5/5.8	49.4/20.6	36.4/15.7	-25.8/-7.7	-97.7/-26	-57.2/-18.7
Experim E*/L**	-14.9/7.3	-0.5/21.8	12.5/15.6	13/-8	0.5/-27.9	-14.3/-18.4

* : valeur de la sensibilité déterminée à court terme (début de mesure)

** : valeur de la sensibilité déterminée à long terme

3.3. Evaluation de la précision du modèle développé

La précision du modèle proposé a été comparée à celle des quatre modèles étudiés au moyen des données de retrait expérimentales disponibles, le nombre des essais expérimentaux (N) et des valeurs de déformations expérimentales (n) de chaque essai utilisés dans cette étude sont limitées selon les conditions d'application de tous les modèles, et selon les informations disponibles dans chaque essai (f_{C28} , le dosage en ciment, ...). Les Figures 3.7 - 3.9 montrent une confrontation entre les précisions des différents modèles évaluées graphiquement et numériquement par la méthode d'erreur quadratique donnée par les équations suivantes :

$$f_j = \frac{(\varepsilon_{ij_{cal}} - \varepsilon_{ij_{exp}})}{\varepsilon_{ij_{exp}}} \times 100 \quad (3.14)$$

$$F_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \times \sum_{j=1}^n f_j^2} \quad (3.15)$$

$$F_{CEB} = \sqrt{\frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N F_i^2} \quad (3.16)$$

Avec:

f_i : la différence entre les valeurs calculées et celles observées (expérimentales) de données j (%)

F_i : signifie carré des résidus (%)

F_{CEB} : erreur quadratique moyenne (%)

n : nombre total des valeurs de j de l'expérience i

N : nombre total de données des essais considérés

$\varepsilon_{ij_{exp}}$: déformation de retrait expérimentale

$\varepsilon_{ij_{cal}}$: déformation de retrait calculée

Dans l'analyse statistique, seule les retrais de période de séchage supérieure à 7 jours sont considérés, car pour des petites périodes où les déformations de retrait sont généralement très faibles, l'erreur était parfois supérieure à 100%. Pour cette raison le nombre de valeurs comparées graphiquement (n_T) est supérieur à celui des valeurs comparées numériquement (M) par la méthode statistique.

A travers les résultats du calcul présentés sur les Figures 3.7-3.9, le modèle proposé s'avère fiable. L'erreur quadratique (F_{CEB}) du modèle en comparaison avec les autres modèles a des valeurs plus faibles pour les trois types de ciment. Bien que le modèle proposé demande plusieurs facteurs, il est plus précis que les autres modèles. L'évaluation numérique du modèle approuve cette constatation. L'erreur était de 43 % pour le ciment type RN (Figure 3.7), 35% pour le ciment type SL (Figure 3.8) et 42% pour le ciment de type RS (Figure 3.9).

Pour les bétons de ciment type RS, les coefficients d'erreur sont respectivement 66 %, 45%, 46% et 50% pour les modèles ACI, CEB, B3 et GL (Figure 3.9), et atteignent 93 %, 79 %, 88 % et 57% pour les mêmes modèles lorsque le ciment utilisé est de type SL (Figure 3.8). Le modèle ACI est le moins précis avec un coefficient d'erreur de 70 %, 93 % et 66 % pour les trois types de ciments ; RN, SL et RS. Graphiquement il semble que le modèle B3 estime bien la déformation de retrait de séchage du béton composé de ciment type RS, alors que le modèle CEB estime mieux le retrait des bétons composés de ciment type SL.

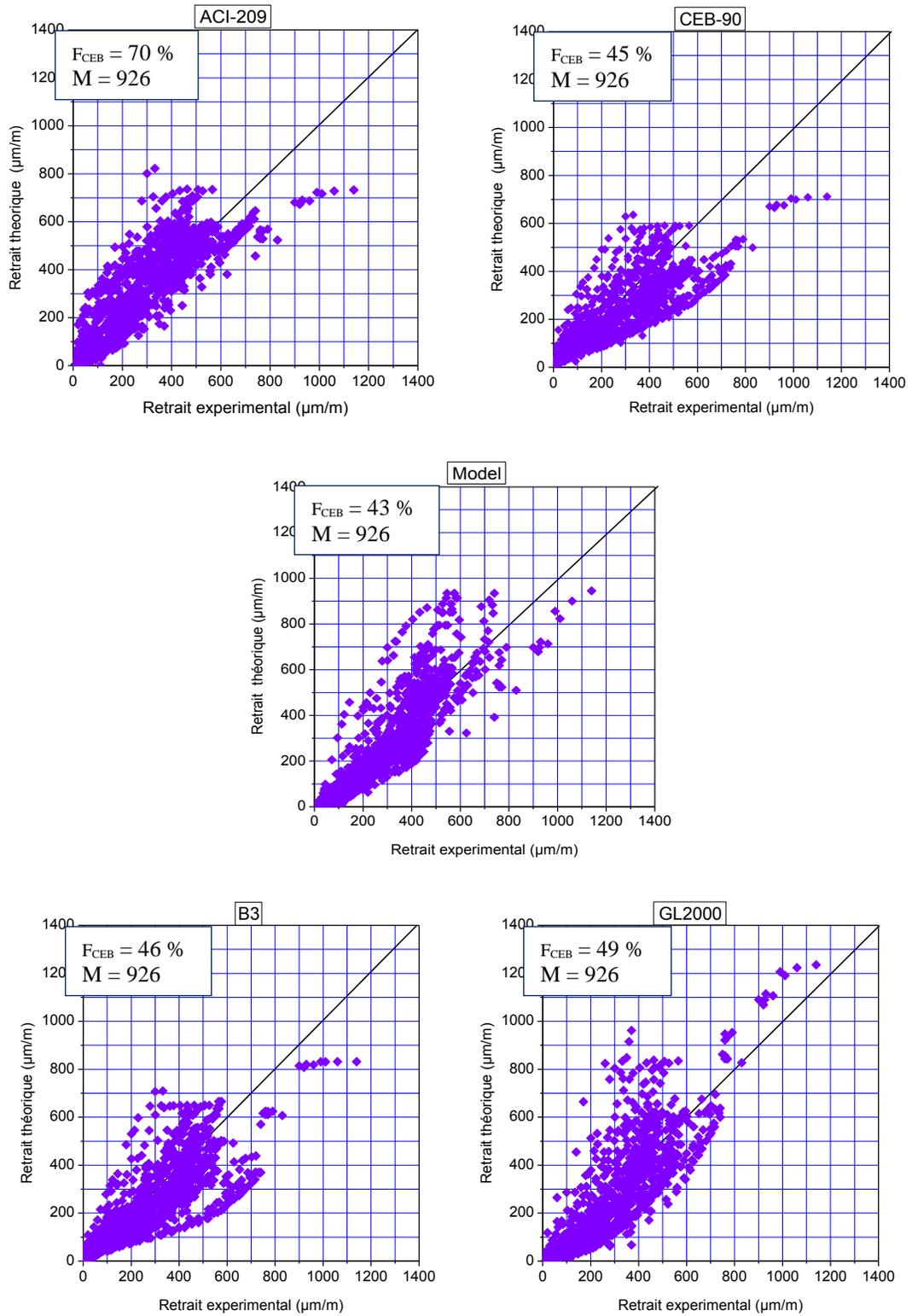


Figure 3.7 : Comparaison entre les déformations de retrait calculées par les modèles et les déformations expérimentales (ciment type RN ; $N = 75$ essais ; $n_T = 1107$ valeurs).

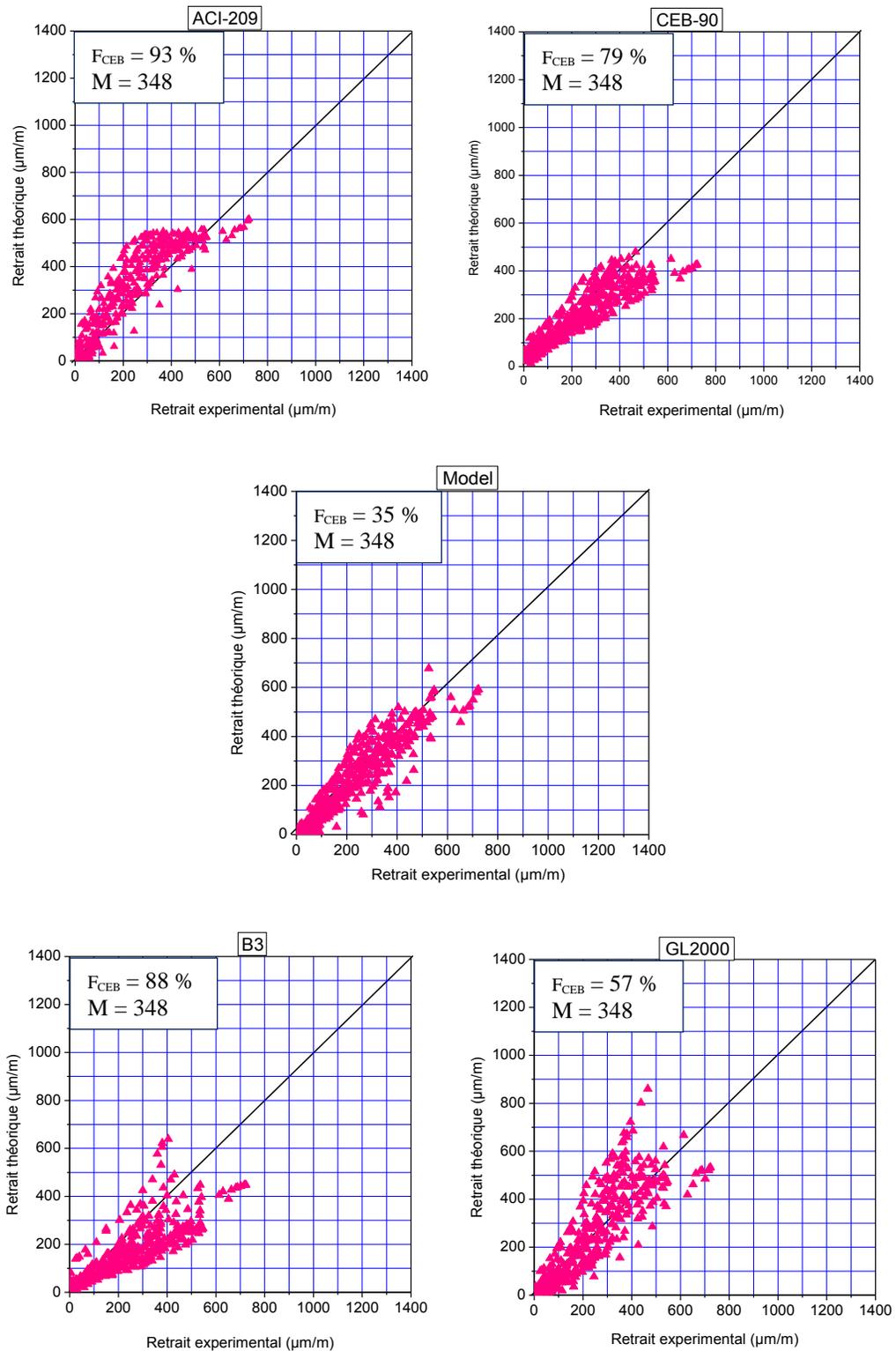


Figure 3.8 : Comparaison entre les déformations de retrait calculées par les modèles et les déformations expérimentales (ciment type SL; $N = 24$ essais; $n_T = 390$ valeurs).

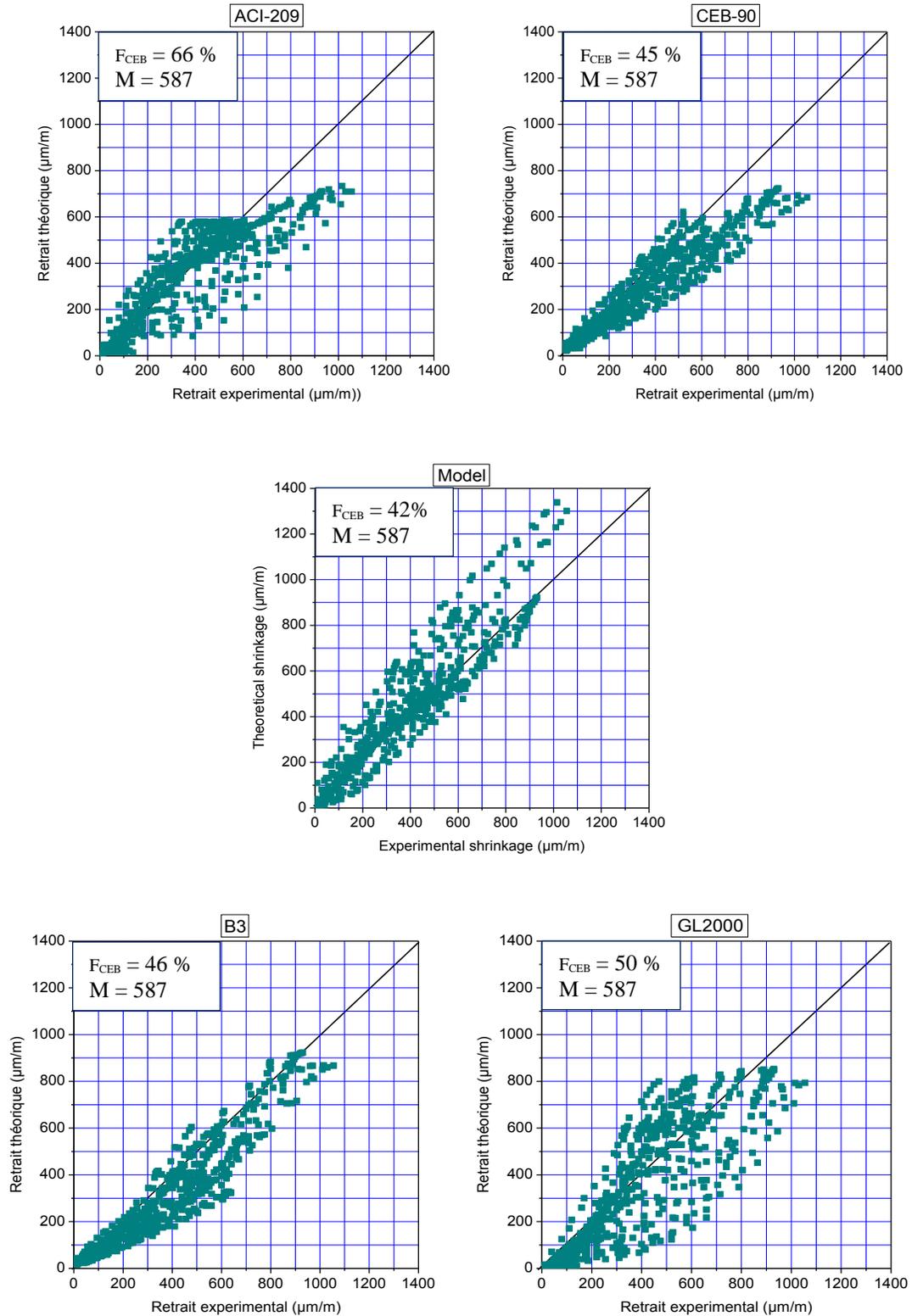


Fig. 3.9 : Comparaison entre les déformations de retrait calculées par les modèles et les déformations expérimentales (ciment type RS; $N = 45$ essais ; $n_T = 648$ valeurs).

3.4. Conclusion

Le modèle proposé a été analysé et validé à partir des essais expérimentaux tirés des résultats des essais disponibles. Les tests de validation ont donné de bons résultats, ce qui montre la pertinence du modèle pour prédire efficacement la déformation de retrait avec une précision acceptable en comparaison avec les modèles étudiés. La précision du modèle a été examinée et comparée avec celle des autres modèles. Les conclusions pouvant être tirées de cette étude sont résumés dans les points suivants:

- La précision de la prédiction du retrait à long terme dépend de la forme de la fonction de temps utilisée. Dans cette étude, la fonction exponentielle a donné une bonne corrélation.
- La sensibilité du modèle proposé au changement de dimension des pièces est une fonction de la durée de séchage et de la résistance à la compression. La sensibilité maximale a été obtenue à jeune âge lorsque la valeur de la résistance à la compression est plus faible.
- La sensibilité au changement du type de ciment dépend du développement des propriétés mécaniques dans le temps. Le modèle proposé est plus sensible à ce facteur en particulier si le changement est du ciment de type RS au ciment type RN.
- Le modèle proposé permet de prédire le retrait de séchage du béton de meilleure manière que les modèles comparés pour les trois types de ciment, alors que les modèles CEB et ACI estiment bien le retrait de séchage du béton composé du ciment type RS.

CHAPITRE 4

ETUDE EXPERIMENTALE DE L'EFFET DU SUPERPLASTIFIANT SUR LE RETRAIT DE SECHAGE DU BETON- APPLICATION DU MODELE PROPOSE

4.1. Introduction :

Ce chapitre présente d'abord les principales caractéristiques des matériaux utilisés dans notre étude ainsi que les formulations des mélanges testés, suivies par une analyse détaillée des résultats des essais. Les deux premières parties (caractérisation des matériaux et l'étude des mélanges cimentaires) se basent sur une série d'essais qui va être présentée à travers ce chapitre. Dans ce travail nous avons utilisé les matériaux locaux disponibles sur le marché algérien tels que le ciment, les granulats et les superplastifiants.

Le choix des facteurs expérimentaux considérés dans cette étude se base sur l'analyse bibliographique, où nous avons remarqué que la présence de superplastifiants dans les bétons/mortier de faible rapport E/C a un effet important sur le développement des propriétés physique et mécanique des matériaux cimentaire. Cette influence n'a pas d'importance dans la plupart des modèles de prédiction de retrait où la plupart des modèles ne donne pas une bonne estimation. Ce chapitre vise donc à analyser et à évaluer l'effet du type et du dosage de superplastifiants sur la déformation du retrait de séchage. En parallèle les résultats des résistances en compression et du retrait obtenus seront exploités pour valider le modèle proposé.

4.2. Caractérisation des matériaux - Formulation et essais

Trois séries de bétons ont été préparés. Dans chacune d'elles quatre types de superplastifiants sont utilisés pour étudier l'effet de SP sur la déformation du retrait de béton.

4.2.1. Caractérisation des matériaux

4.2.1.1 Le ciment

Pour la confection de bétons nous avons utilisé un ciment portland composé de type CEM II/B 42,5 R (Matine) provenant de la compagnie Lafarge. La consistance normale de la pâte de ciment varie entre 25.5% et 28.00%. Les principales caractéristiques physico-chimiques du ciment sont détaillées dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1 : Composition chimiques et propriétés physiques du ciment

Composition chimique %	CEM II/B 42,5 R
SiO ₂	16.22
Al ₂ O ₃	5.53
Fe ₂ O ₃	3.26
CaO	58.06
MgO	1.9
K ₂ O	0.7
SO ₃	2.33
Surface Spécifique	3500 cm ² /g
Densité	3.15

4.2.1.2 Les granulats

Pour confectionner les bétons nous avons utilisé un sable de l'oued de Baghlia, ayant un module de finesse MF = 2.48 NF EN 933-1 [139] et un équivalent de sable ES = 83% NF EN 933-8 [140]. Le gravier utilisé est un gravier concassé de classe 8/15, d'origine basaltique provenant de la station de Kaf El Assel de Beni Slimane (Médéa). Les principales caractéristiques des granulats utilisés sont présentées dans le Tableau 4.2.

Tableau 4.2 : Caractéristiques des granulats

Caractéristiques	Granulats		Normes
	Sable	Gravier	
Module de finesse	2.48	/	NF EN 933-1 [139]
Equivalent de sable (%)	83	/	NF EN 933-8 [140]
Taux d'absorption d'eau (%)	1.2	1	NF EN 1097-6 [141]
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.60	2.63	NF EN 1097-6 [141]
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.597	1.33	NF EN 1097-3 [142]

Les résultats de l'analyse granulométrique des granulats utilisés (sable et gravier) sont présentés dans la Figure 4.1.

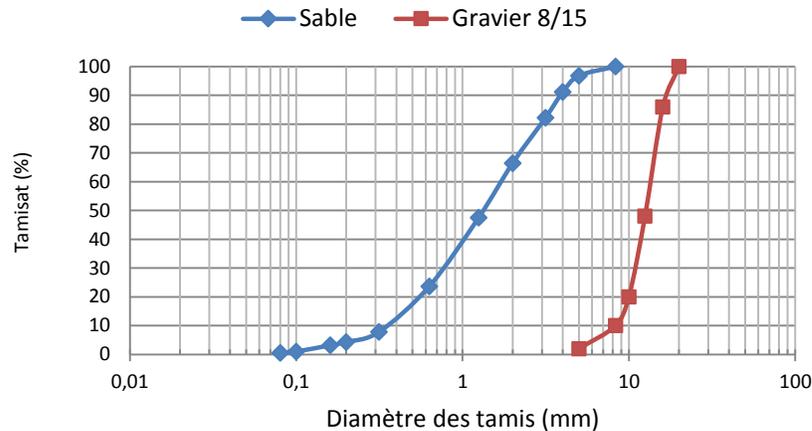


Figure 4.1. Courbes granulométriques des granulats

4.2.1.3 Les superplastifiants

Quatre types de superplastifiants ont été utilisés, fabriqués par la société Granitex-NP (Figure 4.2). Trois types appartiennent à la famille de Polycarboxylate d'éther et le quatrième appartient à la famille de Polynaphtalène sulfonate :

➤ *MEDAFLOW SR*

C'est un superplastifiant réducteur d'eau commercialisé sous le nom «MEDAFLOW SR». Il est à base de polymères de synthèse combinés de la famille Polycarboxylate d'éther (PCE). Sa plage normale d'utilisation est fixée par la fiche technique de 0,8 % à 2% du poids du ciment.

➤ *MEDAFLOW 30*

C'est un superplastifiant haut réducteur d'eau commercialisé sous le nom «MEDAFLOW 30». Il est à base de Polycarboxylate d'éther (PCE). Sa plage normale d'utilisation est fixée par la fiche technique de 0,5% à 2% du poids du ciment.

➤ *MEDAFOW 113*

C'est un superplastifiant haut reducteur d'eau commercialise sous le nom «MEDAFOW 113». Il est à base de Polycarboxylate d'éther (PCE). Sa plage normale d'utilisation est fixée par la fiche technique de 0.8% a 2.5% du poids du ciment.

➤ *MEDAPLAST SP40*

C'est un superplastifiant haut réducteur d'eau à base de sulfonates, commercialisé sous le nom «MEDAPLAST SP40» de la famille Polynaphtalène sulfonate (PNS). Sa plage normale d'utilisation est fixée par la fiche technique de 0,6 % à 2,5 % (en extrait sec) du poids du ciment.

Dans la suite de cette étape d'étude, les superplastifiants seront désignés par l'abréviation de leurs noms comme il est indiqué dans le Tableau 4.2 qui rassemble les caractéristiques de ces superplastifiants.

Tableau 4.3. Les caractéristiques des superplastifiants

Superplastifiants	MEDAFLOW 113 (MF 113)	MEDAFLOW 30 (MF 30)	MEDAFLOW SR (MF SR)	MEDAPLAST SP40 (MP SP40)
Famille	Polycarboxylate d'ether			Polynaphtalène sulfonate
Intervalle du dosage	0.8% -2.5%	0.5% – 2%	0.8% - 2.5%	0.6% - 2.5%
Forme	Liquide			
Couleur	Marron	Jaunâtre	Jaunâtre	Marron
PH	6.5 - 7.5	6 - 6.5	6 - 6.5	8.2
Densité	1,12± 0,02	1.07 ± 0.01	1.05 ± 0.01	1,20 ± 0,01
Extrait sec	36%	30%	25% ± 1%	40%
Teneur en chlorure	< 0.1 g/l			

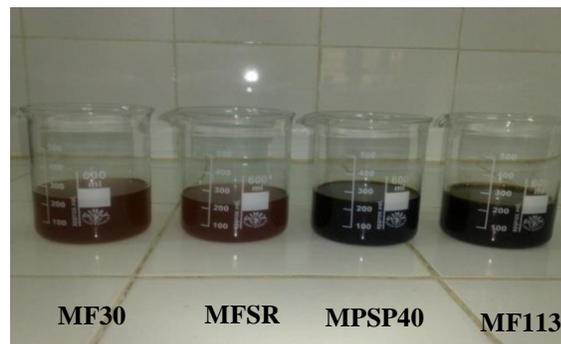


Figure 4.2. Vue sur les types de superplastifiants utilisés.

4.2.2. Formulation des pâtes et des bétons

4.2.2.1 Les pâtes

Le principal composant responsable sur la maniabilité du béton est la pâte de ciment. Il convient donc d'étudier la pâte seule avant d'entamer l'essai sur béton. Les deux propriétés physico-chimiques très sensibles à la présence de SP sont bien la consistance et la prise. L'objet de cette étape d'étude est de déterminer le pourcentage minimal de chaque SP ainsi que le rapport E/C convenable pour avoir une consistance normale tout en respectant l'intervalle d'utilisation des différents types de SP. Les pâtes de consistance normale ont été utilisées pour mesurer le temps de prise afin de comparer l'influence de chaque type de SP sur la prise et d'avoir une idée sur l'efficacité de chaque SP. L'influence des quatre superplastifiants a été étudiée sur les pâtes de ciment de plus faible dosage de superplastifiant.

4.2.2.2 Les bétons

Deux facteurs ont été retenus : le dosage et le type de superplastifiants. Les dosages en ciment et en granulats restent constants dans tous les bétons, alors que le dosage en eau et en SP varient dans les trois séries, où nous avons fixé 3 rapports de E/C (0.45, 0.4 et 0.38). Pour chaque rapport nous avons formulé 4 bétons de différents SP, d'où un total de 12 bétons. Tous les bétons acceptés après l'essai de l'ouvrabilité sont conservés dans les mêmes conditions. Le Tableau 4.4 regroupe les détails des formulations préparées.

Tableau 4.4: Composition des bétons étudiés

Séries des bétons	Type de SP	E/C	SP (%)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)
C1-MFSR	MF SR	0.45	0.8	460	690	1040
C1-MF113	MF 113					
C1-MF30	MF 30					
C1-MPSP40	MP SP40					
C2-MFSR	MF SR	0.40	1.6			
C2-MF113	MF 113					
C2-MF30	MF 30					
C2-MPSP40	MP SP40					
C3-MFSR	MF SR	0.38	2			
C3-MF113	MF 113					
C3-MF30	MF 30					
C3-MPSP40	MP SP40					

- Mode de conservation des éprouvettes

Après le démoulage, toutes les éprouvettes sont protégées contre le séchage à jeune âge par un papier d'aluminium pendant 7 jours (Figure 4.3). Durant la durée de conservation la température dans le laboratoire est $T = (20 \pm 2) ^\circ\text{C}$.



Figure 4.3 : Modes de conservation des éprouvettes de béton.

4.2.3. Essais sur la pâte et le béton

L'étude de l'effet des superplastifiants sur les propriétés du béton nécessite l'étude de l'effet de ce dernier sur la pâte pure. Sur cette dernière, deux essais ont été élaborés ; la consistance et la prise. Afin de comparer l'effet des différents SP sur les propriétés du béton, six essais supplémentaires ont été réalisés :

- Ouvrabilité (Cône d'Abrams) ;
- La température du béton frais ;
- La résistance à la compression à 28 jours ;
- La vitesse de propagation d'onde sonore du béton durci ;
- La perte de poids ;
- La déformation de retrait.

4.2.3.1 Essai sur la pâte de ciment (consistance et prise)

Dès que l'eau est ajoutée au ciment portland, le gypse, les alcalis, une partie de la chaux et les silicates passent rapidement en solution. Une certaine quantité d'eau est nécessaire afin de mouiller tous les grains et d'obtenir une pâte de ciment suffisamment plastique. Mais au bout d'un certain temps, intervient un phénomène

physico-chimique : la prise, c'est-à-dire le raidissement de la pâte de ciment. Il y a lieu de se poser deux questions :

- Quel pourcentage d'eau faut-il ajouter au ciment pour que la prise se fasse dans de bonnes conditions ? la réponse sera fournie par l'essai de consistance
- Au bout de combien de temps après le gâchage la prise commencera-t-elle ? la réponse sera fournie par l'essai de prise.

La première question généralement posée pour une pâte sans adjuvant mais en présence de superplastifiant les deux essais (consistance et prise) ont une importance, car les superplastifiant influencent ces deux propriétés.

La quantité optimale d'eau de gâchage et le pourcentage de SP ainsi déterminée de l'essai de consistance pourrait nous mener à passer directement à l'essai de prise qui sera effectué sur la même pâte confectionnée et testée par l'essai de consistance selon la norme NF EN 196-3 [143].

L'essai de l'aiguille Vicat est la méthode expérimentale normalisée qui permet de suivre l'évolution de la structuration de la pâte de ciment et notamment le moment de sa prise comprise entre deux échéances : les temps de début et de fin de prise Vicat définis par des hauteurs normalisées d'enfoncement de l'aiguille. Trois essais simultanés à l'aiguille Vicat ont été réalisés sur chaque pâte de ciment étudiée.

4.2.3.2 Essais sur béton frais

A. Essai d'ouvrabilité (Essais d'étalement au cône d'Abrams)

L'essai d'affaissement au cône d'Abrams [144] s'est imposé comme l'essai le plus facile à réaliser. Cet essai permet d'évaluer l'écoulement en milieu non confiné, c'est-à-dire d'évaluer l'ouvrabilité ou la déformabilité du béton et de mesurer son étalement sous son propre poids sans obstacles. L'objectif de cet essai est généralement de déterminer le degré de plasticité de chaque béton afin de comparer l'influence du type et le dosage de SP sur l'ouvrabilité des bétons frais.

B. Essai sur la température du béton

Pour mesurer la température dans le béton, nous avons utilisé le thermomètre présenté dans la Figure 4.4. La durée de mesure est comptée depuis la fin de malaxage jusqu'au début de durcissement. L'objectif de cet essai est de comparer l'effet de SP sur la température de béton au cours de l'hydratation.



Figure 4.4. Thermomètres.

4.2.3.3 Essais sur béton durci

Après malaxage du béton, on remplit des éprouvettes prismatiques de $7 \times 7 \times 28$ cm³ et cubiques de 10 cm de côté. On conserve les éprouvettes dans une salle pendant 24 heures. Après le démoulage des éprouvettes on les conserve dans le laboratoire à une température 20°C environ. Après la durée de cure (conservation), on expose les éprouvettes à l'air libre.

A. Essai d'écrasement

La résistance en compression a été mesurée par compression axiale sur des éprouvettes de béton à l'âge de 28 jours selon la norme NF EN 12390-3 [145], à l'aide d'une presse de capacité de 2000 KN de vitesse 1.5 N/m²/s. La résistance en compression correspond à la valeur moyenne des résistances obtenues par écrasement de trois éprouvettes cubiques de 10x10x10 cm³.

B. Essai ultrasonique

Cet essai se base sur la méthode de la vitesse de propagation d'onde ultrasonore selon la norme NF EN 12504-4 [146] (Figure 4.5). La vitesse de propagation des ultrasons dans un matériau dépend de sa densité et de ses propriétés élastiques qui sont à leur tour liées à la qualité et à la résistance à la compression du béton. Il est

donc possible d'obtenir des informations sur les propriétés de matériau par des enquêtes sonores.



Figure 4.5: Appareil d'ultrason

C. Essai de retrait

Il s'agit d'évaluer la variation de longueur des éprouvettes de béton en utilisant les deux types d'extensomètres présentés sur la Figure 4.6. On compare aux différents temps la variation de longueur d'une éprouvette de $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$ par rapport à sa longueur au temps initial t_0 (début de mesure). Les mesures sont effectuées sur la peau d'éprouvette pour déterminer la déformation superficielle et sur l'axe central pour déterminer les déformations axiales (Figure 4.7). Les mesures de retrait sont accompagnées de mesure de HR et de la température de laboratoire. La réalisation de cette étude a nécessité la préparation de 18 éprouvettes prismatiques.

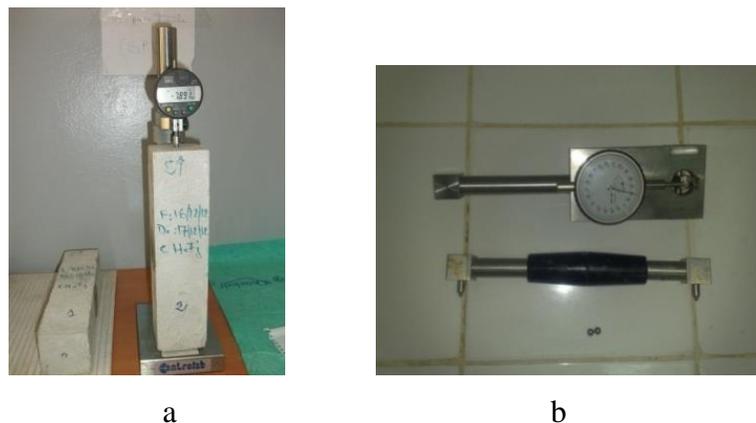


Figure 4.6 : Extensomètre pour mesurer la déformation de retrait.
a - Axiale ; b – superficielle.

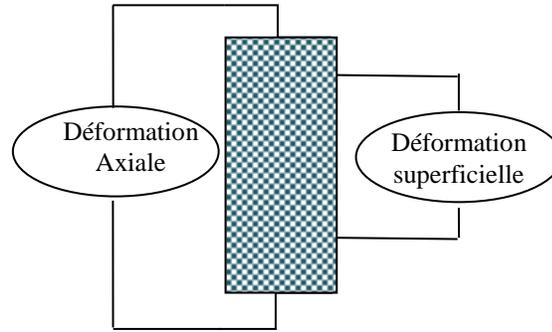


Figure 4.7 : Principe de mesure des déformations de retrait du béton.

4.3 Présentation et analyse des résultats

L'effet de SP sur les propriétés du béton, à savoir les caractéristiques d'ouvrabilité et de pertes d'ouvrabilité ne sont pas réellement le but de cette étude. Ces points ont été traités par plusieurs chercheurs [147, 148]. En effet, l'utilisation de SP est très avantageuse pour réduire la perméabilité et la production de béton durable [149]. L'effet de cet adjuvant sur les caractéristiques d'hydratation et les propriétés mécaniques/physiques des pâtes durcies (béton/mortiers), tels que le temps de prise, la porosité, la perméabilité et l'hydratation ont fait l'objet de nombreuses études [148-156]. Les résultats indiquent que l'addition de SP conduit à une réduction du volume total des pores et à un raffinement de la structure de pores, un retard dans l'hydratation du ciment mais aussi une augmentation du taux d'hydratation, et par conséquent l'augmentation de la résistance du béton.

Le présent travail a pour but d'étudier l'influence du type et le dosage de superplastifiants polycarboxylates à base d'éther (PCE) sur le retrait de dessiccation et la résistance à la compression. Afin d'évaluer les effets de ces PCE, un autre superplastifiant a été étudié, appartient à la famille de polynaphtalène sulfonate (PNS) nommé MEDAPLAST SP40 (MPSP40). Pour éclaircir l'influence des SP, l'étude a été complétée par une comparaison entre les consistances et le temps de prise des pâtes de ciment, la maniabilité, la température, la vitesse d'impulsion ultrasonique et la perte de poids du béton. Trois formulations de béton ont été préparées : La différence entre elles réside dans la teneur en eau et le dosage en SP. Pour chaque série trois types de PCE et un type de SNP ont été utilisés.

4.3.1 . Pâte de ciment (consistance et prise)

Pour étudier l'effet de SP sur la consistance et la prise, il est nécessaire de travailler sur un même rapport E/C. Ce dernier représente le facteur majeur qui gère les deux propriétés et donc il n'est pas possible d'éliminer son effet. Cet obstacle nous a obligé de formuler plusieurs pâtes pour déterminer le rapport E/C convenable au faible dosage de SP pour avoir une consistance normale, tout en respectant la plage d'utilisation de chaque type de SP.

Les résultats des essais de la consistance et de temps de prise pour les pâtes de ciment étudiées et qui sont présentées dans le Tableau 4.6, montrent que le type de superplastifiant influe de façon considérable sur la consistance normale et la prise même s'il appartient à la même famille. Ce résultat a été approuvé par Puertas *et al* [157]. Pour un faible dosage de SP nous remarquons que les deux SP ; MFSR et MF30 sont très efficaces pour des faibles rapports E/C. Alors que les deux autres (MPSP40 et MF113) sont efficaces lorsque le rapport E/C est un peu élevé, c'est-à-dire qu'ils demandent une quantité élevée d'eau ($E/C = 0.225$) pour avoir une consistance normale. Il est à noter que le polynaphtalène sulfonate (MPSP40) de la famille des polysulfonates fonctionnent par répulsion électrostatique, alors que les polycarboxylates d'éthers (PCE) de la famille des polycarboxylates fonctionnent par répulsion stérique et électrostatique.

Tableau 4.5 : Effet de type et de dosage de SP sur la consistance et la prise de la pâte

Pâte	normale	P1	P2	P3	P4
Type SP	-	MFSR	MF30	SP40	MF113
Dosage SP (%)	0	0.9	0.8	1.35	2.5
E/C	0.275	0.195	0.195	0.255	0.255
Temps de prise (mn)	100	90	180	80	110

Nous pouvons donc constater que pour avoir une plasticité élevée d'un mélange cimentaire avec des rapports E/C assez faibles, les deux SP MFSR et MF30

répondent à notre besoin et avec de faibles dosages. Par contre avec les deux autres SP (MPSP40 et MF113), il nous faut un dosage de SP et un rapport E/C élevés.

Sur la Figure 4.8 qui présente l'évolution de la prise des quatre pâtes dans le temps, l'influence du type et du dosage de superplastifiant sur la prise est bien illustrée. Contrairement à ce qui été mentionné dans les fiches techniques de certains SP, les quatre type étudiés ont un effet retardateur de prise, mais avec différents degrés.

La comparaison entre le début et la fin de prise de différentes pâtes présentée sur la Figure 4.9, montre que le MF 30 retarde le début de prise mais avec un faible degré. Par contre, il retarde la fin de prise de façon remarquable devant les autres SP, ce qui provoque une longue période de prise (180 mn), contrairement au MFSR qui a un effet de retardateur de début de prise plus important que la fin, d'où la période de prise mesurée est faible (90mn). Le MPSP40 a le même effet que celui de MFSR mais avec le plus faible temps de prise (80 mn). La courbe qui présente l'évolution de la prise de la pâte adjuvante de MF113 a presque la même allure que celle de la pâte sans SP. Le MF113 est le seul qui a un effet retardateur presque constant sur toute la durée de prise. Le début de prise n'a lieu qu'au bout de 190 mn après le gâchage et la fin de prise n'a lieu qu'après 300 mn.

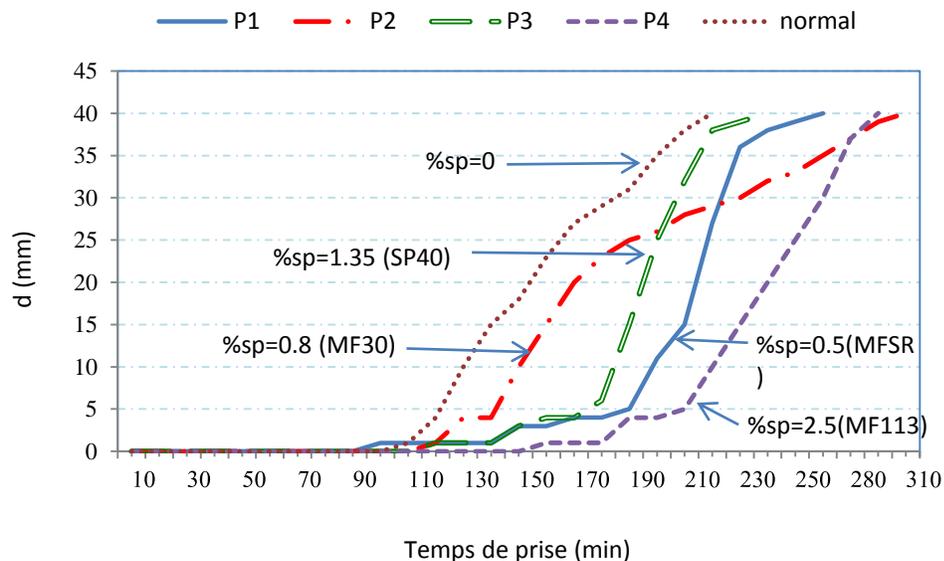


Figure 4.8 : Influence des superplastifiants sur le temps de prise

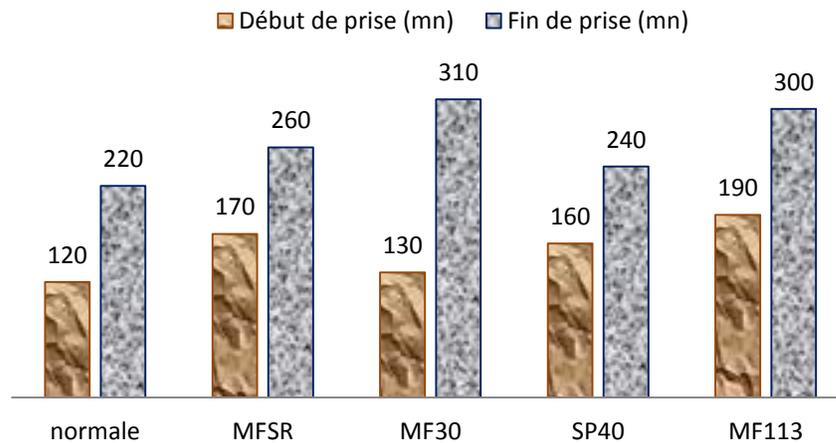


Figure 4.9 : Influence des superplastifiants sur le début et la fin de prise

4.3.2. Béton

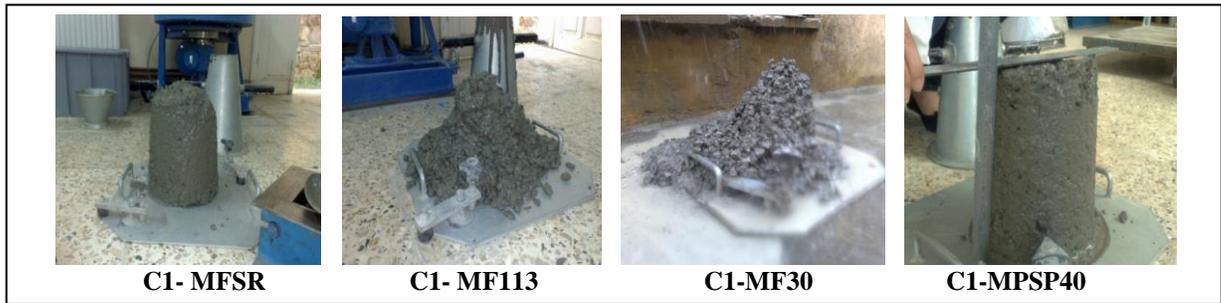
Les résultats obtenus sur les consistances des pâtes nous ont donné l'impression qu'on ne peut pas avoir 4 bétons dans chaque série, car nous avons 4 types de SP utilisables sur des rapports E/C différents et de dosages écartés, En conséquence, la fixation des mêmes dosages pour des même rapports n'est pas possible. Cette constatation a été confirmée par l'essai d'ouvrabilité.

4.3.2.1. Ouvrabilité

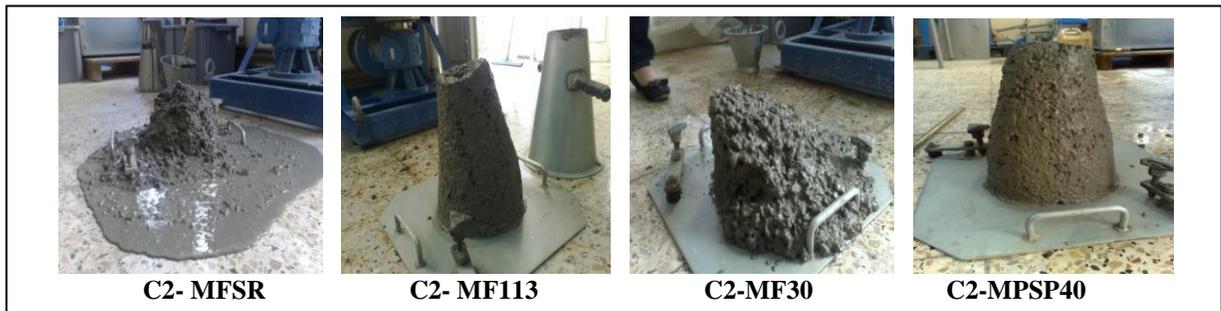
Les résultats d'essai d'affaissement au cône d'Abrams sur les bétons de différents dosages en SP présentés sur la Figure 4.10 et assemblés par le diagramme illustré sur la Figure 4.11, montrent la non compatibilité entre le dosage de SP et le rapport E/C pour certains types, car nous avons observé le phénomène de ségrégation sur certains bétons. Ces bétons (C1-MF30, C2-MFSR, C3-MF30)) sont éliminés dans le reste des essais.

Les résultats d'essai d'ouvrabilité confirment ceux de la consistance ; L'ouvrabilité du béton mélangé avec MF 113 décroît avec la diminution du rapport E/C malgré que son dosage augmente. Cette diminution d'ouvrabilité peut être expliquée par la non-compatibilité entre le ciment utilisé et MF 113.

Série1 (E/C = 0.45 ; %SP=0.8)



Série2 (E/C = 0.4 ; %SP=0.1.6)



Série 3 (E/C = 0.38 ; %SP=2)



Figure 4.10: Résultats d'essais d'ouvrabilité sur les bétons

D'après les résultats des séries 1 et 3, la maniabilité des bétons mélangés avec MP SP40 et des bétons mélangés avec MF SR augmente avec l'augmentation des dosages de ces deux SP, mais en série 2 on observe une contradiction sur l'effet de ces SP. Un dosage de 1,6% de MP SP40 a diminué la maniabilité, alors que le dosage de 1,6% de MFSR produit un béton de consistance fluide avec ségrégation. Ce résultat peut être expliqué par la non-compatibilité entre le rapport E/C et le dosage de ces deux SP. Le MF 30 augmente l'ouvrabilité du béton, dans les deux séries 1 et 2, où nous avons obtenu deux bétons fluides ségrégués dus à un excès

d'eau dans la première série et de surdosage de MF 30 dans la troisième série. Ce type est plus sensible à ces paramètres (rapport E/C et dosage de SP).

Nous pouvons donc conclure que les superplastifiants MF 30, MF SR et MP SP40 sont les meilleures pour avoir la plasticité souhaitée avec un faible rapport E/C, et entre ces trois SP, le MF 30 et MF SR sont les plus efficaces que MPSP40, car ils nécessitent une faible dose pour un faible rapport E/C. Le MF 113 n'est pas efficace pour des faibles rapports E/C si on veut obtenir une bonne maniabilité, peut-être cela est dû à la non-compatibilité entre le ciment utilisé et MF113.

La principale difficulté rencontrée dans la formulation des bétons adjuvants consiste à choisir le couple ciment/superplastifiant le plus efficace permettant d'obtenir une réduction maximale de l'eau, une bonne ouvrabilité et une rhéologie satisfaisante pendant le temps de mise en œuvre. Le superplastifiant doit être compatible avec le ciment. Cependant lors de l'utilisation des superplastifiants dans la confection des bétons, certains ciments en présence de certains superplastifiants peuvent présenter des phénomènes d'incompatibilité ciment/superplastifiant : une maniabilité initiale insatisfaisante, irrégularité des affaissements initiaux et des temps de prise et surtout, une perte prématurée de maniabilité après la fabrication [158].

L'influence de la composition minéralogique du ciment sur la compatibilité ciment-superplastifiant a été étudiée par de nombreux auteurs. D'après Mikanovic, Hanna et al [158] l'influence d'un superplastifiant sur le comportement rhéologique d'une pâte de ciment dépend de la teneur en C_3A et de la finesse du ciment. Si ces paramètres sont élevés, l'effet fluidifiant du superplastifiant est faible. Dans notre cas l'effet de superplastifiant dépend de la chaîne moléculaire, car nous avons utilisé un seul type de ciment.

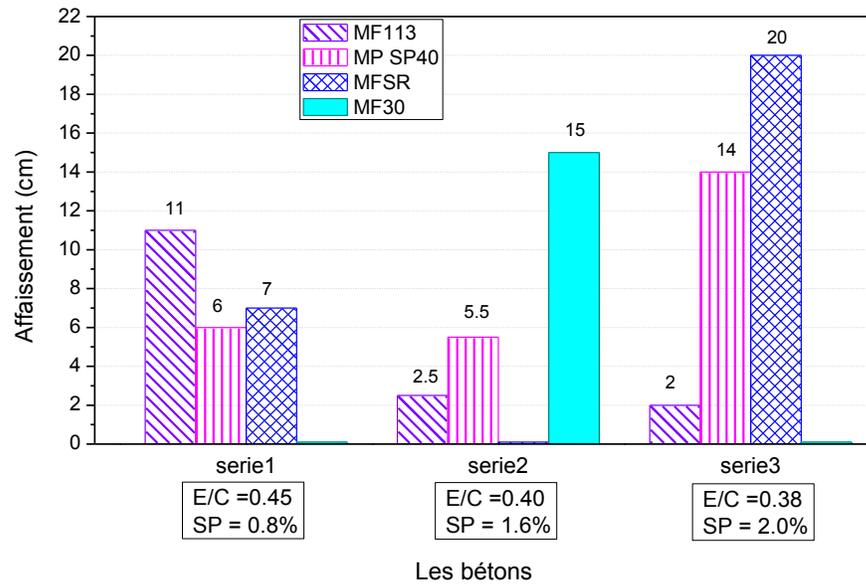


Figure 4.11 : Effet de type et de dosage du superplastifiant sur l'affaissement des bétons

4.3.2.2. Température du béton

Les températures des bétons mesurées pendant les premières 30 heures après le coulage, présentées par les différentes courbes assemblées dans la Figure 4.12, montrent que la présence de SP a un effet considérable sur la variation de la température du béton.

Dans les trois séries, les bétons mélangés avec MF113 dégagent des températures élevées comparativement aux bétons préparés de MFSR et ceux contenant MPSP40. Tandis que, dans la série 2, le béton mélangé avec MF30 dégage une température plus élevée que celle mesurée sur le béton mélangé avec MF113. L'addition de MF SR a baissé la température lorsque le rapport E/C était élevée (serie1), mais avec MPSP40 nous avons obtenu de basses températures par rapport aux trois PCE dans les deux série 2 et 3.

La température du béton est la résultante du taux d'hydratation. Lorsque ce dernier augmente, la chaleur dégagée augmente dans le béton. Si nous relient entre les résultats de l'ouvrabilité et ceux de températures mesurées sur les bétons des trois séries, nous pouvons remarquer une relation linéaire, à l'exception des bétons

mélangés avec MF 113 des séries 2 et 3 (C2-MF113, C3-MF113) qui ont une faible maniabilité et dégagent des températures élevées, ce qui conduit à conclure que le superplastifiant qui donne une bonne défloculation des particules de ciment ne favorise absolument pas l'hydratation plus que les autres. L'architecture (type) de SP a une influence significative sur l'hydratation, non seulement sur le taux (degré) mais aussi sur la vitesse d'hydratation, car l'effet retardateur a été observé sur les températures des bétons mélangés avec MF113 (série 2 et 3) et MFSR (série 3) ce qui explique un retard de la réaction d'hydratation.

Donc l'analyse de la variation de la température du béton en fonction du type de SP conduit à conclure que MF113 favorise et retarde l'hydratation. Le MFSR favorise aussi l'hydratation, mais si son dosage est élevé l'effet retardateur apparut, alors que, MF30 favorise l'hydratation mieux que les autres SP. Le MPSP40 n'a pas un effet important de retardateur que les autres SP, ce qui implique que les trois types de PCE augmentent le taux / degré d'hydratation plus que PNS (MP SP40).

Ces constatations sont en accord avec les résultats de Puertas *et al* [157] qui ont observé que les SP type polycarboxylate provoquent un retard initial de l'hydratation du ciment à très jeune âge, cet effet étant prononcé à des doses plus élevées. Selon Zingg *et al* [159] une bonne maniabilité peut être atteinte par l'addition de PCE très chargé avec des chaînes latérales longues. Celui-ci minimise les phénomènes indésirables de retard. D'après Collepari [160] les superplastifiants à base de sulfonate retardent la réaction d'hydratation du C₃A et du C₃S.

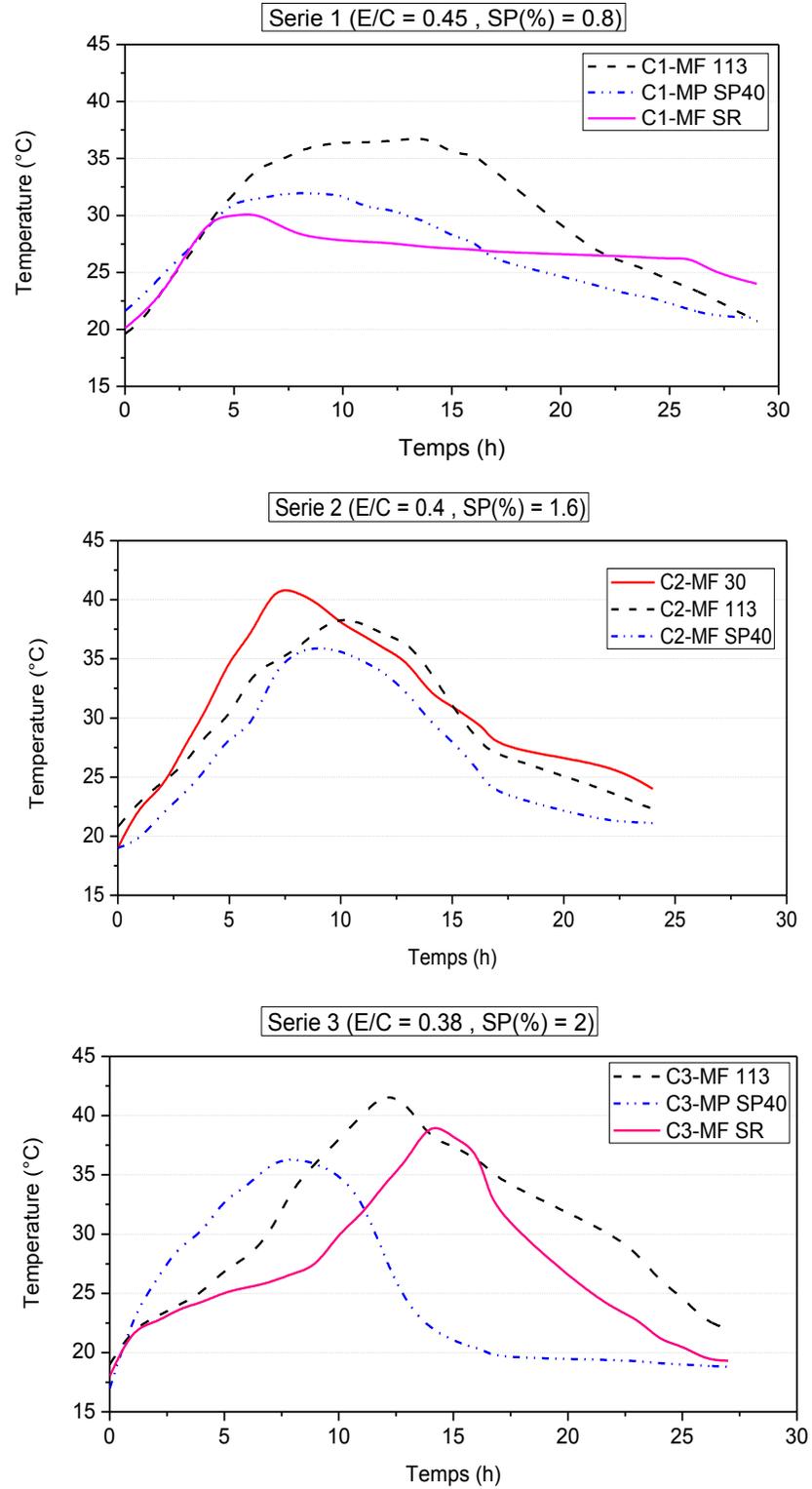


Figure 4.12 : Effet de type et de dosage des superplastifiants sur la température du béton

4.3.2.3. Résistance en compression

Les résultats de la résistance à la compression à 28 jours pour les éprouvettes mélangées par différents types de SP consignés dans la Figure 4.13 indiquent que l'addition de PCE améliore les propriétés mécaniques des bétons mieux que le PNS (MPSP40) dans la plupart des cas. Une haute résistance a été obtenue avec MF 113 dans les deux séries 1 et 3. En série 2, l'addition de MF30 a amélioré la résistance mieux que MF113. Avec MPSP40, nous avons obtenu une valeur moyenne en série 1 approximativement similaire à celle du béton C2-MF113 en série 2 et le béton C3-MFSR de la série 3. Le MFSR diminue la résistance en série 1. Cela est dû à la non-compatibilité entre le dosage de MFSR et la teneur en eau, ce qui approuve qu'il est efficace pour des faibles rapports eau/ciment. La réduction du rapport E/C de 0,45 à 0,38 avec augmentation du dosage de SP de 0,8 à 2% provoque:

- La diminution de la résistance du béton mélangé avec MF113 de la série 1 à la série 2 de 3,17% et l'augmentation de 36,37% de la série 2 à la série 3. (élévation de 33,21% de la série 1 à la série 3).
- L'augmentation de la résistance du béton mélangé avec MPSP40 de 17,37% de la série 1 à la série 2 et l'augmentation de 18,56% de la série 2 à la série 3. (Élévation de 35,95% de série 1 à série 2).
- L'augmentation de la résistance du béton mélangé avec MFSR de 63,70% de la série 1 à la série 3.

L'effet de SP sur la résistance en compression est similaire à celui obtenu sur la température du béton. C'est évident, l'augmentation de la température est due à l'augmentation du taux d'hydratation. Le volume des composants hydratés augmente et par conséquent la résistance augmente. Les résultats obtenus sur la résistance dans cette étude sont en accord avec ceux de Zemirline [161] qui a constaté que le polycarboxylate a permis d'obtenir de meilleures caractéristiques mécaniques que le polynaphtalène sulfonate (PNS).

Si nous comparons entre les résultats de la résistance en compression et ceux de l'affaissement, on constate que certains bétons ont une bonne ouvrabilité mais n'ont pas une grande résistance, alors que d'autres ont une même résistance avec

différentes maniabilités. Ce qui explique que la bonne défloculation des particules de ciment n'est pas le principal facteur qui assure un degré d'hydratation plus élevé et qui aide à construire une grande résistance. L'architecture de SP a une influence significative sur le développement des propriétés mécaniques du béton.

Ferrari *et al* [162], ont constaté que la formation de produits d'hydratation se réduit lorsque le clinker est traité avec des solutions contenant de superplastifiant polycarboxylate à base d'éther (Figure 4.14). En outre, les images AFM (microscopie à force atomique) recueillies en mode tapping ont révélé la présence de nanostructures sur la phase C-S-H.

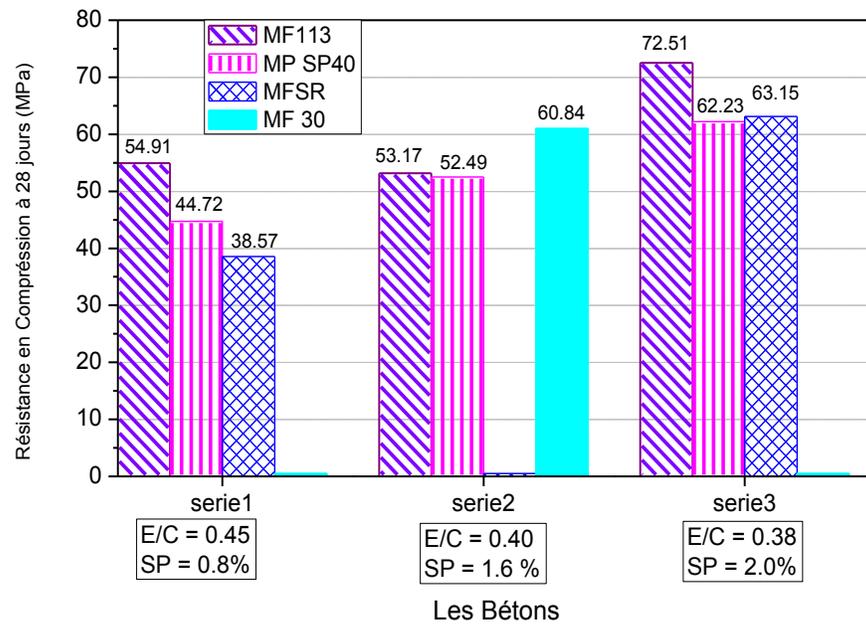


Figure 4.13 : Effet de type/dosage du superplastifiant sur la résistance en compression du béton

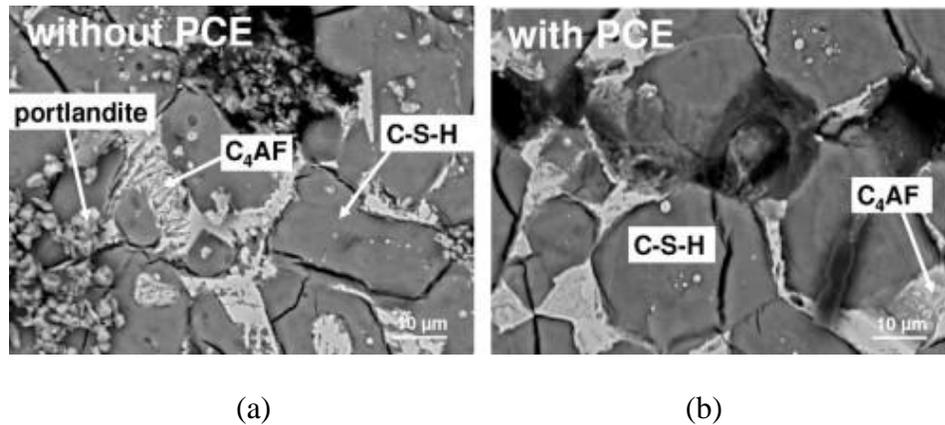


Figure 4.14: Effet du superplastifiant polycarboxylate à base d'éther sur les produits d'hydratation (a - sans PCE, b – avec PCE) [162]

4.3.2.4. Vitesse de propagation d'onde ultrason

La technique de la vitesse d'impulsion ultrasonique (d'onde sonore) est l'une des techniques non destructives les plus populaires utilisées dans l'évaluation des propriétés du béton. De nombreux facteurs influencent cette vitesse (V). Il a été constaté que la dimension, le dosage et le type de granulats ont des effets importants sur la vitesse d'impulsion [163]. La teneur en eau aussi influe sur la vitesse de propagation approximativement en proportion de la variation de la teneur en eau dans le béton. Il a été observé qu'une teneur en eau plus élevée conduit à une vitesse d'impulsion plus élevée [164]. L'âge du béton est également un facteur important. Son augmentation cause un accroissement de la vitesse [164].

Dans notre étude les mesures de V sont réalisées sur les mêmes échantillons utilisés pour mesurer le retrait de séchage pendant 70 jours et 472 jours. La vitesse est mesurée directement en contact en 3 points pour chaque échantillon avec une fréquence d'environ 50 kHz. Les résultats des essais présentés dans la Figure 4.15 indiquent que le développement de la vitesse suit trois régimes : le premier et le troisième sont présentés par un palier horizontal, le second par une pente qui augmente avec la diminution de rapport E/C et aussi varie en fonction du type de SP. Dans la deuxième série, l'effet du type de SP est clair dans le premier palier (pendant 40 jours) alors que dans la troisième série, l'effet du type SP est apparu en second

régime (pente). Dans la première série, la différence entre les vitesses des trois bétons est bien distincte durant la période d'essai, les valeurs maximales sont observées sur le béton C1-MPSP40. Après 40 jours depuis le début des mesures, les vitesses déterminées sur le béton C1-MF113 convergent rapidement vers les vitesses mesurées sur le béton C1-MPSP40. Tandis que, sur le béton C1-MFSR, la vitesse reste inférieure jusqu'à 60 jours, puis elle converge vers les valeurs obtenues sur des bétons C1-MPSP40 et C1-MF113.

Depuis le début des mesures jusqu'à 40 jours, nous remarquons une différence entre les vitesses mesurées sur différents bétons de la série 2 où l'ajout de MF30 conduit à de grandes valeurs des vitesses. Par contre l'addition de MF113 provoque de faibles vitesses. Cette différence de vitesse diminue à partir de 40 jours.

Contrairement aux deux séries 1 et 2, avant 40 jours, il n'ya pas de différence significative entre les vitesses déterminées sur les trois bétons de la série 3. Cependant entre 40 et 60 jours, nous avons observé une divergence, suivie par une convergence. Dans cette série les vitesses maximales sont obtenues sur le béton C3-MF113.

Entre les trois séries des bétons, on constate que la diminution du rapport E/C conduit à:

- une diminution de V de 0,5 km/s environ sur du béton mélangé avec MP SP40 quand le temps est inférieur à 60 jours.
- une diminution de V de 0,25 km/s environ sur du béton mélangé avec MF 113 quand le temps est inférieur à 40 jours, après cela, les résultats ont été inversés et ensuite converges.
- une diminution de V de 0,25 km/s environ sur du béton mélangé avec MF SR pendant les 40 premiers jours après cette période, les résultats sont inversés.

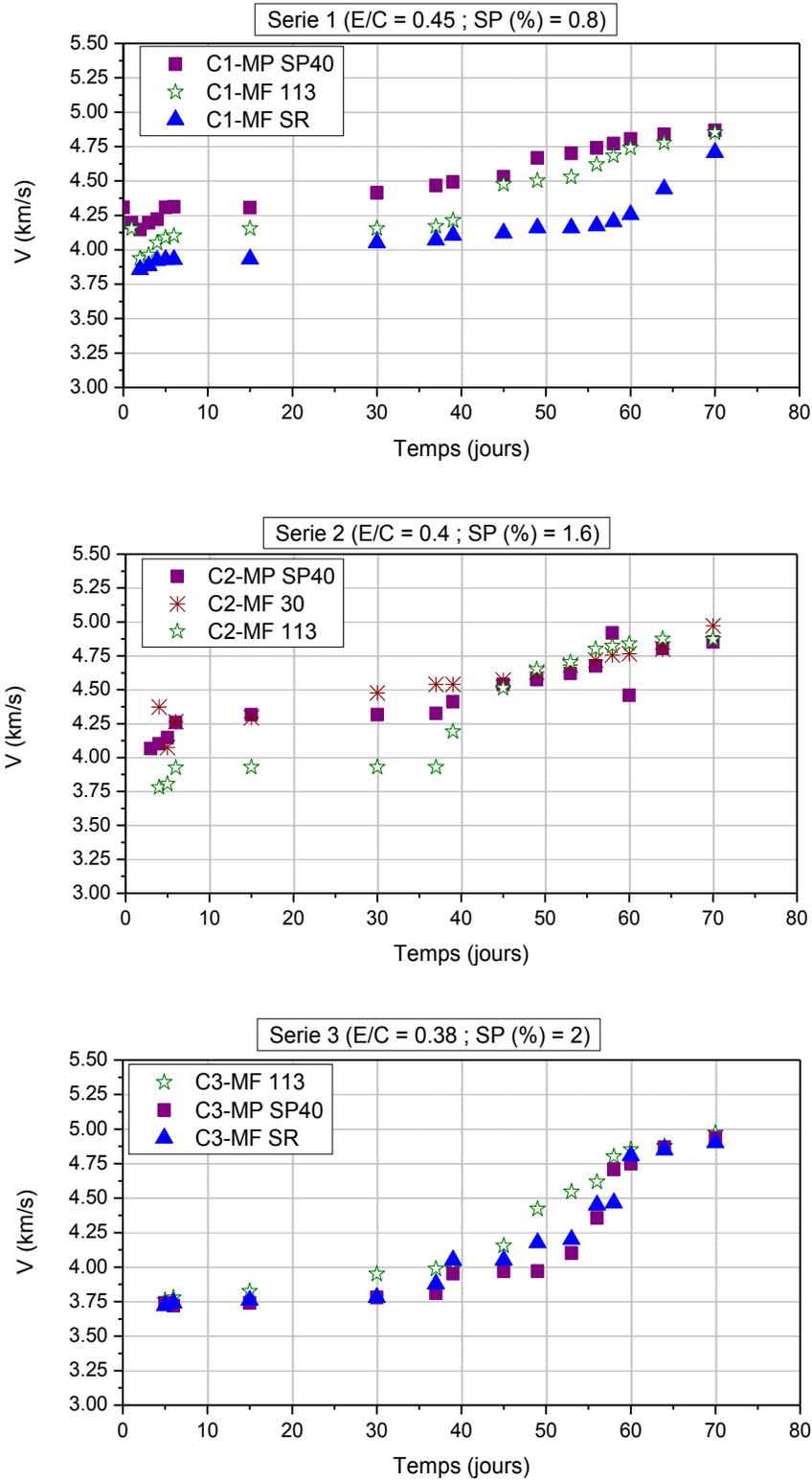


Figure 4.15 : Effet des superplastifiants sur la vitesse d'impulsion d'onde sonore

Le Tableau 4.6 qui regroupe les vitesses déterminées à 70 jours et 472 jours ainsi que les différences entre ces vitesses, montre une diminution de ces dernières lorsque l'âge du béton augmente. Cette réduction dépend du type/dosage de SP et le rapport E/C. Mais il faut noter que réellement cette diminution dépend aussi de la diminution de l'humidité relative, car les mesures effectuées durant les premiers 70 jours l'ont été en printemps. Par contre à 472 jours c'était en hiver. L'analyse de ces résultats a permis de conclure que les SP influent sur le comportement du béton même à long terme.

Tableau 4.6: Comparaison entre les vitesses d'impulsion d'onde sonore mesurées à 70 j et 472 j

	PCE	V (70 j) (km/s)	V (472 j) (km/s)	Difference (%) ^a
Serie 1 w/c = 0.45 PCE = 0.8 %	C1-MPSP40	4.87	4.41	9.45
	C1-MF113	4.85	4.15	14.43
	C1-MFSR	4.71	4.05	14.01
Serie 2 w/c = 0.4 PCE = 1.6 %	C2-MPSP40	4.85	4.32	10.93
	C2-MF30	4.97	4.48	9.86
	C2-MF113	4.87	3.93	19.30
Serie 3 w/c = 0.38 PCE = 2 %	C3-MF113	4.97	3.95	20.52
	C3-MPSP40	4.94	3.78	23.48
	C3-MFSR	4.90	3.78	22.86

^a: différence (%) = $[(V(70 \text{ d}) - V(472 \text{ d})) / V(70 \text{ d})] \times 100$

4.3.2.5. Perte de masse

La perte de masse dépend du taux de séchage et de la porosité (pore capillaire). Plus cette dernière est importante, plus la diffusion d'eau de l'intérieur vers l'extérieur est importante.

A travers les résultats de mesure de poids illustrés dans la Figure 4.16 nous remarquons que la réduction du rapport E/C provoque une diminution de la perte de poids qui varie selon le type de SP. Les pertes de poids obtenues sur des bétons préparés avec différentes PCE (MF30, MF113 et MFSR) étaient supérieures à celles obtenues sur des bétons mélangés avec PNS (MPSP40).

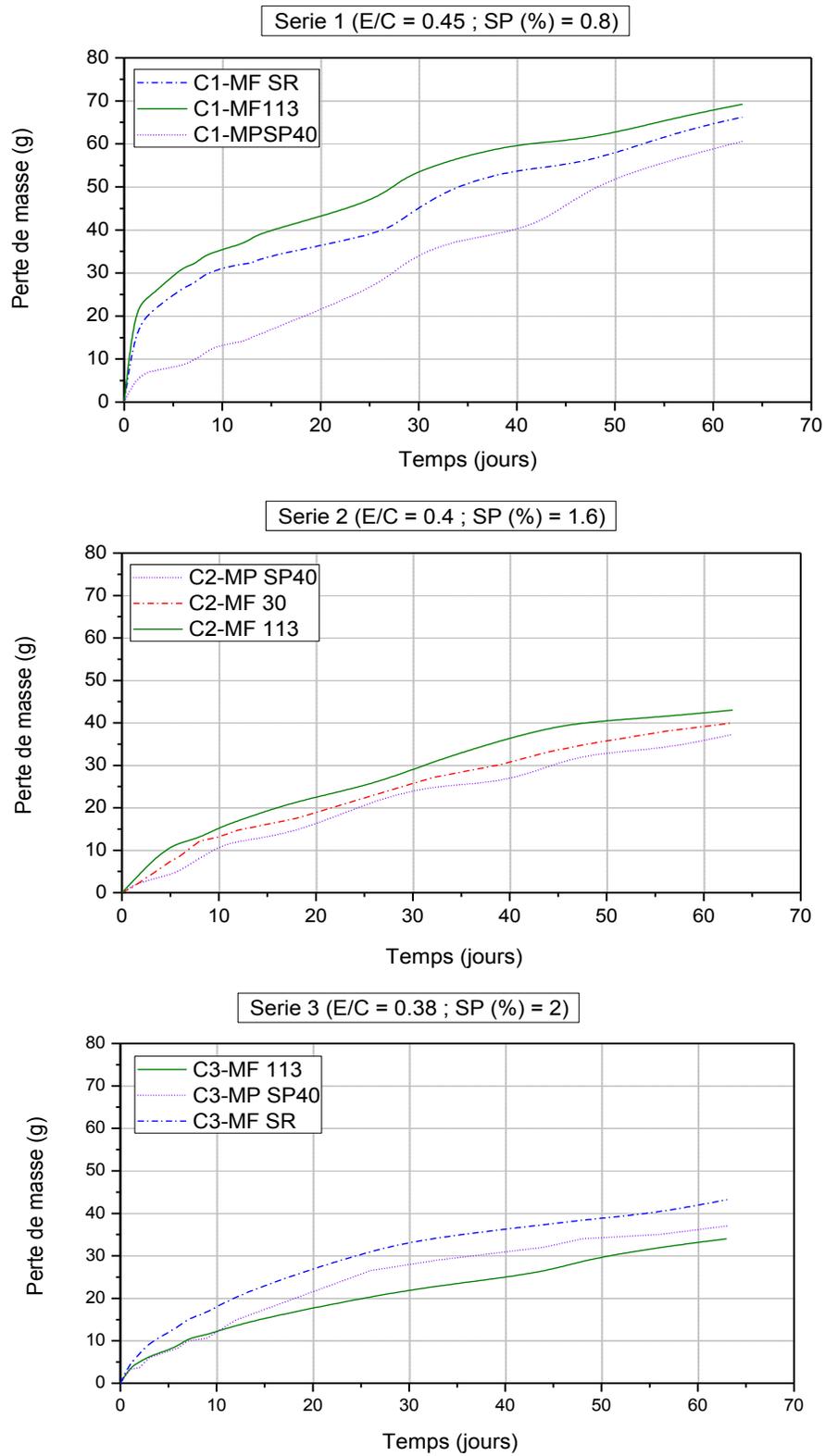


Figure 4.16: Effet des superplastifiants sur la perte en masse des éprouvettes de béton

Dans chaque série, nous avons les mêmes bétons, conservés et exposés aux mêmes conditions. La seule différence réside dans le type de SP. Nous pouvons donc conclure que le responsable de la variation des pertes de masse entre les bétons est la structure des pores capillaires.

La diffusivité est inversement proportionnelle au réseau capillaire. En d'autres termes, l'augmentation de la perte d'eau est due au raffinement des pores capillaires, ce qui peut être expliqué par le fait que le MF113 en séries 1 et 2 et le MF30 en série 2 ainsi que le MFSR en séries 1 et 3 diminuent le diamètre des pores, et par conséquent la diffusivité augmente. Dans la série 3, l'ajout de MF 113 inverse les résultats où il donne une faible diffusion de l'eau, sachant que la résistance obtenue est plus élevée ; ce qui peut être expliqué par le fait que MF 113 augmente le degré d'hydratation ce qui réduit la porosité totale, y compris les pores capillaires.

4.3.2.6. Déformation de retrait

La principale cause affectant le mécanisme de retrait de séchage (DS) est la diffusion de l'eau capillaire et adsorbée à l'environnement. Le mouvement de l'eau dépend de la teneur en humidité. Cette dernière varie dans l'espace et dans le temps ce qui provoque le retrait de séchage différentiel. Dans cette étude, nous donnons l'importance à la déformation du retrait de séchage de la surface des éprouvettes (déformation superficielle (DS)) et au cœur (déformation axiale (DA)). Le développement des deux déformations dans le temps est présenté sur les Figures 4.17 et 4.18. Les mesures de retrait sont accompagnées des mesures de l'humidité relative et de la température de laboratoire (Figure 4.19).

A. Déformation superficielle (DS)

D'après les résultats schématisés sur la Figure 4.17, il semble que la diminution du rapport E/C avec l'augmentation du dosage de SP provoque une augmentation des déformations superficielles des bétons adjuvants de MFSR durant 100 jours depuis le début des mesures. Après cette période, les résultats s'inversent ou le retrait de béton de la série 1 (C1-MFSR) augmente par rapport à celui de la série 3 (C3-MFSR). Ces remarques sont observées aussi sur les bétons adjuvants de

MPSP40, néanmoins, les déformations déterminées sur ces bétons sont faibles par rapport à celles obtenues sur les bétons composés de MFSR dans les deux série 1 et 3. Dans la série 2, l'addition de MF30 donne un retrait faible par rapport aux retraits des bétons composés de MF113 et MPSP40. La comparaison entre les déformations superficielles des bétons de trois séries, montre que seuls les bétons adjuvants de MF113 ont des déformations qui diminuent avec la diminution du rapport E/C. Contrairement aux MFSR et MPSP40, où le développement de retrait est inversement proportionnel au rapport E/C durant 100 jours et presque constant durant le reste de la période d'essais (Figure 4.20-a). Ces résultats nous ont permis de conclure que le MF113 augmente la déformation superficielle. Cette augmentation est importante pour un rapport E/C élevé, alors que MFSR et MPSP40 augmentent cette déformation pour des dosages de SP élevés durant les premiers trois mois. Pour Le MF30, nous pouvons dire que c'est le meilleur comparativement aux autres SP pour obtenir un béton de bonne ouvrabilité avec une résistance élevée et un faible retrait.

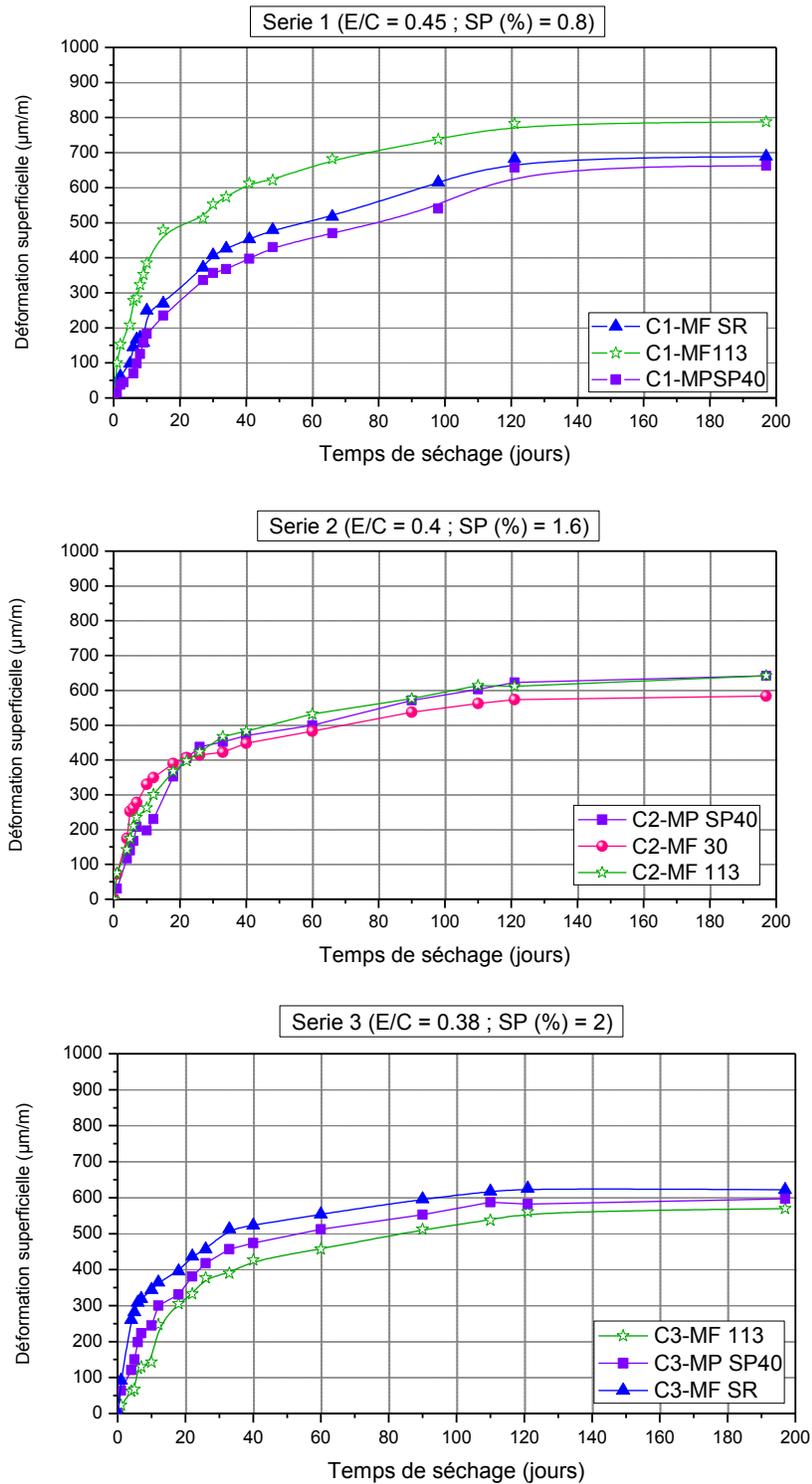


Figure 4.17 : Effect des superplastifiants sur la déformation superficielle du retrait de séchage du béton

B. Déformation axiale (DA)

En comparaison avec la déformation superficielle, il semble que l'influence de SP sur la déformation axiale est un peu faible, surtout lorsque le rapport E/C diminue. Dans la première série (E/C=0.45), la différence entre les courbes de retraits des trois bétons est claire, où l'addition de MPSP40 donne un faible retrait, tandis que les bétons adjuvants de MFSR et MF113 ont une même déformation axiale durant les premiers 20 jours, puis se divergent. Le béton préparé avec MF113 a une déformation faible par rapport à celle obtenue sur le béton préparé avec MFSR. Cette différence disparaît lorsque le rapport E/C diminue (séries 2 et 3). Les résultats des deux séries des bétons (2 et 3) schématisés sur la Figure 4.18 montrent que l'ajout de MF113 en série 3 et de MF30 en série 2 a réduit les déformations du cœur comme celle de la surface en comparaison avec les autres SP.

Contrairement à ce qui a été observé sur l'effet de SP sur la déformation superficielle, la différence des déformations axiales entre les deux séries 1 et 3 diminue avec la diminution du rapport E/C (Figure 4.20-b). Cette diminution varie selon le type de SP. Il est à noter que l'augmentation de dosage de MPSP40 provoque une augmentation de retrait durant les premiers jours de séchage.

La comparaison entre les pertes de masse et les déformations superficielles, montre une certaine linéarité sur les résultats des séries 1 et 2 où la perte d'une quantité élevée d'eau conduit à une déformation élevée, et inversement. Par contre, entre les pertes de masse et les déformations axiales il n'existe pas une relation claire, ce qui explique la présence d'une autre contrainte qui influence l'amplitude du retrait. En parallèle, la relation entre la déformation superficielle et la résistance en compression n'est pas claire, mais en comparaison avec la déformation axiale, il semble qu'il y'a une certaine linéarité dans les deux séries 2 et 3, où la déformation de retrait diminue avec l'augmentation de la résistance en compression.

Si on tient compte des deux propriétés (pertes de masse et résistance en compression), nous pouvons constater que :

- L'amplitude de la déformation superficielle dépend de la perte de masse plus que de la résistance, mais si cette dernière est élevée, elle diminue la déformation libre de béton.

- L'amplitude de la déformation axiale dépend de la résistance du béton plus que de la perte.

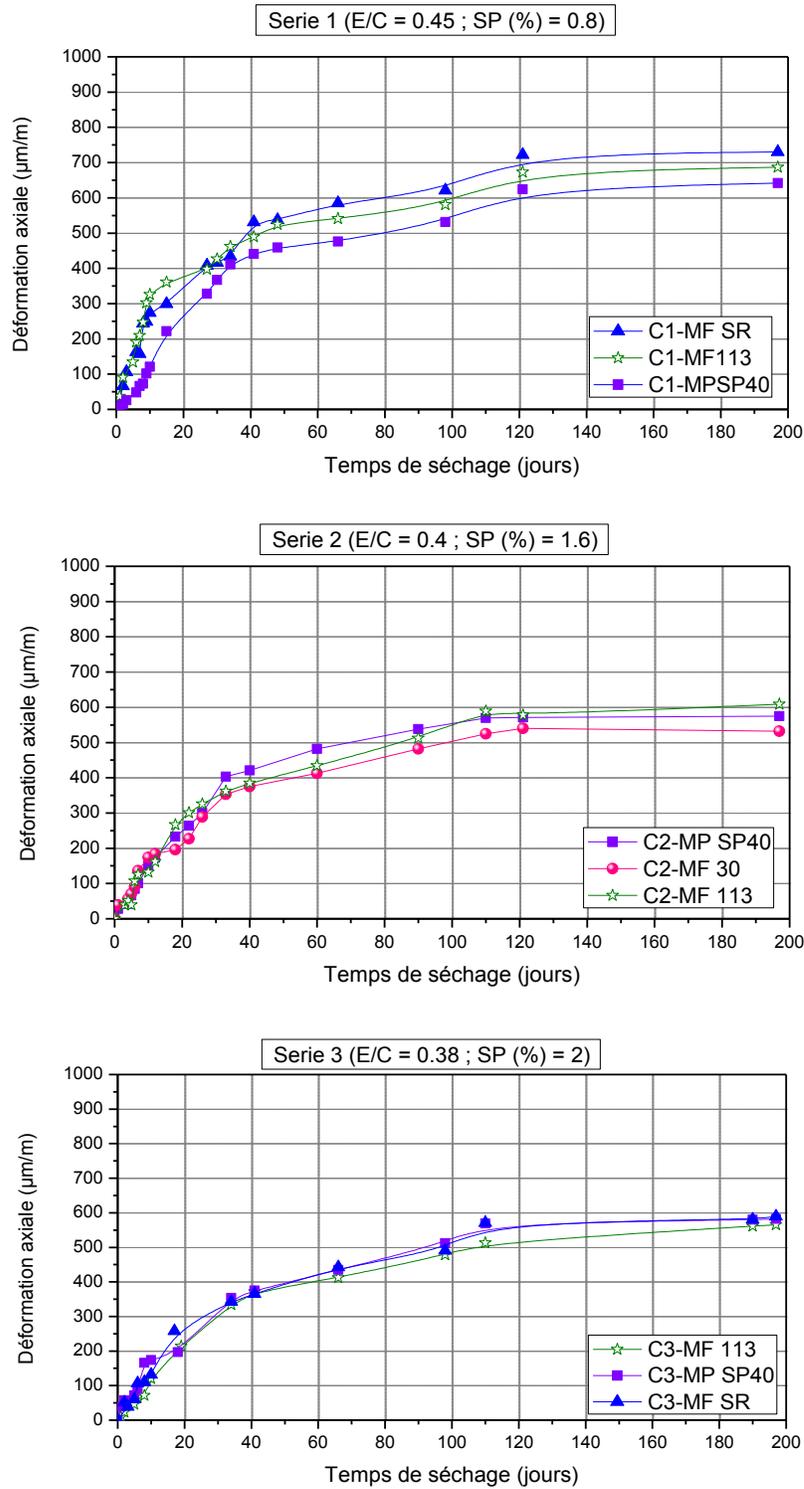


Figure 4.18 : Effet des superplastifiants sur la déformation axiale du retrait de séchage du béton

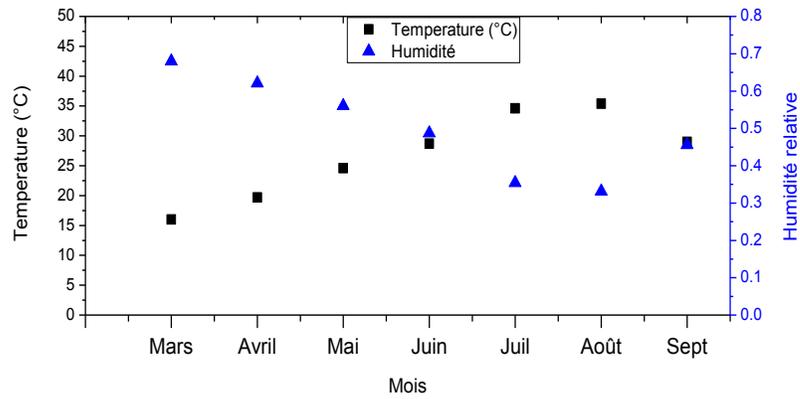
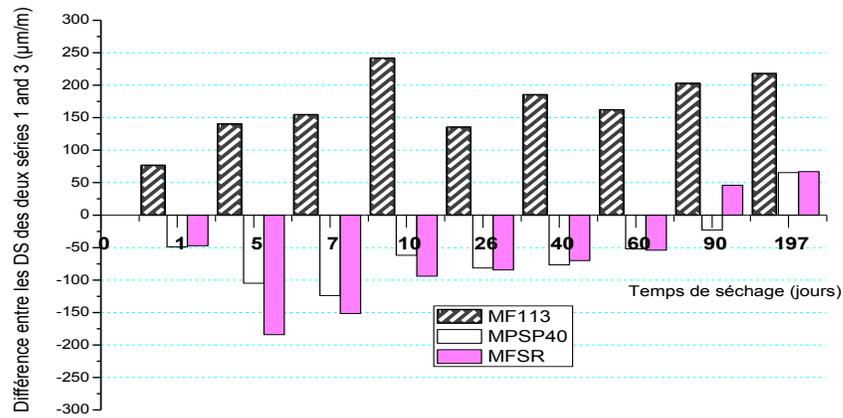
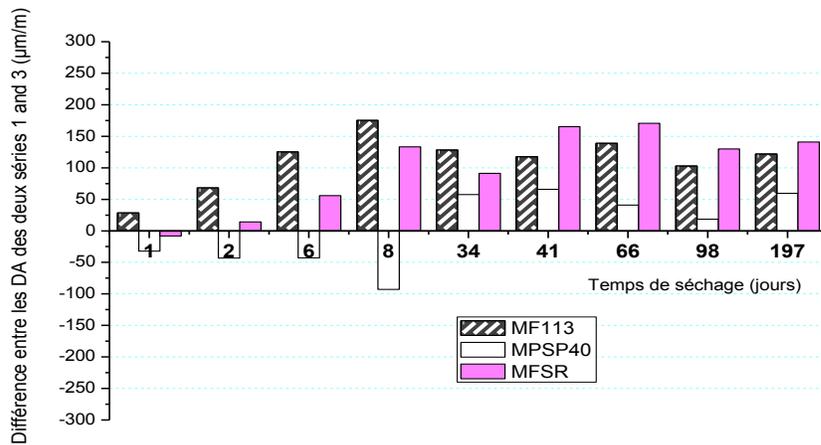


Figure 4.19: Variation de la température et de l'humidité relative durant l'essai



a



b

Figure 4.20 : Comparaison des déformations de retrait entre les deux séries 1 et 3.
a - Superficial (DS); b- Axiale (DA)

4.4. Conclusion

Sur la base des résultats expérimentaux obtenus dans cette étude, les conclusions pouvant être tirées sont les suivantes:

- Le superplastifiant type PCE a une influence significative sur les propriétés mécaniques et physiques du béton.
- L'effet de retardateur causé par l'addition de PCE n'a pas été détecté sur la prise et l'hydratation seulement, mais aussi sur le développement des propriétés physiques et mécaniques après 40 jours, où les résultats de la vitesse d'impulsion indiquent un changement très clair dans le comportement du béton après 40 jours depuis le début des mesures.
- La bonne ouvrabilité du béton frais préparé avec PCE ne représente pas le seul indicateur sur l'efficacité d'un SP, le type (architecture) de PCE a un effet important sur l'hydratation.
- La non- compatibilité entre le rapport E/C et le type/dosage de SP ne se limite pas à l'ouvrabilité. Elle peut être observée dans la dégradation des propriétés physiques et/ou mécaniques (diminution de la résistance et/ou augmentation de la déformation de retrait).
- La déformation du retrait de séchage du béton avec adjuvant type polycarboxylate d'éther dépend de la perte de masse et du développement des propriétés mécaniques en même temps. Ces deux facteurs sont fortement affectés par le type et le dosage le superplastifiant.

4.5. Validation du modèle proposé

L'objectif principal de cette étape est d'étudier la possibilité d'appliquer le modèles proposé sur les bétons de faible rapport E/C et contenant des superplastifiants. Dans cette étape de validation, nous comparons entre les résultats expérimentaux de retrait présentés dans la section 4.3 et les résultats de prédiction des modèles pour évaluer la précision du model proposé par rapport à celle des modèles comparés. Les résultats de confrontation modèles/expérimental sont présentés sur six figures. Dans les trois premières (Figures 4.21- 4.23), les modèles sont comparés aux déformations superficielles du retrait (déformation de la peau).

Les trois dernières (Figures 4.24-4.26) présentent la comparaison des déformations axiales du retrait avec celles prédites. Il est à noter que pour les modèles il n'y a pas une différence entre les déformations axiales et superficielles.

4.5.1. Confrontation modèles/expérimental des déformations superficielles

A la vue des résultats présentés dans la Figure 4.21, il semble que les modèles sous estiment le retrait des bétons. Dans le cas de béton contenant de MF SR, le modèle proposé donne une meilleure estimation, et dans le cas de bétons contenant de MP SP40, le modèle B3 donne une bonne estimation devant les autres modèles. Par contre, sur les graphes de la Figure (4.22) qui présentent les résultats de la deuxième série ($E/C = 0.4$), nous remarquons des sous estimations de tous les modèles, mais entre eux, le modèle proposé donne des déformations plus proche aux déformations mesurées. Il semble que plus la résistance augmente, plus les précisions des modèles diminuent et les deux modèles ACI et modèle proposé se convergent. Cela est bien illustré sur les graphes de la troisième série (Figure 4.23).

4.5.2. Confrontation modèles/ expérimental des déformations axiales

En comparaison avec les résultats des déformations superficielles, il paraît que l'augmentation de la résistance de béton, diminue l'écart entre les déformations mesurées et celles prédites. Les résultats de la première série des bétons (Figure 4.24) montrent que le modèle proposé est plus précis que les autres modèles pour les bétons contenant de MF113 et MFSR, suivi par le modèle B3 qui donne une bonne estimation de retrait de béton préparé avec MP SP40. Dans la deuxième série (Figure 4.25), le modèle reste le plus précis dans l'évaluation de la déformation axiale. Le modèle ACI estime aussi de façon raisonnable le retrait du béton contenant MF 30. Dans la troisième série (Figure 4.26), nous remarquons une convergence entre le modèle proposé et le modèle ACI. Les deux modèles donnent presque même estimation du retrait des bétons préparés avec MP SP40 et MFSR, et une faible différence pour le béton préparé avec MF113 lorsque le rapport E/C diminue.

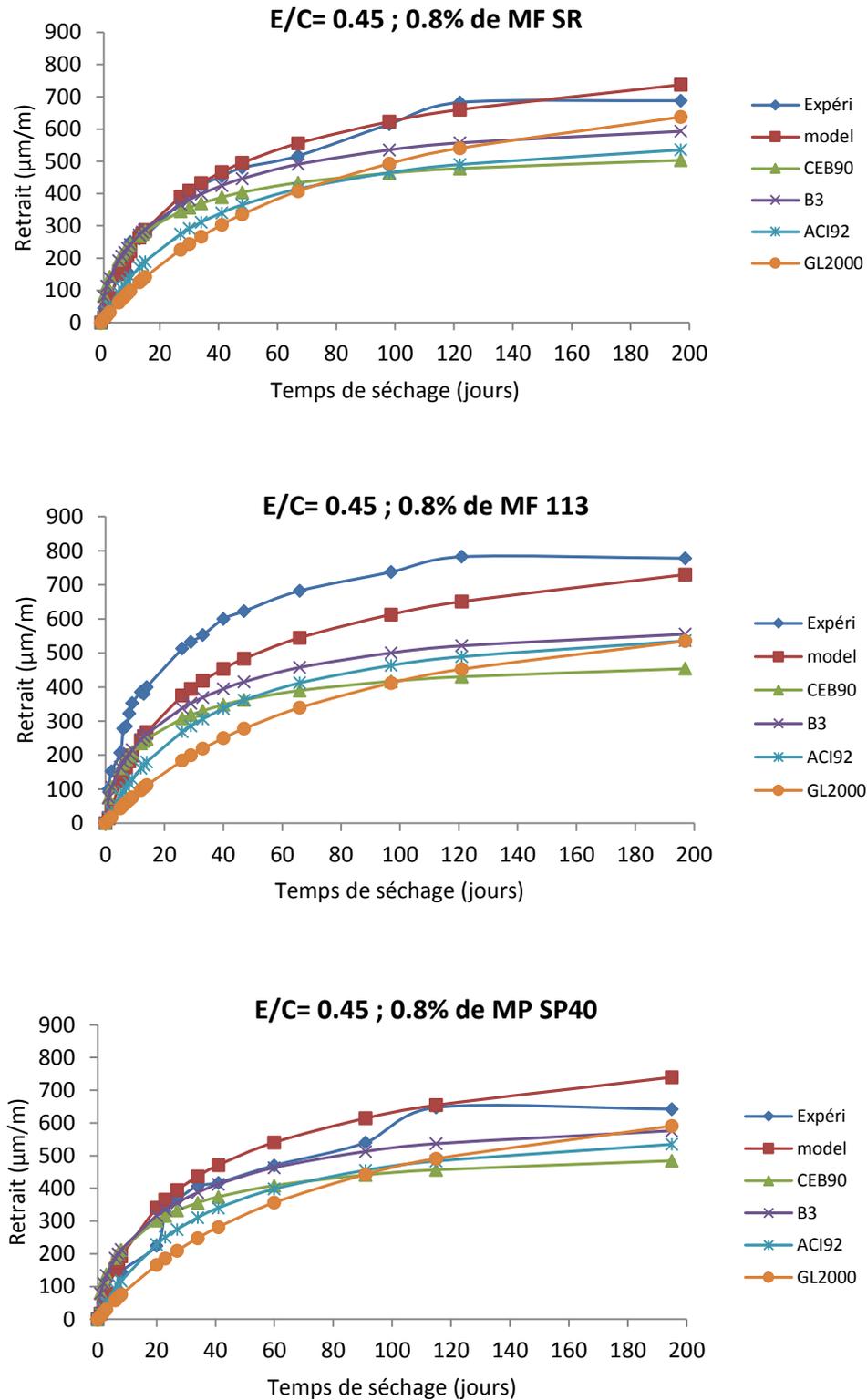


Figure 4.21 : Comparaison des déformations de retrait des bétons calculées par les Modèles avec l'expérimental (superficielles - Série 1)

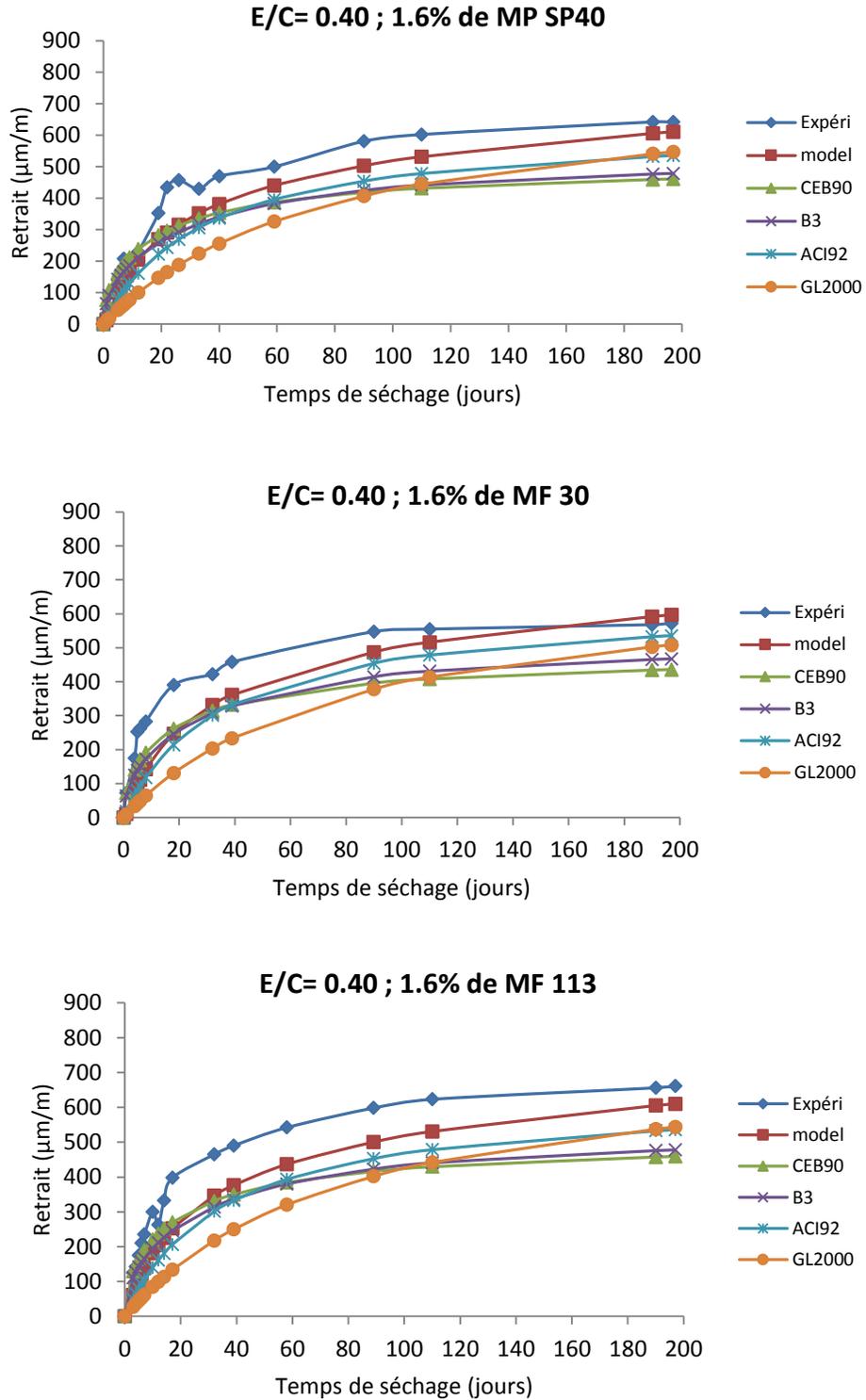


Figure 4.22 . Comparaison des déformations de retrait des bétons calculées par les Modèles avec l'expérimental (superficielles - la série 2)

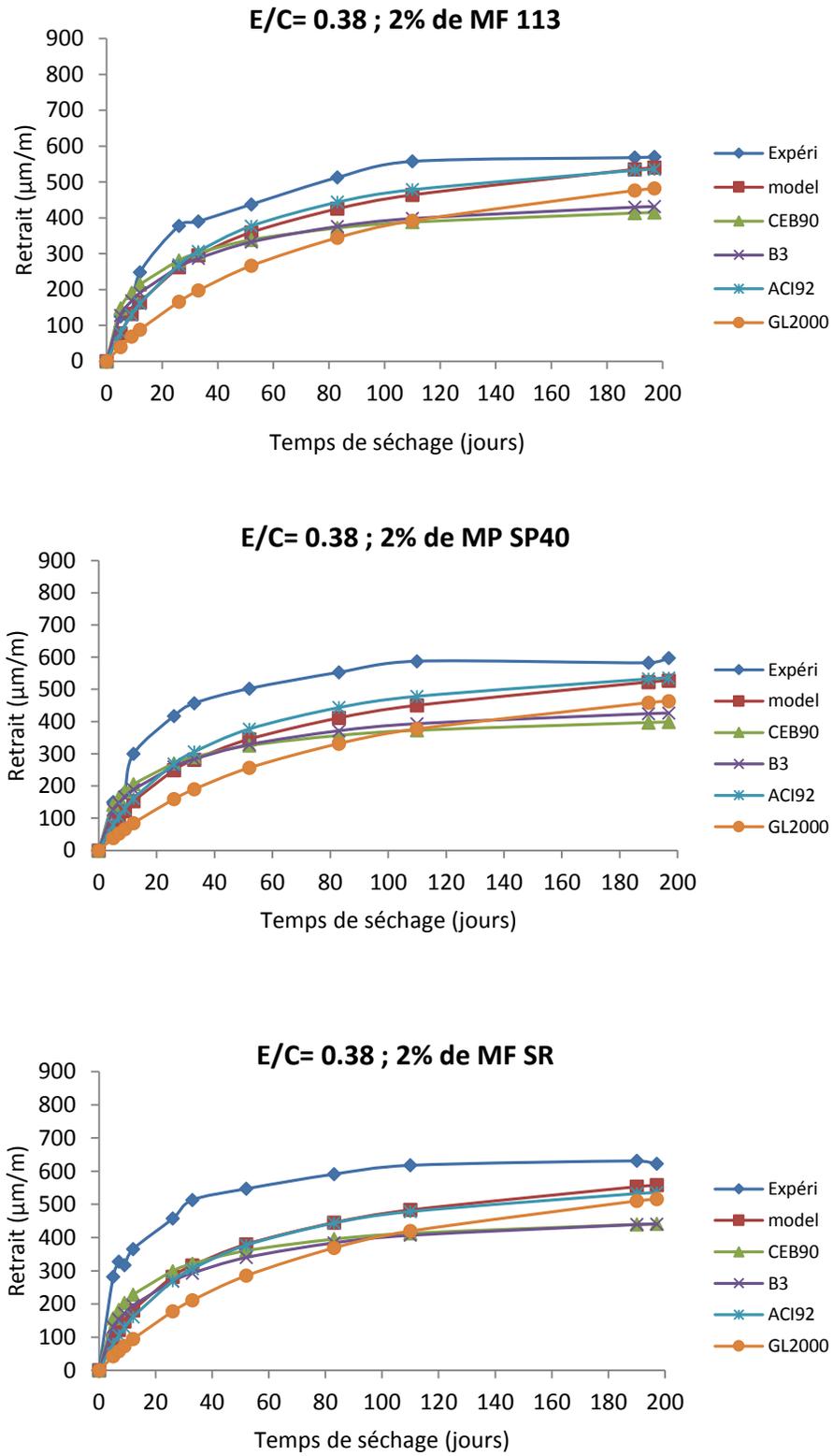


Figure 4.23 . Comparaison des déformations de retrait des bétons calculées par les Modèles avec l'expérimental (superficielles - de la série 3)

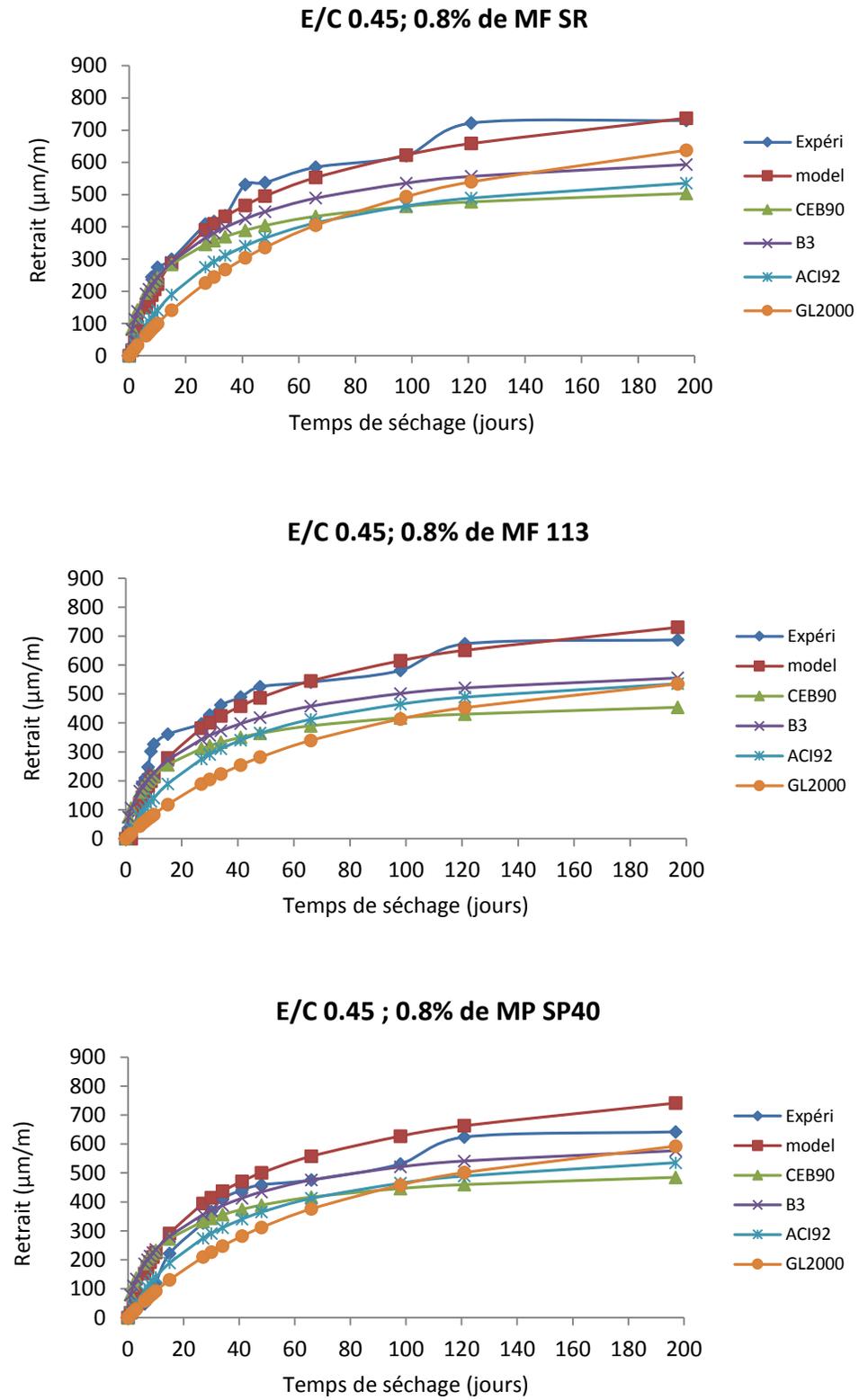


Figure 4.24 . Comparaison des déformations de retrait des bétons calculées par les Modèles avec l'expérimental (Axiales - la série 1)

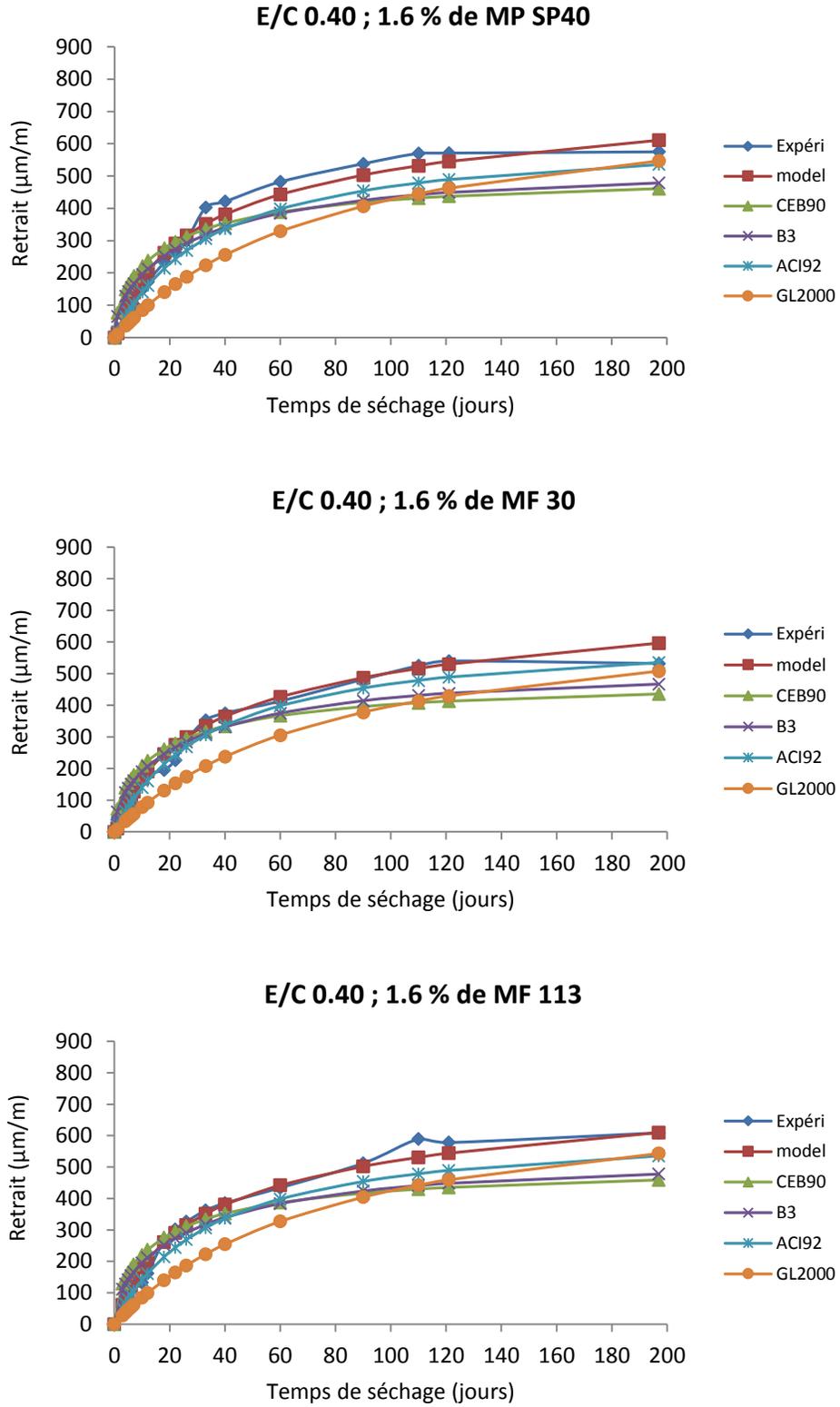


Figure 4.25 . Comparaison des déformations de retrait des bétons calculées par les Modèles avec l'expérimental (Axiales - la série 2)

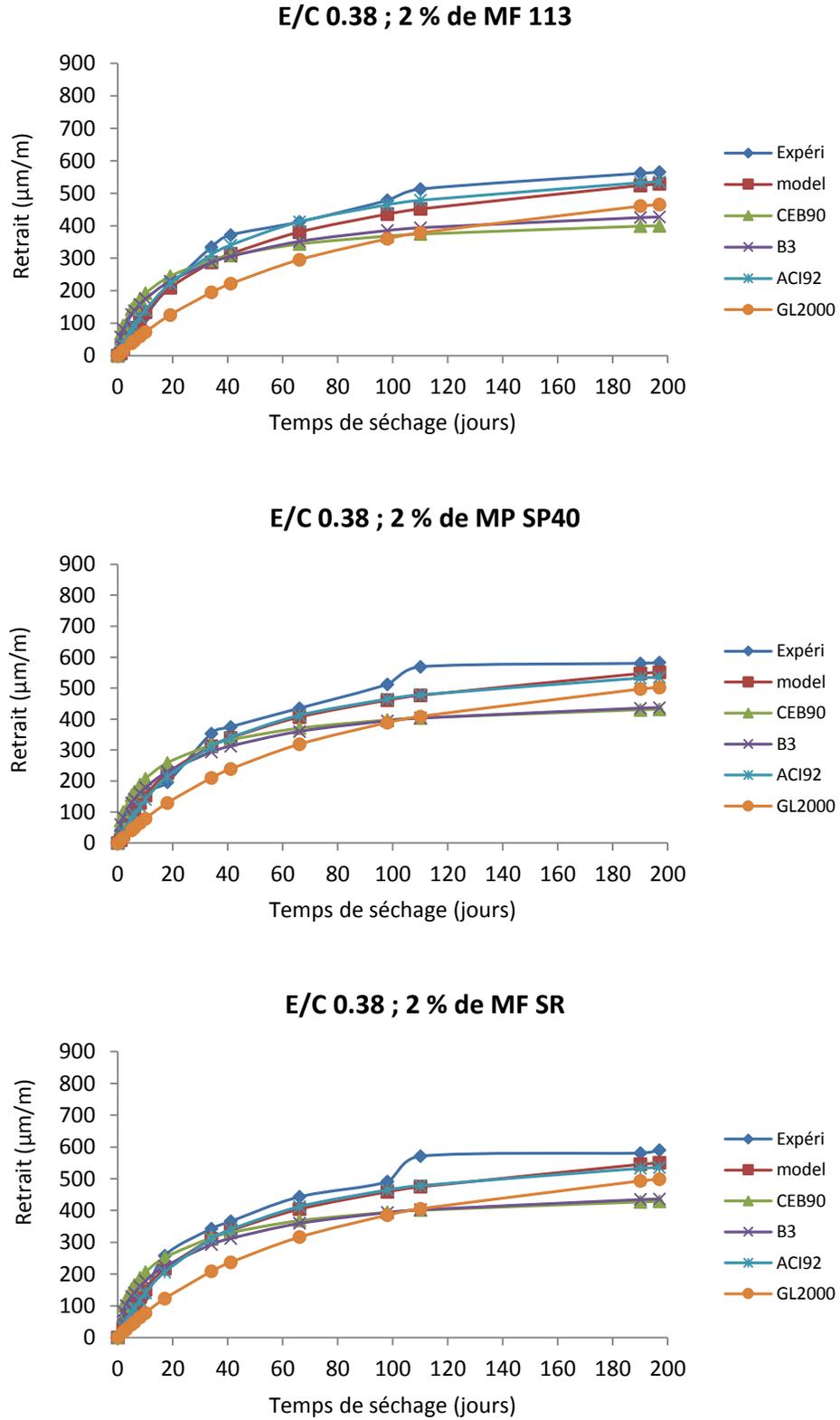


Figure 4.26 . Comparaison des déformations de retrait des bétons calculées par les Modèles avec l'expérimental (Axiales - la série 3)

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

La prédiction des déformations différées est d'une très grande importance pour l'étude de la durabilité et de l'aptitude au fonctionnement à long terme des structures en béton. Pour estimer les effets de la déformation de retrait à long terme sur le comportement des structures, il est nécessaire de déterminer l'amplitude de cette déformation.

L'objectif de cette étude est de développer un nouveau modèle empirique simple capable de prédire le retrait de séchage du béton de résistance normale. Le modèle a été construit en utilisant la méthode de régression linéaire. Les facteurs affectant la déformation de retrait de séchage prisent on considération sont l'épaisseur fictive de la pièce, la résistance en compression du béton, l'humidité relative de l'environnement, le volume de la pâte du ciment, et le type du ciment, ainsi que les conditions de conservation. Le travail ainsi présenté est composé de trois parties ; analyse bibliographique, étude numérique et étude expérimentale présentées sous forme de chapitres :

L'analyse bibliographique portée sur le retrait et le fluage a mis en évidence la complexité de ces phénomènes vue les nombreux mécanismes mise en jeux et le couplage entre ces mécanismes, et vue l'hétérogénéité du béton. A la vue de ces constatations, il semble que la modélisation de retrait et de fluage sous différentes conditions et pour les différentes compositions n'est pas une tâche facile. La modélisation basée sur des considérations physiques, chimiques ou mécaniques (mécanisme réels) devient délicat. Au regard de cette complexité, nous avons proposé un modèle empirique qui base sur les résultats expérimentaux des essais de plusieurs chercheurs.

Dans la deuxième partie, nous avons présenté au début les étapes de construction du modèle, puis nous avons analysé et validé le modèle à partir des essais expérimentaux tirés des résultats de certains essais disponibles dans la littérature. Quatre méthodes ont été incluses dans cette étude pour évaluer la précision et la performance du modèle proposé et qui sont : CEB-90, B3-2000, ACI-92, GL-2000. Les tests de validation ont donné de bons résultats, ce qui montre la pertinence du modèle pour prédire efficacement la déformation de retrait avec une précision acceptable en comparaison avec les modèles étudiés. Les conclusions tirées de cette partie d'étude peuvent se résumer comme suit:

- La précision de la prédiction du retrait à long terme dépend de la forme de la fonction de temps utilisée. Dans cette étude, la fonction exponentielle a donné une bonne corrélation.
- Le modèle proposé est plus sensible au type de ciment.
- Le modèle proposé permet de prédire le retrait de séchage du béton avec une meilleure précision que celles des autres modèles pour les trois types de ciment. Le modèle CEB donne une bonne estimation de retrait de séchage du béton composé du ciment type SL alors que le modèle ACI estime mieux le retrait de séchage du béton composé du ciment type RS.

Dans la troisième partie un programme expérimental a été réalisé au laboratoire dans le but d'étudier la possibilité d'appliquer le modèle développé sur un béton contenant un adjuvant superplastifiant. Les résultats de l'étude expérimentale de l'effet de superplastifiant sur le retrait du béton nous ont permis de conclure que :

- le superplastifiant type PCE a une influence significative sur les propriétés mécaniques et physiques du béton.
- La déformation du retrait de séchage du béton avec superplastifiant dépend de la perte de masse et du développement des propriétés mécaniques en même temps. Ces deux facteurs sont fortement affectés par le type et le dosage le superplastifiant. La comparaison entre la déformation superficielle et axiale montre que :

- L'effet du superplastifiant sur le retrait superficiel est plus important que sur le retrait axial.
- L'amplitude de la déformation superficielle dépend de la perte de masse plus que de la résistance, mais si cette dernière est élevée, elle diminue la déformation libre du béton.
- L'amplitude de la déformation axiale dépend de la résistance du béton plus que de la perte.

Les résultats expérimentaux du retrait sont exploités pour évaluer la précision du modèle développé ainsi que les quatre modèles comparés. Les tests de validation montrent que :

- Les déformations superficielles, sont sous estimées, mais le modèle proposé reste le meilleur dans les deux séries 1 et 2, suivi par le modèle B3 dans la série 1 et le modèle ACI dans la série 2.
- Les déformations superficielles sont bien estimées par le modèle proposé suivi par le modèle ACI. Lorsque le rapport E/C diminue ces deux modèles se convergent.

Le travail présenté dans cette thèse a été limité à l'étude du retrait de séchage du béton sans ajouts et de résistances normales. Les résultats obtenus nous encouragent à proposer la continuité de cette étude. Donc il serait intéressant d'étudier la possibilité d'appliquer le modèle développé pour la prévision du retrait du :

- béton contenant des ajouts.
- béton de fibres et béton autoplaçant.
- béton de granulats légers.
- Béton de haute résistance et ou de haute performance.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Paulin P., *Reaction mechanisms of concrete admixtures*, Cement and Concrete Research, Vol 20, Nov 1990, pp. 910–918.
2. Barret P and Bertlandie D., *Fundamental hydration Kinetic features of the major cement constituents :Ca₃Sio₄ and BCa₂SiO₄*, Journal de Chimie Physique, Vol. 83, N°11-12, 1986, pp. 765-775.
3. Viallis H., *Interaction des Silicates de Calcium Hydratés (C-S-H), principaux constituants du ciment, avec les chlorures d'alcalins. Analogie avec les argilesthèse de l'hydratation*. Université de Bourgogne, 6 octobre 2000.
4. Taylor H.F.W., *Cement Chemistry*, 2^{ème} édition, Edition Thomas Telford, Londres. 1997.
5. Vernet C., Cadoret G., 1992. in Les B.H.P., *caractéristiques, durabilité, applications*. Presses de l'E.N.P.C, Paris 1986, pp. 115-128.
6. Baroghel-Bouny V., *Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons; Méthodes, analyse, interprétations*. Revue Française de Génie Civil. L.C.P.C, 1994.
7. Feldman R.F, Sereda P.J., *A new model of hydrated cement and its practical implications*, Eng. J. CAN, Vol. 53, 1970, pp. 53-59.
8. Powers T.C., *The Thermodynamics of volume change and creep*, Mat & Con Paris 1.. Cite dans Zdeněk P. Bazant., « Mathematical Modeling of creep and shrinkage of concrete », John Wiley & sons Ltd, USA 1988, pp. 487-507.
9. Wittmann F.H., *hydraulic Cement Paste: Their Structure and Properties*, Cement and Concrete Association, Slough, United Kingdom, 1976, pp. 96-117.
10. Mamillan M., *Répartition de la teneur en eau dans le béton durci*. Annales de l'I.T.B.T.P., N°309-310, 1973, pp. 30-34.
11. Benboudjema F., *Modélisation des déformations différées du béton sous sollicitation biaxiales. Applications aux enceintes de confinement de bâtiments réacteurs des centrales nucléaire*, thèse de doctorat. Université de Marne la Vallée, Paris, décembre 2002

12. Acker P., Ulm F.-J., *Creep and shrinkage of concrete: physical origins and practical measurements*, Nuclear Engineering and Design., vol 203, N° 2-3, January 2001, pp. 143–158.
13. Okjima T., Ishikawa T., Ichise K., *Moisture effect on the mechanical properties of cement mortar*, Transactions of the Japan Concrete Institute, Vol. 2, 1980, pp.125-132.
14. Dantec P., Terme G., *Séchage et comportement différé du béton : Influence de la cinétique des dessiccation sur le comportement des bétons*, L.C.P.C report, Vol. 02, N° 141, Paris, 1996.
15. Neville A.M., Brooks J.J., *A comparison of creep, elasticity and strength of concrete in tension and in compression*, Magazine of Concrete Research, Vol. 29, N°100, 1977, pp. 131-141.
16. Burlion F., Bourgeois J.F., Shao, *Comportement mécanique et séchage de matériaux à matrice cimentaire ; comportement mortier-béton*, Revue française de Génie Civil, Vol 7, N°2, Edt Taylor & Francis Group, 2005, pp. 145-165.
17. Yurtdas I, Oeng H, Burlion N, Skoczylas F., *Influence of water by cement ratio on mechanical properties of mortars submitted to drying*, Cement and concrete research, Vol. 36, July 2006, pp. 1286-1293.
18. Pihlajavaara S.E., *A review of some of the main results of a research on the ageing phenomena of concrete, effect of moisture conditions on strength, shrinkage and creep of mature concrete*, Cement and Concrete Research, Vol. 4, 1974, pp. 761-771.
19. Torrenti J.M., *Comportement multiaxial du béton : Aspects expérimentaux et modélisation*. Phd thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1987.
20. Kanna V., Olson R.A., Jennings H.M., *Effect of shrinkage and moisture content on the physical characteristics of blended cement mortars*, Cement and Concrete Research, Vol.18, N° 10, 1998, pp. 1467-1477.
21. Touttlemonde F., *Résistance au choc des structures en béton*, Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1994.
22. Turcry P., *Retrait et fissuration des bétons autoplaçants ; Influence de la formulation*, thèse de doctorat, Université de Nantes, France, 2003.
23. Neville A.M., *Propriétés des bétons*, Ed Eyrolles, Paris (France), 2000.
24. Le Roy. R, *Déformations instantanés et différées des bétons à haute performances*, L.C.P.C, 1996.

25. Hua C., *Retrait d'autodessiccation du ciment. Analyse et modélisation macroscopique*, Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées, N° 196, 1995, pp. 79-89.
26. Laurance O., *La fissuration due au retrait restreint dans les réparations minces en béton : Apports combinés de l'expérimentation et de la modélisation*, Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et chaussées, Paris. Août 2001.
27. Xi Y., Bažant Z.P., Molina L., Jennings H.M., *Moisture diffusion in cementitious materials: moisture capacity and diffusivity*, Advanced Cement Based Materials, Vol. 1, 1994, pp. 258-266.
28. Acker P., *Comportement mécanique des bétons : Apports de l'approche physicochimique*, Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1988.
29. Wittmann F.H., *Surface tension, shrinkage and strength of hardened cement*, Matériaux et , Structure, Vol. 1, N° 6, 1968, pp. 547-552.
30. Wittmann F.H., Chapter; *Creep and shrinkage mechanisms*, dans : Bažant Z.P., Wittmann F.H. (Eds.), *Creep and Shrinkage in concrete Structures*, Wiley, New York, 1982, pp. 129-161.
31. Wittmann F.H., Beltzung F, Zhao T.J., *Shrinkage Mechanisms, crack formation, and service life of reinforced concrete structures*, Journal of Structural Engineering, Vol. 1, 2009, pp. 13-28.
32. Bazant. Z.P. *Mathematical modeling of creep and shrinkage of concrete*. RELEM Committee chairman and symposium chairman. A 27 November 1987, Evanston, Illinois, USA.
33. Bissonnette B, Pierre P, Pigeon M., *Influence of key parameters on drying shrinkage of cementitious materials*. Cement and Concrete Research, Vol. 29, 1999, pp. 1655–1662.
34. Vandewalle. L., *Concrete creep and shrinkage at cyclic ambient conditions*, Cement and concrete composites, Vol. 22, 2000, pp 201-208.
35. Brooks J.J., *Influence of mix proportion, plasticizers and superplasticizers on creep and drying shrinkage of concrete*, Magazine of Concrete Research. Vol. 41, N° 148, Sep 1989, pp. 145-153.
36. ACI 224R-01. *Control of cracking in concrete structures*, ACI committee 224, May 16, American Concrete Institute, 2001.

37. Odman S.T.A., *Effect of variation in volume, surface area exposed to drying and composition of concrete on shrinkage*, Rilem/CEM Bureau Int. Colloquium on the shrinkage of hydraulic concrete, N°1, Madrid 1968. 20 p.
38. Zhang M.H., Tam C.T., Leow M.P., *Effect of water to cementitious materials ratio and silica fume on the autogenous shrinkage of concrete*, Cement and concrete research, Vol. 33, 2003, pp. 1687-1694.
39. Ugur K N, Fikret T, *Effect of environmental conditions on the properties of concretes with different cement types*. Construction and Building Materials, Vol. 21, 2007, pp. 634–645.
40. Gesoglu. M, Östuran .T., Güneyisis. Erhan., *shrinkage cracking of light weight concrete made with cold-banded fly ash aggregates.*, Cement and concrete research Vol. 34, 2004, pp 1121-1130.
41. Lee K. M, Lee H. K, Lee S. H, Kim G. Y., *Autogenous shrinkage of concrete containing granulated blast-furnace slag*. Cement and concrete research Vol. 36, July 2006, pp. 1279-1285.
42. Chindaprasirt. P, Homwuttiwong. S, Sirivivatnanon. V., *Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulphate resistance of blended cement mortar*, Cement & concrete research Vol.34, 2004, pp. 1087-1092.
43. Termkhajornkit P, Nawa T, Masashi, T.S., *Effect of fly ash autogenous shrinkage*, Cement and Concrete Research, Vol. 35, 2005, pp. 473-482.
44. Tongaroonsri S, Tangtermsirikul S. *Effect of mineral admixtures and curing periods on shrinkage and cracking age under restrained condition*. Construction and Building Materials Vol. 23, 2009,pp. 1050–1056.
45. Akkaya Y, Ouyang C, Shah S.P., *Effect of supplementary cementitious materials on shrinkage and crack development in concrete*. Cement and concrete composites Vol. 29, 2007, pp. 117-123.
46. Zhang M.H, Li L, and Paramasivam P., *Shrinkage of High-Strength Lightweight Aggregate Concrete Exposed to Dry Environment* , ACI Materials Journal, Vol. 102, N° 2, March-April 2005.
47. Katri R.P, Sirivivatnanon V, Gross W., *Effect of different supplementary cementitious materials on mechanical properties of high performances concrete*. CCR 25 (1995), pp. 209-220.
48. Iitim A, Ezziane K, Kadri EH., *Compressive strength and shrinkage of mortar containing various amounts of mineral additions*. Construction and Building Materials, Vol. 25, N°8, August 2011, pp. 3603-3609.

49. Brooks J.J., Megat Johari M.A., *Effect of metakaolim on creep and shrinkage of concrete*, Cement and concrete composite Vol. 23, 2001, pp. 495-502.
50. Wilds, Khatib J.M, Roose L.J., *Chemical shrinkage and autogenous shrinkage of portland cement metakaolin pastes* », ADV Cement research, Vol. 10, N°3, 1998. pp 109-119.
51. Philippe J.P. Gleize, Martin Cyr, Gilles Escadeillas., *Effect of Metakaoline on autogenous shrinkage of cement pastes*, Cement and concrete composites , Vol. 29, 2007, pp. 80-87.
52. Collins F, Sanjayan J.G., *Cracking tendency of alkali-activated slag concrete subjected to restrained shrinkage*. Cement and concrete research Vol. 30, (2000), pp. 791-798.
53. Beltzung, Françoise., *Approche colloïdale du retrait des matrices cimentaires*, thèse de doctorat, Zürich, 2004.
54. Zhen He, Zongjin Li., *Influence of alkali on restrained shrinkage behaviour of cement based materials*, Cement and Concrete Research, Vol. 35, 2005, pp. 157-463.
55. Alou F, Ferraris C.F, Wittmann F.H., *Etude expérimentale du retrait du béton*, Matériaux et Construction, Vol. 20, 1987, pp. 323-333.
56. Bazant Z.P, Wittmann F.H, Kim J.L and Alou F., *Statistical extrapolation of shrinkage data- Part I ; Regression*, Materials Journal Vol. 84, N°1, 1987, pp. 20-34.
57. Berthier R. M., *Physique des bétons et des aciers pour ouvrages en béton précontraint*, Annales I.T.B.T.P N° 389, Dec 1980, pp. 35-66.
58. Ayano T., and Wittmann F. H., *Drying, moisture distribution and shrinkage of cement-based materials*, Materials and structures, Vol. 35, April 2002, pp.134-140.
59. Alvredo, A.M., Helbling A. and Wittmann F.H., *Shrinkage data of drying concrete*, Building Materials reports N°4, ETH Laboratory for building materials 1995.
60. Ballim Y., *the effect of shale in quartzite aggregate on the creep and shrinkage of concrete – a comparison with RILEM Model B3.*, Materials and structures, Vol. 33, May 2000, pp. 235-242.

61. Bentur A, Igarashi SI, Kolver K., Prevention of autogenous shrinkage in high strength concrete by internal curing using lightweight aggregates, *Cement and concrete research*, Vol. 31, 2001, pp. 1587-1591.
62. Newman, J. B., *Properties of structural Lightweight aggregate concrete. Structural Lightweight aggregate concrete*, J. L Clarke, ed., Chapman and hall, London 1993, pp. 19-44.
63. Berra, M., and Ferrara, G., *Normal weight and total Lightweight High strength concrete: A comparative experimental study, Utilization of High strength concrete*, Second International Symposium,. Hester, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., SP -121, , 1990, pp. 701-734.
64. Gesoglu M, Zturan T.O, Erhan G.N., *Effects of cold-bonded fly ash aggregate properties on the shrinkage cracking of lightweight concretes*. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 28, 2006, pp. 598–605.
65. Huo X.S, Wong I.U, *Experimental study of early age behavior of high performance concrete deck slabs under different curing methods*, *Construction and Building Materials*, Vol. 20, Dec 2005, pp1049-1056.
66. Shoya M, Sugita M., *Application of special admixture to reduce shrinkage cracking of Air dried concrete*, Hachinohe, Japon, 1992, pp. 1-11.
67. Saliba J, Rozière E, Grondin F, Loukili A., *Influence of shrinkage-reducing admixtures on plastic and long-term shrinkage*. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 33, 2011, pp. 209–217.
68. Bentz D.P, Geiker M.R, Hansen K.K., *Shrinkage-reducing admixture and early-age desiccation in cement pastes and mortars*. *Cement and Concrete Research* Vol. 31, 2001, pp. 1075-1085.
69. Shah S.P, Karaguler M. E, and Sarigaphuti M., *Effect of shrinkage Reducing Admixtures on development of plastic shrinkage Cracks*, *ACI Materials journal*, Vol. 89, N°3, May-June 1992.
70. Mounanga P., *Étude expérimentale du comportement de pâtes de ciment au très jeune âge : hydratation, retraits, propriétés thermophysiques*, Thèse de doctorat, Ecole doctorale de Nantes, France, Décembre 2003.
71. Khatib J.M, Mangat P.S, *Influence of superplasticizer and curing on porosity and pore structure of cement paste*. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 21, 1999, pp. 431-437.
72. Erika Holt, *Construction of mixture design to chemical and autogenous shrinkage of concrete at early ages*, *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, 2005, pp. 464-472.

73. Alexander K.M, Bruere G.M, Ivanusec I., *The creep and related properties of very high-strength superplasticized concrete*. Cement Concrete Research, Vol. 10, 1980, pp. 131-137.
74. Ngab AS, Nilson A.H, Slate FO., *Shrinkage and creep of high-strength concrete*, ACI Journal, Vol. 78, 1981, pp. 255-261.
75. Brooks J.J, Wainwright P.J. *Properties of ultra-high-strength concrete containing a superplasticizer*. Magazine of Concrete Research, Vol. 35, December 1983, pp. 205-213.
76. Brooks JJ., *Influence of mix proportions, plasticizers and superplasticizers on creep and drying shrinkage of concrete*. Magazine of Concrete Research, Vol 41, September 1989, pp. 145 -153.
77. Alsayed SH., *Influence of superplasticizer, plasticizer, and silica fume on the drying shrinkage of high-strength concrete subjected to hot-dry field conditions.*, Cement and Concrete Research, Vol. 28, October 1998, pp. 1405-1415.
78. Veinuat M., *La précontrainte des ciments et des bétons*, Edt du Moniteur des travaux publics et du bâtiment, France 1976.
79. Rouse J.M and Billington S.L., *Creep and shrinkage of high performance fiber reinforced cementitious composites*, ACI Materials journal, Vol. 104, N°2, March-April 2007, pp.129-136.
80. Kovler K. and Buntur A., *Shrinkage of early age steel fiber reinforced concrete*, august 1997, pp. 431-439.
81. Tamtsia B.T., Beaudoin J.J., *Basic creep of hardened cement paste: A re-examination of the role of water*, Cement and Concrete Research, vol.30, 2000, pp. 1465-1475.
82. Glücklich J., *Creep mechanism in cement mortar*, Journal of American Concrete Institute, Vol.59, 1962, pp. 923-948.
83. Ruetz W., *An hypothesis for the creep of the hardened cement paste and the influence of simultaneous shrinkage*, Proceedings of the Structure of Concrete and its Behaviour under Load, Londres, 1968, pp. 365-387.
84. Ulm F.J, Acker P., *Le point sur le fluage et la recouvrance des bétons*, Bulletin de liaison des Ponts et Chaussées spécial, 1998, pp. 73-82.

85. Illston J.M., *The components of strains in concrete under sustained compressive stress*, Magazine of Concrete Research, Vol. 17, N°50, 1965, pp. 21-28.
86. Bažant Z.P., Huggaard A.B., Baweja S., Ulm F.J., *Microprestressing-solidification Theory for concrete creep. I: Aging and drying effects*, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 123, N° 11, 1997, pp. 1188-1194.
87. Wittmann F.H., Roelfstra P., *Total deformation of loaded drying creep*, Cement and Concrete Research, Vol. 10, 1980, pp. 601-610.
88. Granger L., *Comportement différé du béton dans les enceintes de centrales nucléaires. Analyse et modélisation*, Thèse de doctorat de l'ENPC, Avril 1996.
89. Neville A.M. and Brooks J.J., *Concrete Technology*, copublished in the united states with John Wiley, Longman group UK limited 1987.
90. Zdeněk, Š. and Vladimír, K., *Creep and shrinkage of concrete elements and structure*, Development in Civil Engineering, 21. Elsevier Science Publishers 1988.
91. Wittmann F.H., *Interaction of hardened cement paste and water*, Journal of American ceramic Society, Vol. 56, N° 8, 1973, pp. 409-415.
92. Troxell G.E. Raphael J.M. and David R.E., *long-time creep and shrinkage tests of plain and reinforced concrete*. proc. ASTM.55, 1958, pp. 1101-1121.
93. Venuat, M., *Ciment et bétons. Le point des connaissances actuelles*, Paris. 2^{eme} edition. 1973.
94. Marechal J.C., *le fluage du béton en fonction de la température*. Materials and structures Vol. 2 N°8, 1969, pp 111-126.
95. HENRY T., *Le béton précontraint aux états limites* 91, Presses de l'école nationale des ponts et chaussées. 1992.
96. Li Z., *Effective creep Poisson's ratio for damaged concrete*, International Journal of Fracture, Vol. 66, 1994, pp. 189-196.
97. L'Hermite, R., *What do we know about plastic deformation and creep concrete*. RELEM bulletin, N° 1. Paris, March 1959, pp. 21-26.
98. Bentalha M., *Influence de l'introduction de fibres métallique sur le comportement différé d'une matrice cimentaire. Caractérisation – Comportement – monotone – Microstructure*. These de doctorat. Université Mentouri, Constantine, 2007.

99. Rouse JM, Billington S., Creep and shrinkage of high-performance fiber-reinforced cementitious composites. *Materias Journal*, Vol 104, N°2, 2007, pp 129-136.
100. Bissonnette B, and Pigeon M., *Tensile creep at early ages of ordinary sulicafume and fiber reinforced concretes*, *Cement and concrete Research*, Vol. 25, N°5, 1995, pp. 1075-1085.
101. Huet C., Acker P., Baron J., *Fluage et autres effets rhéologiques différées du béton*, dans « Le béton hydraulique », Paris, Presse de l'École Nationale des Pont et Chaussées, 1982.
102. Tazawa et Yonekura., Drying shrinkage and creep of concrete with condensed silise furne, in fly Ash Silica furne and Natural pozzoslans in concrete, proceeding second international conference , 1986, SP 91, pp. 903-921.
103. DE Larrard F, et Mallier Y., propriétés constructives des bétons à très hautes performances. *Annale I.T.B.T.P N° 479*, Dec 1989, pp. 77-108.
104. Leemann A, Lura P, Loser R., *Shrinkage and creep of SCC – The influence of paste volume and binder composition*. *Construction and Building Materials*, Vol. 25, 2011, pp. 2283–2289.
105. Melbouci B et Sliwinski J., *Influence de certains adjuvants sur les propriétés du béton de terre stabilisée*, *Annale ITBTP N° 508*. Nov 1992, pp. 61-85.
106. RILEM TC-69 1988a., RILEM Committee chairman and symposium chairman. *Fourth RILEM International Conference on Creep and Shrinkage of Concrete*, ed. By Z.P. Bazant.
107. Almanaseer A and Lam J.P., *Statical Evaluation of shrinkage and creep models*. *ACI materials journal*. Vol. 102, No 3, May-June 2005.
108. Mokarem D.W, Weyers R, Lane D.S., *Development of shrinkage performance specifications and prediction model analysis for supplemental cementitious material concrete mixtures*. *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, 2005, pp. 918-925.
109. Mazloom M, Remezaniapour A.A, Brooks J.J., *Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete*. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 26, 2004, pp. 347-357.

110. MacDonald D.B, and Roper, H., *Accuracy of prediction models for shrinkage of Concrete*; *ACI Materials Journal*, Vol. 90, N° 3, 1993, pp. 265-271.
111. Suksawang N and Nassif H.H., *Effect of modulus of elasticity on creep prediction of high strength concrete prediction of high strength concrete containing pozzolans. Shrinkage and creep on concrete.*, SP, Vol. 227, May 2005 . pp. 261-284.
112. Paumsen M.W, Alexander S.D.B, Rogowsky., *Estimating time-dependent déformation of prestressed elements: accuracy and variability. Shrinkage and creep of concrete.* Editors; Gardner N.J and Weiss J. ACI, May 2005, SP, pp. 227-238.
113. ACI Committee 209-92., *Prediction of creep and shrinkage*, ACI Manual of concrete Practice ; Part I ; Materials and General Properties of concrete , 2004.
114. Muller, H.S. and Hillsdorf, H.K., *Evaluation of the Time Dependent Behavior of Concrete*, CEB Bulletin d'information, N° 199, 1990, pp. 290.
115. CEB-FIP., *International Recommendations for the Design and Construction of Concrete Structured*, Cement and Concrete Association, 1970, pp. 88.
116. CEB-FIP., *CEB-FIP Model Code for Concrete Structures*, CEB Bulletin d'information, N° 124/125, 1978, pp. 348.
117. Bazant, Z.P. and Baweja; S., *Short form of Creep and Shrinkage Prediction Model B3 for Structures of medium sensitivity*, Materials and Structures; Vol. 29, 1996, pp. 587-593.
118. Bazant, Z. and Panula, L., *Practical prediction of time –dependent deformations of concrete: Part I – Shrinkage*”, Materials and structures, Vol. 11, N° 65, 1978, pp. 307-316.
119. Bazant Z.P and Pannula L., *Practical Prediction of Time Dependent Deformation of Concrete*, Materials and Structures, Parts I-VI, N° 11, 1978, pp. 307-434.
120. Gardner N.J, and Lockman MJ., *Design Provisions for Drying Shrinkage and Creep of Normal-Strength Concrete*”, *ACI Materials Journal*, Vol. 98, No 2; 2001, pp. 159-167.
121. Saporta Gilbert., *Probabilité, analyse des données et statistique, estimation*, Edt 3 Technip, Paris (France) 2006.
122. Bazant, Z. and Carol, I. (1993). “Creep and Shrinkage of concrete”, *Proceeding of the fifth international RILEM Symposium*, Barcelona, Spain, pp. 318-815.

123. Young .J. F., Physical mechanisms and their mathematical descriptions. In Mathematical modeling of creep and shrinkage of concrete. Edited by Bazant, Z. P., RILEM and NSF, Wiley & Sons Ltd. 1988.
124. Bazant Z. P., Prediction of concrete creep and shrinkage: past, present and future, Nuclear Engineering Design, Vol. 203, 2001, pp. 27-38.
125. Al-Manaseer, A., and Ristanovic, S., Sensitivity of the models for predicting shrinkage of concrete. In: Shrinkage and Creep of Concrete; Editors Gardner, N.J. and Weiss; ACI, Vol. 227, N°3; pp. 41-66.
126. Bazant, Z. P, and Li, G-H,. Database on Concrete Creep and Shrinkage, Infrastructure Technology Institute (ITI), Northwestern University, Evanston, IL, 2008, <http://www.iti.northwestern.edu/research/completed/bazant/shrinkage.html>.
127. Jeffrey J. Thomas., H. M. Jennings., A colloidal interpretation of chemical aging of the C-S-H gel and its effects on the properties of cement paste, cement and concrete research, Vol. 36, N° 1 , 2006, pp 30-38.
128. Ma B.G., Wen X.D., Wang M.Y., Yan J.J. and Gao X.J., Drying Shrinkage of cement-Based Materials under condition of constant temperature and varying humidity, Journal of China University of Mining and technology, Vol. 17, N° 3, 2007, pp. 428-431.
129. Aly, T., Sanjayan J.G. Mechanism of early age shrinkage of concretes, Materials and structures, Vol. 42, N° 4, 2008, pp. 461-468.
130. Alverado, A.M., Helbling A. and Wittmann F.H., Drying shrinkage and crack formation. Building Materials reports N°5. ETH Laboratory for building materials 1994.
131. Sanjayan J.G, Sioulas B., Strength of slag-cement concrete cured in place and in other condition, ACI Materials journal, Vol. 97, 2000, pp. 603- 611.
132. Wittmann, F. H. Deformation of Concrete at variable Moisture Content, In Mechanics of Geomaterials. Chapter 19, Edited by Bazant, Z., John Wiley. 1985, pp. 425-459.
133. ACI Committee 308R-01: Guide to Curing Concrete, American concrete institute, 2001, 31p.
134. Kim J...J, Lee C.S., Prediction of differential drying shrinkage in concrete, cement and concrete research, Vol. 28, N°7, 1998, pp. 985-994.
135. Khatib J M., low curing temperature of metakaolin concrete, Materials in civil engineering journal, American Society of civil engineers (ASCE), Vol. 21, N° 8, 2009, pp. 362-367.

136. Ghrici M, Kenai S, Meziane E., Mechanical and durability properties of cement mortar with Algerian natural pozzolana, *Journal of materials science*, Vol. 41, N°21, 2012, pp. 6965 - 6972.
137. Menadi B, Kenai S, Katib J M, Ait-Mokhtar A, Strength and durability of concrete incorporating crushed limestone sand., *Construction and building materials journal*, Vol. 23, N°2, 2009, pp. 625-633.
138. Khatib J M., Kayali O, Siddique R., Strength and dimensional stability of cement-fly ash-metakaolin morta., *Materials in civil engineering journal*, American Society of civil engineers (ASCE), Vol. 21, N° 9, 2009, pp. 523-528.
139. NF EN 933-1, « Essai pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 1: Détermination de la granularité. Analyse granulométrique par tamisage », AFNOR. 1997,
140. NF EN 933-8, « Essai pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 8: Evaluation des fines. Equivalent de sable», AFNOR. 1999,
141. NF EN 1097-6, « Essai pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 6: Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau », AFNOR. 2001.
142. NF EN 1097-3 « Essai pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 3: Méthode pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité intergranulaire», AFNOR. 1998.
143. NF EN 196-3, « Méthode d'essais des ciments. Partie 3 : Détermination du temps de prise et de la stabilité ». AFNOR. Avril 2006.
144. NF EN 12350-2, Essai pour béton frais. Partie 2 : Essai d'affaissement » AFNOR. Octobre 2008.
145. NF EN 12390-3, « Essai pour béton durci. Partie 3 : Résistance à la compression des éprouvette » AFNOR. 2003.
146. NF EN 12504-4, « Essai pour béton dans les structures. Partie 4 : Détermination de la vitesse de propagation du son» AFNOR. 2005.
147. Hanehara S, Yamada K., Interaction between cement and chemical admixture from the point of cement hydration, adsorption behavior of admixture, and paste rheology, *Cement and concrete Research* , Vol.29, 1999, pp. 1159-1165.
148. Uchikawa H, Hanehara S, Shirasaka T, Sawaki D. Effect of admixture on hydration of cement, adsorption behavior of admixture, and fluidity and setting of

- fresh cement paste, *Cement and Concrete Research*, Vol. 22, 1992. pp. 1115-1129.
149. Gagne R, Boisvert A, Pigeon M. Effect of superplasticizer dosage on mechanical properties, permeability and freeze-thaw durability of high-strength concrete with and without silica fume. *ACI Materials Journal*, Vol. 93, 1996, pp. 111-120.
 150. Durekovic A. Cement pastes of low water to solid ratio: an investigation of the porosity characteristics under the influence of a superplasticizer and silica fume, *Cement and Concrete Research*, Vol.25, 1995, pp. 365-375.
 151. Morin V, Cohen Tenoudji .F, Feylessoufi A, Richard P. Superplasticizer effects on setting and structuration mechanisms of ultrahigh-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, 2001, pp. 63-71.
 152. Mor A, Mehta PK. Effect of superplasticizing admixtures on cement hydration. *Cement and concrete Research*, Vol. 14, 1984, pp. 754-756.
 153. El-Gamala S.M.A, Al-Nowaiserb F.M, Al-Baityb A.O. Effect of superplasticizers on the hydration kinetic and mechanical properties of Portland cement pastes. *Journal of Advanced Research*, 2012. Vol. 3, pp. 119–124.
 154. Ghosh RS, Malhotra VM. Use of superplasticizer as water reducers. *Cement Concrete and aggregates*, Vol.1, 1979, pp. 56-63.
 155. Singh NB, Sarvahi R, Singh NP. Effect of superplasticizers on the hydration of cement. *Cement and Concrete Research*, Vol. 22, 1992, pp. 725-735.
 156. Bouzoubaâ N, Zhang M H, Malhotra V M. Superplasticized portland cement: production and compressive strength of mortars and concrete. *Cement Concrete Research*, Vol. 28, 1998, pp. 1783–1796.
 157. Puertas F, Santos H, Palacios M, Martinez Ramirez S. Polycarboxylate superplasticizer admixtures: effect on hydration, microstructure and rheological behaviour in cement pastes. *Advanced Cement Research*, Vol.17, 2005, pp. 77–89.
 158. N. Mikanovic. Intéraction superplastifiant-ciment durant l'hydratation initiale. *Mémoire de Maitrise*, Université de Sherbrooke, Canada, 2001.
 159. Zingg A, Winnefeld F, Holzer L, Pakusch J, Becker S, Figi R, Gauckler L. Interaction of polycarboxylate-based superplasticizers with cements containing different C3A amounts. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 31, 2009, pp. 153-162.
 160. Collepardi. M., *Chemical Admixtures Today*. Enco, Engineering concrete, Ponzano Veneto, Italy, 2005, pp. 527-541.

161. Zemirline S. Etude de l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés rhéologique d'un béton fluide (Autoplaçant), Mémoire de Magister, Université de Médéa. 2008.
162. L. Ferrari, J. Kaufmann, F. Winnefeld, J. Plank. Reaction of clinker surfaces investigated with atomic force microscopy. *Construction and Building Materials*, Vol 35, 2012, pp. 92-96.
163. Trtnik G, Kvcic F, Turk G. Prediction of concrete strength using ultrasonic pulse velocity and artificial neural networks, *Ultrasonic*, Vol. 49, 2009, pp. 53-60.
164. Ohdaira E, Masuzawa N. Water content and its effect on ultrasound propagation in concrete – the possibility of NDE, *Ultrasonic*, Vol. 38, 2000, pp. 546-552.