

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة حسيبة بن بوعلي
Université Hassiba Benbouali de Chlef
كلية الهندسة المدنية و المعمارية
Faculté de Génie civil et d'Architecture
قسم الهندسة المدنية
Département de Génie Civil

Mémoire

De Magister

Spécialité : Génie Civil

Option : Structure et Matériaux

Présenté par:

KEHLI Ahmed

Ingénieur en Génie civil

*Quantification de l'effet d'échelle entre les propriétés
mécaniques et la dessiccation du béton*

Soutenu publiquement le : 23 Octobre 2012

Devant le jury composé de :

Kadri Abdelkader	Professeur	UHB Chlef	Président
Ezziane karim	Maître de conférences A	UHB Chlef	Rapporteur
Boukandakji Othman	Maître de conférences A	U. Médéa	Examineur
Debièb Farid	Maître de conférences A	U. Médéa	Examineur
Bougara Abdelkader	Maître de conférences A	UHB Chlef	Examineur

Promotion : 2012

Remerciements

D'abord louange à Allah qui nous a donné le courage et la patience afin de terminer ce travail.

J'exprime ma profonde reconnaissance à mon directeur de thèse monsieur Ezziane Karim pour sa disponibilité, ses précieux conseils, ses interventions et l'intérêt qu'il a porté à ce travail.

Mes vifs remerciements s'adressent à monsieur Kadri Abdelkader, professeur à l'université de CHLEF, d'avoir accepté de présider ce jury.

Mes remerciements s'adressent également à messieurs : Dr Boukandakji Othman, Dr Debièb Farid et Dr Bougara Abdelkader d'avoir accepté d'examiner cette thèse.

Je tiens à remercier le professeur Ghrici Mohammed pour ses précieux conseils tout au long de notre formation.

J'adresse mes remerciements aux responsables de laboratoire de génie civil et d'hydraulique pour leurs disponibilités durant la campagne expérimentale de cette étude.

Je voudrais également remercier les responsables de l'entreprise canadienne SNC LAVALIN de leur compréhension pendant nos absences de travail et l'entreprise chinoise CRCC pour son aide et la fourniture des matériaux employés dans la partie expérimentale de cette étude.

Mes remerciements s'adressent particulièrement à Yen Fa Trong ingénieur au sein de CRCC.

J'adresse également mes vifs remerciements à ma famille et surtout ma petite fille « Asma ».

Résumé :

Les résultats expérimentaux disponibles dans la littérature indiquent que la résistance nominale est dépendante de la taille des éprouvettes des matériaux à matrices cimentaires, cependant, les propriétés de ces matériaux dépendent elles-mêmes de sa composition et de son environnement dans lequel ces propriétés s'évaluent, d'où la nécessité de comprendre le comportement de ces matériaux entre l'effet d'échelle et les différents paramètres qu'ils les affectent. Les résultats obtenus permettent de conclure que l'effet d'échelle sur les résistances mécaniques est plus significatif avec les ciments au calcaire. De plus, en allant de la plus petite taille vers la plus grande, un béton mis sous une cure à l'eau présente un effet d'échelle plus important. Les résultats d'effet d'échelle sur le retrait indiquent que le retrait libre est inversement proportionnel à la taille des éprouvettes ; les éprouvettes de taille plus faible présentent des retraits plus importants. L'effet de type de ciment observé est négligeable lorsqu'on compare les retraits enregistrés entre les différentes tailles d'éprouvettes.

Mots clés : *béton, résistance, retrait, dessiccation, effet d'échelle*

Abstract:

In the case of cementitious materials, the experimental results available in the literature indicate that nominal strength is dependent on the size of the specimens. However, the properties of these materials depend themselves on their composition and their environment in which these properties are developed, from where need for including/understanding the behaviour of these materials between the size effect and the various parameters that they affect. The results obtained make it possible to conclude that the size effect on the mechanical strength is more significant with cements with limestone . Moreover, while going from the smallest size towards largest, a concrete capped under water presents a more significant size effect. The results of scale effect on the shrinkage indicate that the free shrinkage is inversely proportional to the specimen's size; small specimens present more significant shrinkage. The effect of the type of cement observed is negligible when one compares the shrinkage recorded between the various sizes of specimens.

Key words: *concrete, resistance, shrinkage, desiccation, scale effect*

ملخص :

تعد ظاهرة نقصان مقاومة العناصر للاجهاد الضغطي عندازدياد حجمها من بين خصائص المواد الصلبة ، بالنسبة للخرسانة، تدل النتائج التجريبية على أن المقاومة الحدية على علاقة بحجم العناصر حيث أن هذه الاخيرة تتناقص عند ازدياد حجمها، و بما ان مقاومة هذه المواد مرتبطة بخصائصها التكوينية و حرارة ورطوبة الجو الذي تكسب فيه مقاومتها، من هذا المنطلق تأتي هذه الدراسة لتطيف بعضا من النتائج التجريبية حول تأثير مكونات الخرسانة خاصة النسبة اسمنت /ماء و تأثير الجو على ظاهرة نقصان المقاومة و انكماشها لما يزداد حجم العناصر المضعوفة

Liste des figures	page
Figure 1.1 évolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des Mortiers contenant le calcaire.	16
Figure 1.2. Influence de la pouzzolane sur la résistance à la compression.	17
Figure 1.3 : Influence du rapport E/C sur la résistance à la rupture en compression simple du béton à différentes échéances.	18
Figure 1.4 redistribution des contraintes dans la fissure selon la théorie de Bazant (1984)	21
Figure 1.5 : variation de la résistance de flexion du béton.	22
Figure 1.6 : forme d'éprouvette employée.	23
Figure 1.7. Diagramme contrainte déformation.	23
Figure 1.8 : effet d'échelle sur la résistance en compression.	24
Figure 1.9 : Effet d'échelle sur le béton de poudre.	25
Figure 1-10 : influence de l'effet d'échelle sur les déformations du retrait dans deux Environnements différents	27
Figure 2.1 : Courbe granulométrique du sable et gravier.	35
Figure 2.2 : Malaxeur à béton de capacité 100 litres.	36
Figure 2.3 : Dimension des éprouvettes cubiques utilisées.	37
Figure 2.4. Prismes en béton pour mesurer le retrait libre.	37
Figure 2.5: dimensions des prismes utilisés.	38
Figure 2.6 presse hydraulique pour essai de compression.	38
Figure 2.7: Prismes pour mesurer de retrait.	39
Figure 3.1 : Résultats d'affaissement des différents bétons testés.	44
Figure 3.2: Evolution des résistances à la compression des bétons confectionné par le ciment C1 et C2 (cure=eau).	45
Figure 3.3: Evolution des résistances à la compression des bétons en fonction du rapport E/C pour différents âges (cure à l'eau).	46
Figure 3.4: Evolution des résistances à la compression des bétons en fonction du rapport E/C pour différents âges (exposé à l'air).	46
Figure 3.5 : histogramme des résistances pour les deux types de ciments.	47
Figure 3.6 : Gain de résistance entre une cure sous l'eau et à l'air libre d'un béton à base de ciment C1.	48
Figure 3.7 : Gain de résistance entre une cure sous l'eau et à l'air libre d'un béton à base de ciment C2.	48
Figure 3.8 : Evolution du retrait total pour deux éprouvettes de 10 cm et E/C=0.5 à base du ciment C1.	49
Figure 3.9 : Evolution du retrait total pour deux éprouvettes de 10 cm et E/C=0.5 à base du ciment C2.	49

Figure 3.10 : Variation du retrait pour chaque éprouvettes (ciment C1, E/C=0.5).	50
Figure 3.11 : Variation du retrait pour chaque éprouvettes (ciment C2, E/C=0.5).	50
Figure 3.12 : Comparaison des retraits libres des deux types de ciments en fonction du rapport E/C.	51
Figure 3.13 : Evolution du retrait à base du ciment C1 pour différents rapports E/C.	52
Figure 3.14 : Evolution du retrait à base du ciment C2 pour différents rapports E/C.	52
Figure 3.15 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la taille des cubes (ciment C1, E/C=0.5).	53
Figure 3.16 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la taille des cubes (ciment C2, E/C=0.5).	54
Figure 3.17 : Effet du type de ciment sur l'effet d'échelle en compression sous une cure humide. (t=28 jours, E/C=0.5).	55
Figure 3.18 : Effet du type de ciment sur l'effet d'échelle en compression sous une cure à l'air libre. (t=28 jours, E/C=0.5).	55
Figure 3.19 : Evolution des déformations du retrait libre d'un béton à base de ciment au calcaire (C1) pour différentes dimensions d'éprouvettes.	56
Figure 3.20 : Evolution des déformations du retrait libre d'un béton à base de ciment pouzzolanique (C2) pour différentes dimensions d'éprouvettes.	57
Figure 3.21 : Variation de la valeur du retrait en fonction de la taille des éprouvettes d'un béton à base de ciment C1.	57
Figure 3.22 : Variation de la valeur du retrait en fonction de la taille des éprouvettes d'un béton à base de ciment C2.	58
Figure 3.23 : Comparaison de l'effet d'échelle sur le retrait entre les deux ciments	58
Figure 4.1 : Comparaison des résistances à la compression d'un béton conservé dans l'eau et à l'air libre pour le ciment C1 avec différents rapports.	61
Figure 4.2 : Corrélation des résistance à la compression d'un béton conservé à l'air libre en fonction de celles d'un béton conservé dans l'eau et pour le ciment.	62
Figure 4.3 : Comparaison des résistances à la compression d'un béton conservé dans l'eau et à l'air libre pour le ciment C2 avec différents rapports E/C.	63
Figure 4.4 : Corrélation des résistances à la compression d'un béton conservé à l'air libre en fonction de celles d'un béton conservé dans l'eau et pour le ciment C2.	64
Figure 4.5 : Variation des résistances du béton conservé à l'air libre en fonction de celles du béton conservé dans l'eau pour divers rapport E/C et les deux types de ciments.	65
Figure 4.6 : Variation des résistances du béton conservées à l'air libre en fonction de celles du béton conservées dans l'eau pour divers âges du béton et les deux types de ciments.	66

Figure 4.7 : Corrélation des résistances à la compression du ciment C1 selon le modèle de Féret pour une cure sous l'eau .	68
Figure 4.8 : Corrélation des résistances à la compression du ciment C1 selon le modèle de Féret pour une cure à l'air libre.	68
Figure 4.9 : Evolution du coefficient Kf pour le ciment C1 suivant les deux types de cure.	68
Figure 4.10 : Corrélation des résistances à la compression du ciment C2 selon le modèle de Féret pour une cure sous l'eau .	69
Figure 4.11 : Corrélation des résistances à la compression du ciment C2 selon le modèle de Féret pour une cure à l'air libre.	69
Figure 4.12 : Evolution du coefficient Kf pour le ciment C1 suivant les deux types de cure.	69
Figure 4.13 : Variation du retrait des éprouvettes en fonction de celui avec E/C=0.55.	70
Figure 4.14 : Variation du coefficient a en fonction de la réduction de E/C.	70
Figure 4.15: Variation du retrait des éprouvettes en fonction de celui avec E/C=0.55.	71
Figure 4.16: Variation du coefficient a en fonction de la réduction de E/C.	71
Figure 4.17: Variation des résistances mécaniques en fonction de la taille des éprouvettes pour un béton à base de ciment C1 conservé dans l'eau .	72
Figure 4.18: Variation des résistances mécaniques en fonction de la taille des éprouvettes pour un béton à base de ciment C1 conservé dans	73
Figure 4.19: Variation du coefficient c1 en fonction du temps (ciment C1).	73
Figure 4.20: Variation du coefficient c0 en fonction du temps (ciment C1) .	74
Figure 4.21: Variation des résistances mécaniques en fonction de la taille des éprouvettes pour un béton à base de ciment C2 conservé dans l'eau.	74
Figure 4.22: Variation des résistances mécaniques en fonction de la taille des éprouvettes pour un béton à base de ciment C2 conservé dans l'air.	75
Figure 4.23: Variation du coefficient c1 en fonction du temps (ciment C2) .	75
Figure 4.24: Variation du coefficient c0 en fonction du temps (ciment C2).	75
Figure 4.25: Variation du retrait libre en fonction de la taille des éprouvettes pour un béton à base de ciment C1 conservé dans l'air.	76
Figure 4.26: Variation du retrait libre en fonction de la taille des éprouvettes pour un béton à base de ciment C2 conservé dans l'air	77
Figure 4.27: Variation du coefficient a de la formule donnant l'effet d'échelle du retrait.	77
Figure 4.28 : Variation du coefficient b de la formule donnant l'effet d'échelle du retrait.	78

Liste des tableaux	page
Tableau 1.1: Durée approximative pour le séchage du béton.	22
Tableau 1-2 effet d'échelle sur la densité des fissures d'une pâte de ciment durci.	27
Tableau 2.1 : Caractéristiques chimiques des ciments employés.	32
Tableau 2.2 : Caractéristiques physiques du sable utilisé.	32
Tableau 2.3 : Résultats de l'analyse granulométrique du sable utilisé.	33
Tableau 2.4 : Résultats de l'analyse granulométrique du gravier utilisé.	33
Tableau 2.5 : paramètres d'essais.	34
Tableau 2.6: Composition des bétons testés.	35
Tableau 3.1 : Résultats de l'essai d'affaissement des différents bétons.	43
Tableau 4.1 : Résultats de la corrélation des résistances à la compression par la loi de Ferret.	67

Remerciements	
Résumé	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Sommaire	

Introduction générale	11
-----------------------------	----

Chapitre I : Effet d'échelle sur les propriétés du béton

1.1. Introduction.....	15
1.2. Résistance à la compression du béton.....	15
1.2.1. Type de ciment.....	15
1.2.2. Effet de calcaire	15
1.2.3. Effet de la pouzzolane.....	16
1.2.4. Effet du rapport E/C.....	17
1.3. Retrait de dessiccation des bétons.....	18
1.3.1. Effet du rapport E/C.....	18
1.4. Notion d'effet d'échelle	19
1.4.1. Historique de l'effet d'échelle	19
1.4.2. Théories de base.....	20
1.4.3. Travaux pertinents sur l'effet d'échelle	22
1.4.3.1. Effet d'échelle sur la résistance des bétons ordinaire	22
1.4.3.2. Effet d'échelle sur les bétons de haute performance	23
1.4.3.4. Effet d'échelle sur le module élastique.....	25
1.4.3.5. Effet d'échelle sur le retrait du béton.....	25
1.5. Conclusion	28

Chapitre II : Etude expérimentale

2.1. Introduction.....	30
2.2. Programme expérimental	30
2.2.1. Matériaux utilisés.....	31
2.2.1.1. Ciment.....	31
2.2.1.2.. Sable.....	32
2.2.1.3. Gravier	33
2.2.1.4. Eau de gâchage	34
2.2.1.5. Adjuvant organique.....	34
2.2.2. Paramètres étudiés	34
2.2.3. Formulation du béton.....	35
2.3. Procédure de fabrication du béton	36
2.3.1. Confection des éprouvettes de compression	37
2.3.2. Confection des prismes de retrait de dessiccation	37
2.4. Conservation des éprouvettes	38
2.5. Principe de l'essai de compression	39
2.6. Principe de mesure des déformation du retrait	39
2.7. Période d'essai	41
2.8. Conclusion	41

Chapitre III : Présentation des résultats

3.1. Introduction.....	43
3.2. Ouvrabilité du béton	43
3.3. Résistance à la compression.....	44
3.3.1. Effet du type de ciment.....	44
3.3.1. Effet du rapport E/C.....	45
3.3.2. Effet de la cure	47
3.4. Retrait libre	49
3.4.1. Reproduction des essais	50
3.4.2. Effet du type de ciment.....	50
3.4.3. Effet du rapport E/C.....	51
3.5. Effet d'échelle.....	53
3.5.1. Résistance à la compression.....	53
3.5.2. Retrait libre	56
3.6. Conclusion	59

Chapitre IV : Analyse et discussion des résultats

4.1. Introduction.....	61
4.2. Effet de la cure sur les résistances mécaniques	61
4.2.1. Ciment de Chlef C1	61
4.2.2. Ciment de Zahana C2.....	62
4.3. Effet du rapport E/C.....	64
4.4. Effet de l'âge.....	65
4.5. Modèle de Féret	66
4.6. Résultats du retrait	70
4.7. Effet d'échelle.....	72
4.7.1. Résistance à la compression.....	72
4.7.2. Retrait libre.....	76
4.8. Conclusion	78

Conclusion générale	80
----------------------------------	-----------

Références bibliographiques.....	82
---	-----------

Introduction générale

Introduction générale

Depuis le 20^{ème} siècle, le béton est à l'heure actuelle le matériau de construction le plus utilisé, il se classe en deuxième rang mondial parmi les produits les plus consommés après l'eau potable. L'acquisition de sa résistance est l'une de ses principales propriétés, néanmoins, d'autres propriétés sont également importantes tel que sa résistance à la traction, son module d'élasticité et sa durabilité.

Compte tenu de ses bonnes propriétés mécaniques et ses avantages de mise en œuvre, le béton est largement utilisé dans les travaux modernes. Dès lors que les structures sont mises en œuvre, ils subissent des sollicitations d'origines diverses, par exemple, les sollicitations externes, des changements thermiques et hygrométriques et des effets chimiques. La dessiccation est l'une des sollicitations que subit le béton dès sa mise en place est qui conduit à des variations dimensionnelles et structurelles affectant ainsi les propriétés mécaniques du matériau et sa durabilité à long terme. En effet, la dessiccation provoque une migration de l'eau libre causant ainsi une contraction ou un retrait qui est la principale cause des microfissurations.

Le problème d'effet d'échelle qui présente le plus grand intérêt en mécanique des solides est celui de l'effet de la taille d'une structure sur sa résistance. Dans le cas des matériaux à matrices cimentaires, les résultats expérimentaux disponibles dans la littérature indiquent que la résistance nominale est dépendante de la taille des éprouvettes, cependant, les propriétés de ces matériaux dépendent elles-mêmes de leur composition et de leur environnement dans lequel ses propriétés s'évaluent, d'où la nécessité de comprendre le comportement de ces matériaux entre l'effet d'échelle et les différents paramètres qu'ils les affectent. Du fait qu'on construit des éléments et des structures en béton de formes et de tailles différentes, il est nécessaire de connaître l'effet de la taille des éprouvettes en béton sur les résistances et la dessiccation.

L'objectif de ce mémoire vise à évaluer l'influence de l'effet d'échelle sur la résistance à la compression et le retrait de dessiccation d'un béton ordinaire en mettant à l'épreuve certains paramètres tel que :

- Le type de l'ajout cimentaire (calcaire et la pouzzolane naturelle).
- L'âge du béton.
- Le mode de conservation des éprouvettes (sec et humide).

Dans ce cadre, une étude expérimentale est entreprise, dans laquelle des essais d'écrasement à la compression des éprouvettes de différentes tailles ont été effectués (environ 200 éprouvettes écrasées à 1, 3, 7, 28 et 90 jours), et des mesures de retrait libre ont été prélevés durant une période de 7 mois sur des prismes de différentes dimensions.

Deux compositions de béton ont été choisies, l'une avec un ciment au calcaire de provenance la cimenterie de Chlef et l'autre avec un ciment à la pouzzolane naturelle provenant de la cimenterie de Zahana. Quatre rapports E/C ont été pris dans cette étude (0,4, 0,45, 0,5 et 0,55). Les éprouvettes destinées pour l'essai de compression sont conservées dans deux milieux différents ; le premier est une cure à l'eau, le deuxième c'est le milieu ambiant qui règne au laboratoire.

Ce mémoire est structuré pour répondre aux objectifs visés et il est composé comme suit :

Le premier chapitre comporte une étude bibliographique, elle constituera une base de connaissance bien utile pour le problème étudié. D'abord on examine quelques facteurs influant les résistances mécaniques et le retrait du béton tel que le rapport E/C et l'ajout cimentaire (pouzzolane ou calcaire) , puis une brève revue sur les résultats des études récentes relatives au problème de l'effet d'échelle est présentée.

Le deuxième chapitre décrit la campagne expérimentale entreprise où on présente un détail des caractéristiques des matériaux employés et les compositions des différents bétons. Ceci est suivi par une description des conditions de conservation des éprouvettes et du déroulement des essais effectués.

Le troisième chapitre présente les différents résultats d'essais. Les résultats de la résistance à la compression et du retrait de dessiccation sont illustrés en fonction de l'âge du béton, de type de ciment, du rapport E/C ainsi que le mode de cure.

Le dernier chapitre correspond à l'analyse des résultats obtenus. Pour ce faire, les paramètres de l'étude ont été examinés individuellement, puis une corrélation entre les différents paramètres a été déterminée.

Enfin, ce travail est achevé par une conclusion générale regroupant les principaux résultats de cette étude ainsi que des recommandations pour de futures recherches.

Chapitre I

Effet d'échelle sur les propriétés du béton

1.1. Introduction

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé au monde. Il est habituellement constitué de ciment Portland, de sable, des gros granulats et d'eau. C'est un matériau qui évolue continuellement dans le temps, depuis le début de sa fabrication et dès qu'il y a contact entre l'eau et les autres composants. Le composant le plus réactif au premier contact de l'eau est le ciment anhydre. C'est l'hydratation du ciment qui fait passer le béton de l'état plastique à l'état solide, en espace de quelques heures [1].

1.2. Résistance à la compression du béton

La résistance à la compression du béton est généralement considérée comme sa plus importante propriété bien que, dans de nombreux cas pratiques d'autres caractéristiques telles que la durabilité et la perméabilité peuvent en fait être plus importantes. Néanmoins, la résistance à la compression projette généralement une image globale de la qualité d'un béton puisqu'elle est directement reliée à la structure [2].

Plusieurs facteurs affectent cette propriété d'où on peut citer

1.2.1. Type de ciment

On peut fabriquer des bétons en utilisant seulement du ciment Portland. Cependant la substitution partielle d'une certaine quantité de ciment par un ou plusieurs ajouts minéraux lorsqu'ils sont disponibles à des prix compétitifs peut être avantageuse, non seulement du point de vue économique, mais aussi du point de vue rhéologique et parfois du point de vue résistance et durabilité.

Selon la norme ENV 206 [3], les ajouts minéraux dans le ciment sont classés en deux catégories ; les ajouts inertes et les ajouts actifs. Parmi les ajouts inertes on distingue les fillers calcaires et la poussière, ils servent à remplir les pores de la pâte de ciment en améliorant ainsi les propriétés physiques (ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau). Dans la gamme des ajouts cimentaires actifs, on distingue ; la pouzzolane naturelle, la fumée de silice, les cendres volantes...etc.

1.2.2. Effet de calcaire

Les différents résultats montrent que les fillers calcaires ajoutés à un CPA peuvent jouer plusieurs rôles :

- Un rôle de remplissage en substitution du ciment dans les éléments fins de la courbe granulométrique (bétons ouvrables retenant mieux l'eau).
- Un rôle rhéologique par leur pouvoir fluidifiant sur la pâte interstitielle.

- Un rôle chimique et physique conduisant à l'accélération de l'hydratation du C3S et du C3A
- Un rôle physique en permettant un arrangement initial différent ce qui réduit l'épaisseur entre la pâte et le granulat.

La figure 1.1 montre que l'addition de 10% de calcaire donne des résistances comparables à celles obtenues par un ciment portland à l'âge de 28, par contre l'addition de 20% donne des résistances plus faibles.

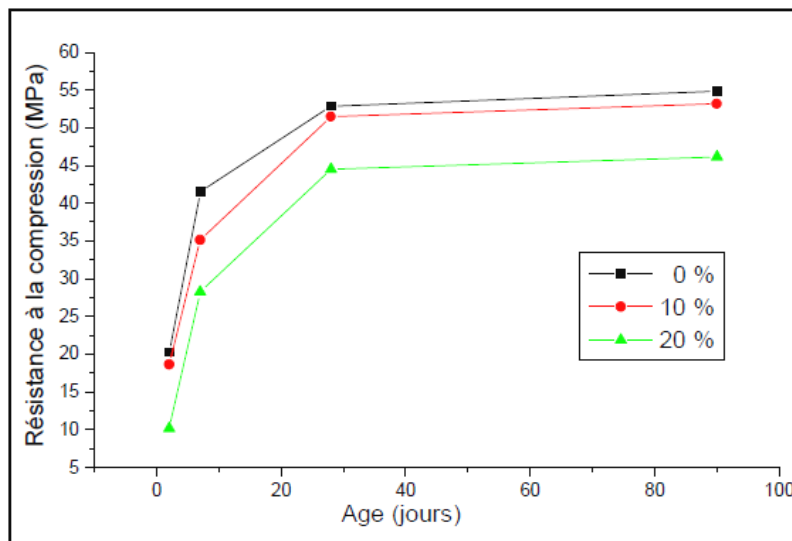


Figure 1.1 évolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge
Des mortiers contenant le calcaire [4].

1.2.3. Effet de la pouzzolane

Les pouzzolanes sont des matériaux, naturels ou artificiels, capables de réagir en présence d'eau avec l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, stables, peu solubles dans l'eau et possédant des propriétés liantes [5].

Les pouzzolanes sont formées surtout d'éléments vitreux. Elles sont plus au moins réactives. La réactivité est l'aspect chimique de fixation de la chaux.

Plusieurs études ont pu montrer l'effet de l'addition de la pouzzolane sur les propriétés du béton et précisément sur sa résistance mécanique.

Erhan Güneyisi et al [6] ont procédé à des essais sur l'effet de l'adition de la pouzzolane et le calcaire sur les résistances mécaniques de différentes compositions de mortier. Selon les résultats d'essai la figure 1.2 indique que l'addition de 11% de calcaire (ciment C2) n'a causé aucun changement important sur la résistance comparativement à la résistance obtenue avec un ciment Portland. Cependant les

mortiers avec le ciment contenant la pouzzolane (ciments C3 et C5) ont des résistances faibles aux jeunes âges, après 28 jours, l'évolution des résistances de ces mortiers était presque identique ou légèrement plus élevée que les autres mortiers de ciment.

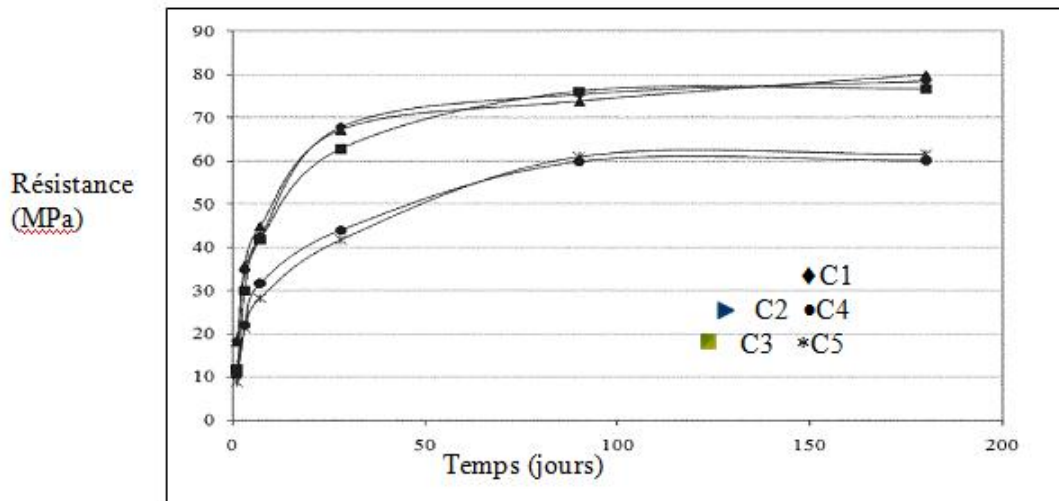


Figure 1.2. Influence de l'addition de pouzzolane sur la résistance à la compression [6].

1.2.4. Effet du rapport E/C

Le rapport eau/ciment (E/C) d'un béton peut représenter le facteur important qui caractérise sa résistance. Plusieurs auteurs ont mis en évidence l'influence du rapport E/C du béton sur sa résistance à la compression

Les travaux de J. Bolomey permettent de déterminer la résistance à la rupture à 28 jours du béton grâce à la formule suivante : [7].

$$\sigma_{28} = G' \sigma'_c \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right)$$

où :

σ'_c est la classe vraie du ciment à 28 jours ;

G' est le coefficient granulaire fonction de la qualité et de la dimension maximale des granulats ;

C et E sont respectivement les dosages en ciment et en eau dans un m³ de béton.

La Figure 1.3 illustre l'augmentation de la résistance du béton en compression simple avec la diminution du rapport E/C [8]

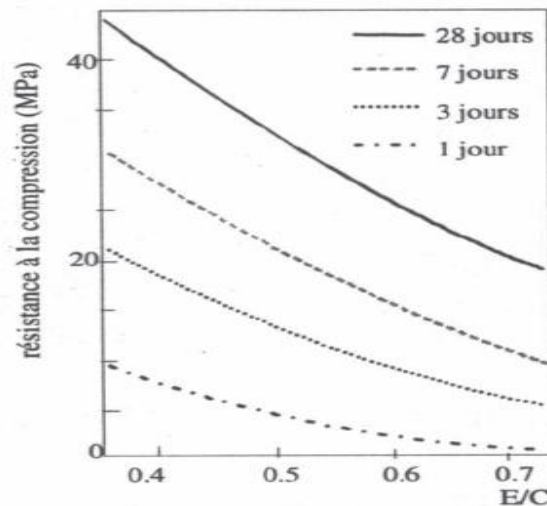


Figure 1-3 : Influence du rapport E/C sur la résistance à la rupture en compression simple du béton à différentes échéances [8]

1.3. Retrait de dessiccation des bétons

Afin d'obtenir un mélange ouvrable, le béton ordinaire contient toujours une quantité d'eau supérieure à celle qui est nécessaire pour l'hydratation du ciment. Par conséquent, au sein du matériau se trouve une quantité d'eau libre qui peut s'évaporer lorsque le matériau est mis en contact avec un milieu dont l'humidité relative est inférieure à celle qui règne dans ce matériau. En effet, le départ de l'eau libre provoque une contraction ou un retrait de dessiccation de la matrice cimentaire. Plusieurs facteurs affectent le retrait de séchage du béton, certains sont liés à la composition initiale du béton, autres sont liés aux conditions environnementales.

1.3.1. Effet du rapport E/C

Si l'on considère uniquement le retrait de la pâte de ciment hydraté, on constate qu'il est d'autant plus grand que le rapport eau/ciment est plus élevé, car ce dernier détermine la quantité d'eau évaporable dans la pâte de ciment et la vitesse à laquelle cette eau peut atteindre la surface de l'éprouvette. Brooks [9] a démontré que le retrait d'une pâte de ciment hydraté est directement proportionnel au rapport eau/ciment lorsque celui-ci reste compris entre 0,20 et 0,60. Pour des rapports eau/ciment plus élevés, l'eau additionnelle disparaît au séchage sans provoquer de retrait.

Bissonnette et al. [10] ont trouvé que l'effet du rapport E/C est minime, en effet, ils ont trouvé que l'augmentation du rapport E/C de 0,35 à 0,5 pour des pâtes de ciment, des mortiers et des bétons, n'a augmenté le retrait libre que de 7 à 10%.

1.4. Notion d'effet d'échelle

La notion d'effet d'échelle en mécanique caractérise la dépendance des performances des matériaux, notamment au voisinage de la rupture, aux différentes dimensions entrant en jeu lors du passage d'une échelle d'étude à une autre [11].

Le problème d'effet d'échelle qui présente le plus grand intérêt en mécanique des solides est celui de l'effet de la taille d'une structure sur sa résistance, notamment dans le cas des matériaux quasi-fragiles (roche, céramique, béton...etc.).

Le matériau quasi-fragile qui a été l'objet des recherches intenses sur la plus longue durée est le béton, la rupture de ce matériau fortement hétérogène est un phénomène très complexe exhibant des effets d'échelle, surtout si elle est associée avec l'effet de la dessiccation qui provoque des retraits induisant des fissurations importantes dans les climats chauds et arides comme notre région « Chlef ».

Les codes universels du béton armé tiennent compte de cet effet, le code américain ACI [12] note que: Les structures géométriquement semblables doivent se caractériser, sous charges ultimes, par des valeurs identiques des contraintes nominales σ_n , à l'opposé, lorsqu'il est constaté une dépendance entre ces valeurs de σ_n et la taille de la structure on dit qu'il y a un effet d'échelle. Deux types d'effet d'échelle sont observés dans les matériaux quasi-fragiles de type bétons : l'effet de volume qui se situe à l'échelle de l'éprouvette du laboratoire et l'effet d'échelle de structure se situant à l'échelle de la structure [13]. .

1.4.1. Historique de l'effet d'échelle

Pendant longtemps, il a été admis que la résistance des structures en béton est indépendante de la taille. Cependant, en raison de certaines études qui ont entrepris des campagnes expérimentales, ils en concluent que le comportement des structures en béton sous différentes actions- (compression, traction, cisaillement ou la torsion) est en grande partie influencé par la taille des spécimens.

Gonnerman [14] a conduit les premières études pilotes sur l'effet d'échelle sur le béton. Il a noté que : les données sur l'effet de la taille et de la forme de spécimen sont disponibles pour la pierre, la maçonnerie etc., mais comparativement peu d'essais ont été effectués sur le béton. Il a alors entrepris une série d'expériences dans lesquelles il a

examiné la résistance à la compression des cylindres des différentes tailles (37.5 mm à 250 mm de diamètre) avec un rapport de hauteur/diamètre égale à deux.

La conclusion finale tirée de ces essais est que pour des cylindres dont la hauteur égale à deux fois le diamètre, des résistances plus faibles ont été généralement obtenues avec les cylindres plus grands. Il a également noté que la diminution de la résistance avec l'augmentation de la taille des cylindres n'était pas importante pour des éprouvettes de diamètre de 15cm (les cylindres de dimensions 20 x 40 cm et 25 x 50 cm ne présentent que des résistances de 96% et 92% par rapport à celles obtenues avec les cylindres de dimension 15x30cm)

Après cette première découverte, l'effet d'échelle fut constitué une partie importante des études sur l'endommagement et la rupture des structures en béton. En effet, les différents types de chargement que doivent subir les structures (compression, flexion, traction ...etc.) ainsi l'évolution de vaste produit du béton (béton ordinaire, béton de haute performance, béton auto plaçant, béton léger.. etc.) ont conduit systématiquement à des recherches approfondies sur les comportements des structures vis-à-vis l'effet d'échelle en faisant introduire des théories issues de l'expérience effectuée au laboratoire sur des échantillons en béton (éprouvettes) ou sur des éléments structuraux réduites (poutres et poteaux)

1.4.2. Théories de base

Plusieurs théories ont été proposées pour expliquer le phénomène de l'effet d'échelle :

1. la théorie statistique de la distribution aléatoire des résistances locales de Weibull (1939).
2. la théorie de Carpinterie (1989) qui concerne le caractère fractal des surfaces de rupture
3. la théorie de Bazant (1984) qui suppose que l'effet d'échelle est dû à la propagation stable des fissures, conjuguée à une redistribution des contraintes et un relâchement de l'énergie emmagasinée engendrée par les fissures. Parmi ces trois théories, la proposition de Bazant est la plus appréciée et largement utilisée en réalité [15].

Théorie de Bazant :

Cette théorie considère une plaque rectangulaire de largeur L_p (figure 1.4) soumise à la contrainte de traction σ_N . La fissure créée est initialement de longueur a_o et est entourée par une zone de rupture FPZ de largeur h . Le développement de cette zone de rupture FPZ va faire diminuer l'énergie de déformation $\sigma_N^2/2E$ sur la partie hachurée (zone d'adoucissement de contraintes), jusqu'à l'annulation [16].

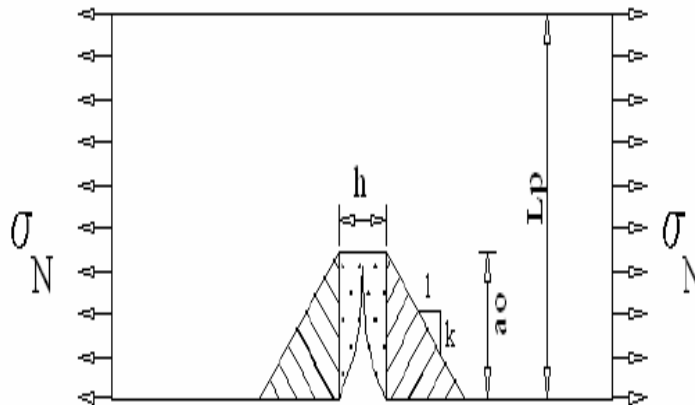


Figure 1-4 redistribution des contraintes dans la fissure selon la théorie de Bazant (1984)

La zone FPZ et la pente k (Figure 1.4) sont indépendantes de la taille de la plaque. Bazant (1984) [16] a proposé la loi d'effet d'échelle suivant :

$$\sigma_N = \frac{B_o \cdot f'_t}{\sqrt{1 + W/d_o}}$$

Où:

σ_N est la contrainte nominale correspondant à la charge ultime P_u .

B_o et d_o sont les paramètres du matériau ne dépendant pas de la taille structurale.

W est la dimension caractéristique de la structure.

f'_t est la résistance en traction du béton.

1.4.3. Travaux pertinents sur l'effet d'échelle

1.4.3.1. Effet d'échelle sur la résistance des bétons ordinaires

Hermite (1973) [17] a noté, qu'en général, la valeur des caractéristiques mécaniques diminue quand la taille des éprouvettes augmente, donc il faut en tenir compte lorsque l'on mesure ces caractéristiques sur des éprouvettes au laboratoire. Un groupe d'éprouvettes "standard" est ainsi défini dans toutes les normes de béton. Les résultats d'essais obtenus sur des éprouvettes de dimensions plus grandes ou plus petites que les dimensions standards doivent donc être adaptés (Figure 1.5). On considère ainsi que la valeur de la résistance réelle du béton dans les structures du génie civil est inférieure de 20 à 50% à celle obtenue sur un même béton au laboratoire [18]

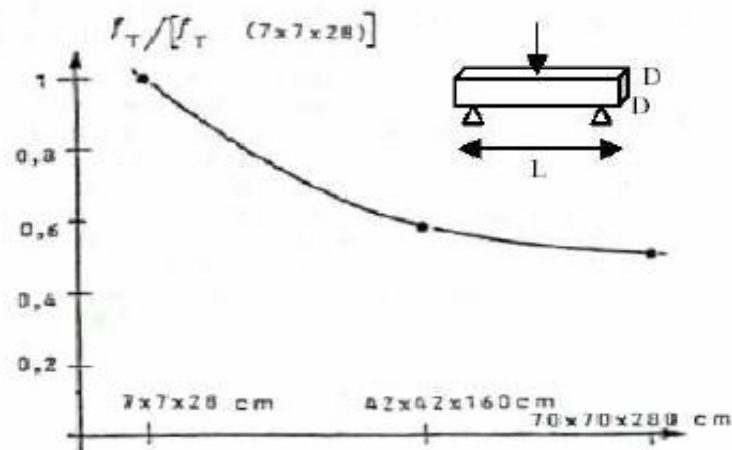


Figure 1.5 – Variation de la résistance de flexion du béton selon la taille des éprouvettes (Hermite 1973)

Blanks, R. F., et Mc Namara [19] a indiqué dans une étude sur l'effet d'échelle sur les résistances à la compression que la résistance des éprouvettes cylindriques ayant un diamètre compris entre 50 mm et 600 mm a diminué considérablement, cependant au-delà de cette fourchette, la résistance se stabilise et aucun effet d'échelle ne sera observé. Dans le cas des prismes ayant des sections carrées, la diminution de la résistance peut être observée dans les cubes de 75, 100 et 125 mm

Aitcin et al [20] a noté que pour la classe de résistance entre 35 et 90 MPa, la résistance la plus élevée est obtenue avec le cylindre ayant un diamètre de 100 mm, elle

diminue pour le cylindre de 150mm, et enfin le cylindre le plus grand mis à l'essai est de 200mm de diamètre donne la résistance la plus faible.

D'autre part, pour les spécimens classés plus petits, les travaux récents ont trouvé des résultats contradictoires avec la loi d'effet d'échelle, cela est attribué à l'effet de paroi, quand le rapport D/d (D diamètre du cylindre et d diamètre du plus gros granulats) est inférieur à 3. [21]

1.4.3.2. Effet d'échelle sur les bétons de haute performance

J.R. del Viso et al [22].ont procédé à des essais dans lesquels ils ont étudié l'effet de la taille et la forme des éprouvettes sur la résistance à la compression d'un béton de haute performance. Pour cela, des éprouvettes cylindriques de 100x200 mm et 75x150 mm, ainsi que quatre éprouvettes cubiques de dimension de 100, 67, 50 et 33 mm ont été employé dans cette campagne. (Figure 1.6)

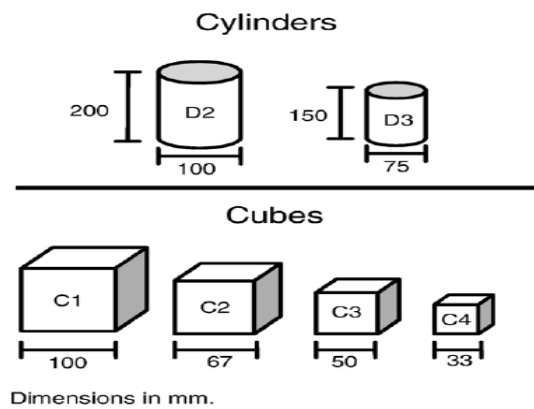


Figure 1.6 : forme d'éprouvettes employées.

Afin d'étudier le comportement de chaque forme d'éprouvette pendant les essais, un contrôle des déformations est également effectué et qui permettra de tracer les digrammes contrainte-déformation -figure 1.7

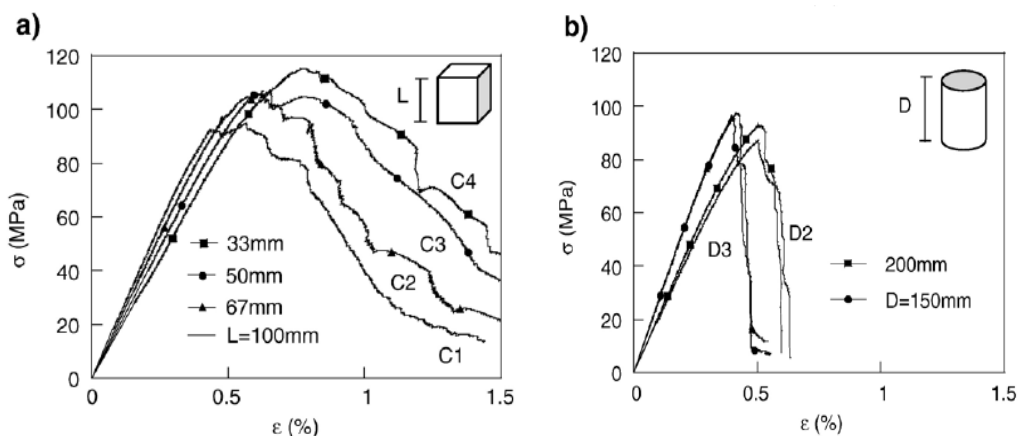


Figure 1.7 : digramme contrainte –déformation. a) cubes. b) cylindres

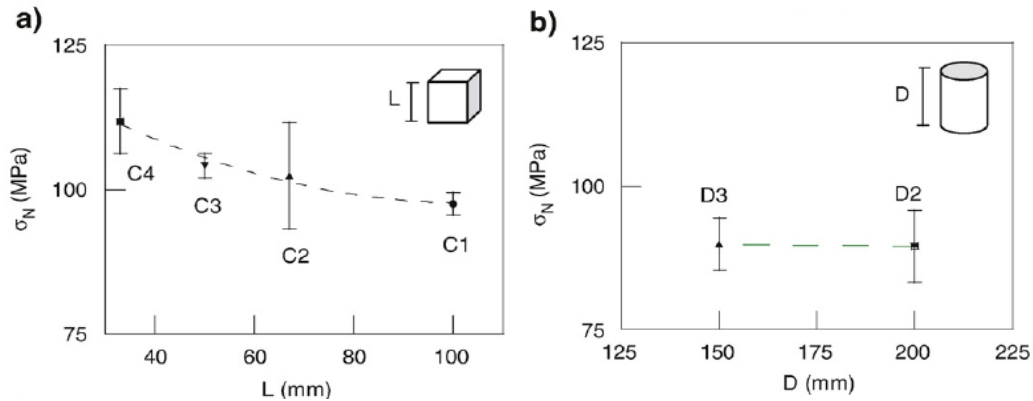


Figure 1.8 : effet d'échelle sur la résistance en compression
a) cubes. b) cylindres

Les résultats de cette étude (figure 1.8) montrent clairement que le comportement sous la charge maximale dépend de la forme et de la taille des éprouvettes, les cubes en béton présentent un comportement adoucissant qui se traduit par une redistribution des contraintes (branche décroissante du diagramme) jusqu'à la rupture de l'éprouvette, à l'opposé, la rupture des éprouvette cylindriques a eu lieu dès que la charge maximale est atteinte, et les cylindre se manifeste comme le comportement des matériaux fragiles.

Les résultats d'essais montrent également un effet d'échelle significatif dans le cas des éprouvettes cubiques. Par contre, les cylindres présentent moins d'effet d'échelle en termes de résistance dans l'intervalle des tailles prévues dans cette étude.

1.4.3. 3. Effet d'échelle sur le béton à poudre réactive

L'étude menée par AN Ming-zhe et al [23] a conduit à la conclusion que l'effet d'échelle en compression sur des éprouvettes en béton à poudre réactive ayant différents dosages en fibre (RPC) 1%, et 2% ainsi qu'un autre béton témoin est significatif, en effet, lorsque la taille des éprouvettes agrandissent, les résistances diminuent considérablement, ce qui est comparable aux effets d'échelle constatés sur les bétons ordinaires et de haute performance, d'autre part, l'ajout de fibre métallique n'avait pas une grande influence sur l'effet d'échelle. Figure 1.9.

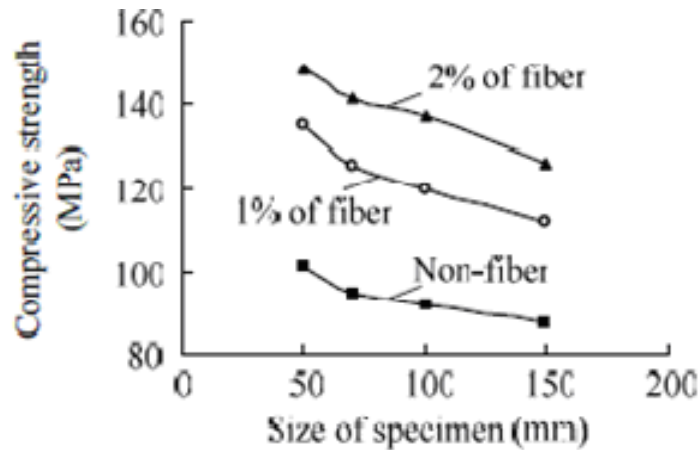


Figure 1.9 : Effet d'échelle sur le béton de poudre

1.4.3.4. Effet d'échelle sur le module élastique

L'effet de la taille d'éprouvettes sur le module élastique n'a pas été bien étudié. Les essais conduits par Baalbaki [24] sur des éprouvettes cylindriques de 100x200 mm et 150 x 300 d'un béton de haute performance montrent des résistances plus élevées pour les éprouvettes de 100 mm de diamètre, par contre, les éprouvettes de diamètre plus grandes présentent un module d'élasticité plus élevé. Les résultats de cette étude montrent clairement une concordance entre les résistances obtenues et la loi d'effet d'échelle, cependant, l'augmentation de la rigidité en fonction de la taille d'éprouvette reste encore des résultats à confirmer.

1.4.3.5. Effet d'échelle sur le retrait du béton

De nombreuses études ont montré l'influence de la dimension des pièces sur le retrait du béton, en effet, le retrait observé diminue avec une 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 [25].

La forme de l'élément joue également un rôle, mais, en première approximation, le retrait peut être exprimé comme une fonction du rapport volume/surface. Certaines hauteurs ont soutenu que, théoriquement, le retrait final est indépendant de la dimension de l'élément de béton, mais, pour des périodes réalistes de plusieurs années, il faut accepter que le retrait observé est plus faible dans les éléments de béton plus importants. [26].

L'effet de la forme d'un élément de béton est secondaire. Les éléments de forme de I présentent moins de retrait que des éléments cylindriques de mêmes rapports

volume/surface, la différence étant en moyenne de 14% [27]. Cette différence peut s'exprimer par la variation de la distance moyenne que doit parcourir l'eau pour atteindre la surface, ce qui n'est pas significatif dans un but de conception [28].

Le tableau 1.1 résume les durées approximatives pour lesquelles le séchage atteint une profondeur D de béton.

Tableau 1.1: Durée approximative pour le séchage du béton [29].

température	Résistance	Humidité relative	Conductivité hygrométrique	Durée du séchage		
				Distance à partir de la surface exposée		
				50 mm	100mm	200mm
5°	Faible	Faible	Elevée	3 mois	1 an	4 ans
	Moyenne	Moyenne	Moyenne	5 ans	2 ans	80 ans
	Elevée	Elevée	Faible	50 ans	200 ans	800 ans
20°	Faible	Faible	Elevée	1 mois	5 mois	18 mois
	Moyenne	Moyenne	Moyenne	30 mois	10 ans	40 ans
	Elevée	Elevée	Faible	25 ans	100 ans	400 ans
50°	Faible	Faible	Elevée	10 jours	1 mois	5 mois
	Moyenne	Moyenne	Moyenne	1 an	4 ans	15 ans
	Elevée	Elevée	Faible	10 ans	40 ans	150 ans
100°	Faible	Faible	Elevée	1 jour	4 jours	15jours
	Moyenne	Moyenne	Moyenne	1 mois	5 mois	118 mois
	Elevée	Elevée	Faible	1ans	6 ans	25 ans

Saleh A et al [30] ont procédé à des essais sur l'effet d'échelle sur le retrait libre des bétons ordinaires. En tenant compte de l'effet de la dessiccation des éprouvettes, Deux types d'éprouvettes ont été préparés ; le premier type ayant les dimensions standard de 50*50*300mm (nommé SW) , le second est de 80*150*500mm (nommé PW) , deux modes de conservation ont été choisis ;un climat sévère d'une température de 50°C et 5% d'humidité relative et un autre modéré de 28C° et 50 % HR, les résultats de cette étude montrent (figure 1.10) que l'effet de la taille sur la déformation du retrait libre était plus prononcé dans les éprouvettes qui ont été laissées sécher sous un climats sévère par rapport à celles conservées dans un climat modéré. Ils ont également constaté que l'emploi d'un adjuvant superplastifiant n'aura aucun effet significatif sur les déformations du retrait libre du béton.

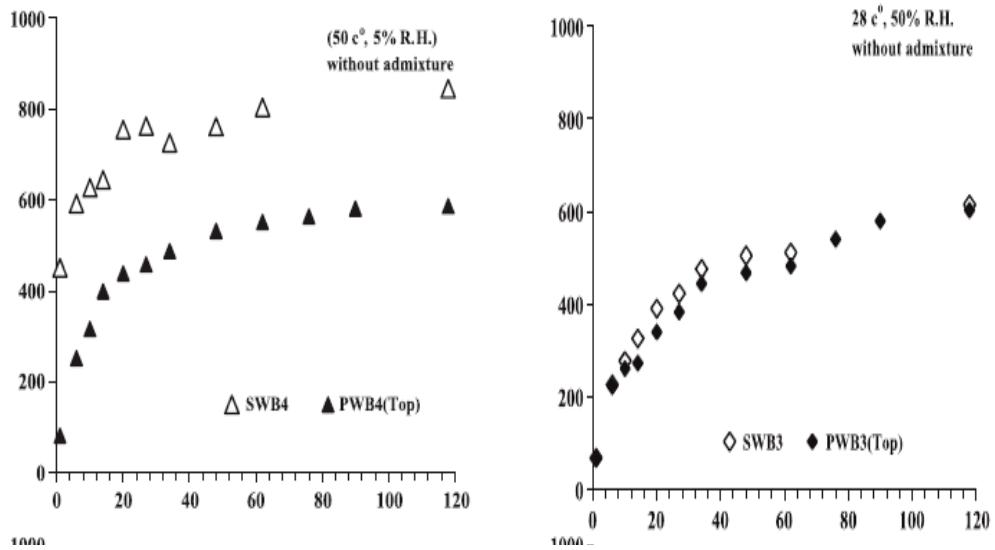


Figure 1-10 : influence de l'effet d'échelle sur les déformations du retrait dans deux différents environnements

Jan Bisschop [31] a effectué une série d'expérience sur l'influence de l'effet d'échelle sur la densité des fissures d'une pâte de ciment exposée au séchage avec rapport E/C égal à 0.45, des moules carrés de différentes tailles (4, 8, 16, 32, et 64cm) ayant tous une épaisseur identique de 4cm, les bords des spécimens ont été recouvert par un papier adhésif afin de ne permettre que le séchage de la surface exposée à l'air.

D'après les résultats, la dessiccation des matériaux cimentaires est largement influencée par l'effet d'échelle, en effet, la densité des fissures dans les échantillons de petite taille (8x8x4) est deux fois plus grande par rapport à celle trouvée dans les échantillons de taille plus grande (64x64x4).

Tableau 1-2 effet d'échelle sur la densité des fissures d'une pâte de ciment durci.

Specimen (cm)	Crack length max. (cm)	Crack length min. (cm)	Crack length average (cm)	Sect. crack density average (cm/cm ²)	Surf. crack density average (cm/cm ²)	A/B
4 x 4 x 4	0.64	0.14	0.32	0.456	2.591	1.17
8 x 8 x 4	0.70	0.02	0.29	0.551	3.113	1.05
16 x 16 x 4	0.75	0.02	0.29	0.549	2.808	0.95
32 x 32 x 4	0.97	0.04	0.40	0.393	1.815	1.12
64 x 64 x 4	1.13	0.12	0.43	0.389	1.316	0.90

A = crack surface density (in cm²/cm³) calculated as: section crack density · 1/2π

B = crack surface density (in cm²/cm³) calculated as: surface crack density · average crack depth

1.5. Conclusion

Cette revue de la littérature a permis de constater que les chercheurs s'accordent sur l'existence de l'effet d'échelle sur les résistances mécaniques ainsi que le retrait libre dans les structures en béton comme dans les éprouvettes confectionnées dans un laboratoire et ceci quelque soit le type du béton employé (béton ordinaire, béton de haute performance, béton de poudre), cependant, l'ampleur de cet effet est bien affecté par la composition du béton et les conditions de conservation.

De même, les effets d'échelle dans les matériaux cimentaires, sont souvent expliqués en se basant sur la théorie déterministe des effets d'échelle de structure proposée par Bazant. Cette théorie s'explique par un adoucissement dans le comportement du béton qui se manifeste par une accumulation de la microfissuration dans une zone appelée « zone d'élaboration de la fissuration »

Bien que les codes universels du béton tiennent en compte cet effet dans l'estimation des résistances à la compression des éprouvettes de différentes tailles, néanmoins, il n'existe pas une relation conventionnelle qui prend en considération les paramètres de composition et de conservation du béton, la dessiccation du béton rend l'effet d'échelle sur les résistances mécaniques moins perceptible dans les éléments minces par rapport aux éléments épais

Dans ce contexte, ce travail est une tentative de quantification de l'effet d'échelle sur les résistances en compression du béton en tenant compte de ces paramètres.

Chapitre II

Etude expérimentale

2.1. Introduction

Afin de mieux connaître l'influence et la portée de l'effet d'échelle sur les résistances mécaniques et le retrait libre du béton durci, on a lancé un programme expérimental permettant d'avoir les résultats de la résistance à la compression et la déformation libre du retrait de dessiccation pour différentes tailles des éprouvettes,

Deux types de ciment (ciment au calcaire et ciment à la pouzzolane) , quatre rapports E/C et deux milieux d'environnement de conservation d'éprouvette (sec et humide) ont été utilisés afin d'identifier la variation de l'effet d'échelle avec ces paramètres.

Dans ce chapitre on présente d'abord le choix et l'origine des matériaux, la composition des bétons d'essais, l'obtention des éprouvettes, leur conservation et conditionnement, puis on présente les dispositifs expérimentaux employés pour effectuer les essais de compression et de mesure des déformations du retrait libre des prismes en béton.

2.2. Programme expérimental

Le programme des essais est effectué au niveau de laboratoire de béton de l'université de Chlef entre la période allant du 15/05/2009 jusqu'au 15/02/2010. L'objectif est de déterminer la variation des résistances mécaniques et les déformations du retrait libre de dessiccation en fonction de la taille des éprouvettes.

Pour ce faire, deux compositions de béton ont été utilisées, l'une avec un ciment CPJ (Chlef) nommé C1 contenant le calcaire, l'autre avec un ciment CPJ (Zahana) nommé C2 contenant la pouzzolane naturelle.

Afin d'étudier l'effet d'échelle sur les résistances mécaniques des éprouvettes cubiques différentes tailles ont été employées (7, 10, 15 et 20cm). Les éprouvettes ainsi préparées sont stockées dans deux environnements différents, le premier est une cure à l'eau, le second est le milieu ambiant de laboratoire.

On a choisi cinq échéances d'écrasement à la compression (1, 3, 7, 28 et 90 jours). Vu l'importance de la quantité du béton à confectionner, on a limité la variation du rapport E/C uniquement dans l'éprouvette de dimension 10x10, pour cela on a employé quatre rapports E/C (0,4 – 0,45- 0,50 et 0,55),

Quant aux mesures du déformation du retrait libre, des prismes en béton de différentes tailles sont préfabriqués, ces primes ayant les mêmes dimensions à la base

(carrée) tel que les éprouvettes destinées aux écrasements, ainsi une hauteur deux fois sa base, sauf les prismes de 7 cm ayant une hauteur de 28 cm.

Quatre rapports E/C (0,4 - 0,45- 0,50 et 0,55) ont été employés dans le prisme ayant la dimension 10x10 cm afin d'étudier l'influence de ce facteur sur les déformations dues au retrait libre.

Les prismes en béton ainsi fabriqués sont stockés dans leurs moules pendant une journée puis démoulés conservés dans le milieu ambiant de laboratoire.

2.2.1. Matériaux utilisés

Pour des considérations pratiques, on a choisi des matériaux employés dans la réalisation des ouvrages d'art de l'autoroute Est Ouest dans la région de Chlef. Ce choix a permis aussi de garantir la même provenance des matériaux et d'assurer un contrôle régulier pendant la période d'essai.

2.2.1.1. Ciment

Actuellement, il y a plusieurs types de ciment commercialisés en Algérie. Le choix du type de ciment joue un rôle très important dans le calibrage des différents composants du béton afin d'obtenir la qualité demandée. Dans cette étude, on opté pour deux types de ciments de différentes origines. Le premier ciment nommé C1, provenant de la cimenterie de Chlef et contenant 10% de calcaire CPJ CEM II 42.5. Le deuxième ciment, nommée C2, provenant de la cimenterie de Zahana à base de 18% de pouzzolane naturelle CPJ CEM II 42.5. Le tableau 2.1 récapitule la composition chimique et minéralogique des deux ciments employés dans cette étude.

Tableau 2.1 : Caractéristiques chimiques des ciments employés.

Caractéristiques		Ciment de Chlef	Ciment de Zahana
Composition chimique	SiO ₂	22.60	21.74
	Al ₂ O ₃	4.20	3.28
	Fe ₂ O ₃	3.55	2.90
	CaO	62.17	63.70
	SO ₃	2.19	1.95
	MgO	0.63	1.41
	K ₂ O	0.42	0.65
	Na ₂ O	/	/
	chaux libre	0.32	1.50
	insolubles	1.25	0.96
	Perte au feu	1.84	0.98
minéralogique	C ₃ S	41.8	62.3
	C ₂ S	33.3	15.2
	C ₃ A	5.1	3.8
	C ₄ AF	10.7	8.8
SSB cm ² /g		3700	3300

2.2.1.2. Sable

Pour la confection des différents bétons, on a utilisé un sable provenant d'Oued Sly dont les caractéristiques physiques sont déterminées expérimentalement, au niveau de laboratoire de l'autoroute est-ouest. Les résultats d'essais sont exposés dans le tableau suivant :

Tableau 2.2. Caractéristiques physiques du sable utilisé.

Caractéristiques	Sable
Masse spécifique	2650 kg/m ³
Equivalent de sable	75%
Module de finesse	2,9

L'analyse granulométrique d'un sable a pour but de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes tailles de grains constituant l'échantillon. La distribution pondérale des particules d'un granulat suivant leurs dimensions permet de déterminer sa continuité [32]. Les résultats d'essais sont rassemblés dans le tableau 2.3.

Tableau 2.3 : Résultats de l'analyse granulométrique du sable utilisé

Tamis (mm)	Refus Partiel (g)	refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
5	0	0	0	0
3,15	41,13	41,13	7	93
2	58,28	99,41	17	83
1,25	63,94	163,35	27	73
1	36,64	199,99	33	67
0,5	216,7	416,69	69	31
0,25	125,99	542,68	90	10
0,16	35,9	578,58	96	4
0,08	17,9	596,48	99	1
Fond	4,08	600,56	100	0

2.2.1.3. Gravier

Le gravier utilisé provient de la carrière ENOF Oued Fodda, situé à l'Est de la ville de Chlef. Ce sont des graviers concassés d'origine silicocalcaire de classe 8/15 dont le poids spécifique est de 2678 kg/m^3 . Les résultats de l'analyse granulométrique de ce gravier sont regroupés dans les tableaux 2.4.

Tableau 2.4 : Résultats de l'analyse granulométrique du gravier utilisé

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
16	0	0	0	100
12,5	244	244	12	88
10	573	817	41	59
6,3	1105	1922	96	4
5	36	1958	98	2
3,15	34	1992	99	1
Fond	14	2006	100	0

2.2.1.4. Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée pour la confection des bétons est une eau potable recueillie directement du robinet de laboratoire. Aucune analyse poussée n'a été effectuée. La masse volumique retenue pour le calcul des formulations est de 1000 kg/m³.

2.2.1.5. Adjuvant organique

Les adjuvants sont introduits dans le béton pour améliorer certaines caractéristiques selon certaines exigences d'utilisation telles que l'ouvrabilité, la résistance, la prise, le durcissement ainsi que la perméabilité. Dans cette étude, on a utilisé un fluidifiant nommé **Rheofluid**, afin de maintenir la consistance pour tous les types de bétons. Son dosage varie selon le rapport E/C qui confère au béton un comportement plastique.

2.2.2. Paramètres étudiés

Le tableau suivant résume les différents essais menés au cours de cette étude, ainsi les paramètres étudiés pour chaque essai :

Tableau 2.5 : paramètres d'essais.

Type d'essai	Paramètres étudiés								
	Dimension d'éprouvette /prisme (cm)	ciment		E/C				mode de conservation	
		CPJ CHLEF	CPJ ZAHANA	0,4	0,45	0,5	0,55	Exposée à l'air libre	Immergée à l'eau
Essais de Compression sur cube à 3, 7,28 et 90 jours	7*7	X	X			X		X	X
	10*10	X	X	X	X	X	X	X	X
	15*15	X	X			X		X	X
	20*20	X	X			X		X	X
Retrait libre sur prisme	7*7*28	X	X			X		X	
	10*10*30	X	X	X	X	X	X	X	
	15*15*30	X	X			X		X	
	20*20*40	X	X			X		X	

2.2.3. Formulation du béton

La composition de base du béton est déterminée grâce à la méthode de Dreux-Gorisse [33]. D'abord la courbe granulométrique de référence est obtenue en considérant trois points sur le graphique. Le premier point est situé à l'origine des axes, le second à l'ordonnée 100% correspondant à la dimension maximale du plus gros granulat en l'occurrence 20mm et le troisième point à l'abscisse $D_{max}/2 = 8$ mm et à l'ordonnée 45%. Les intersections de la courbe granulométrique de référence et des droites reliant les ordonnées à 95% à 5% des courbes granulométriques successives donnent la répartition volumique des différents constituants du squelette granulaire. Nous obtenons une composition granulométrique optimisée à base de 42 % de sable, et de 58 % de gravier. Un dosage en ciment de 380 kg/m³ a été choisi afin de donner une résistance acceptable et proche à celle qui règne sur les chantiers. Le tableau suivant résume la composition finale obtenue.

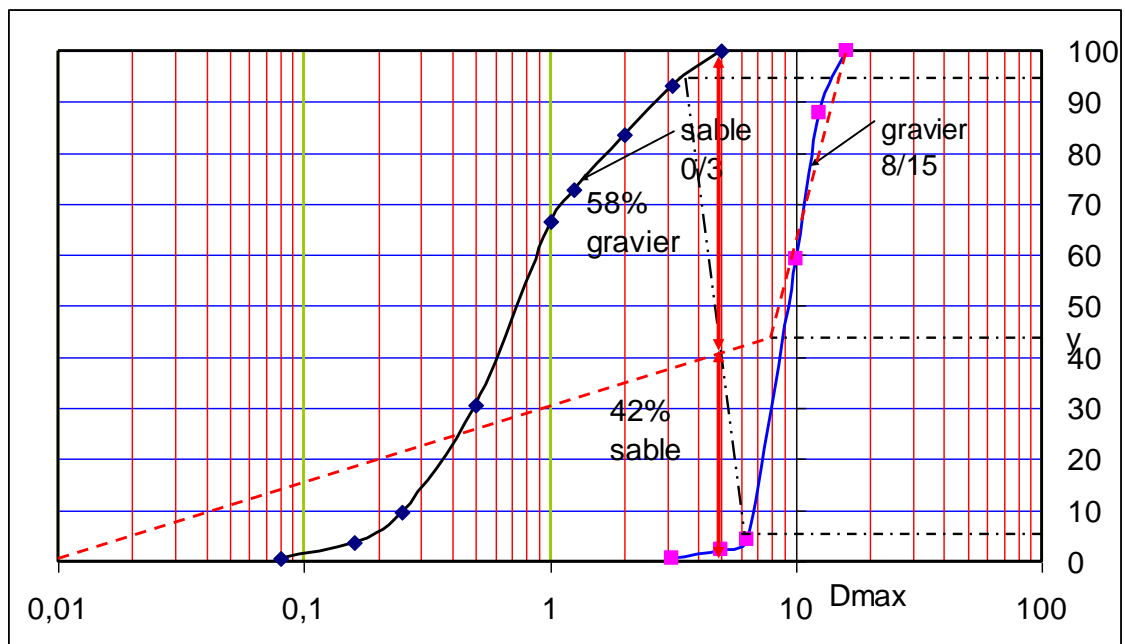


Figure 2.1 : Courbe granulométrique du sable et gravier

La composition finale retenue pour l'ensemble des essais effectués est figurée dans le tableau suivant :

Tableau 2.6 : Composition des bétons testés

Composant	Dosage pondéral			
Ciment	380 kg			
Sable	741kg			
Gravier	1037 kg			
Eau / Ciment	0.4	0.45	0.5	0.55
Adjuvant (%)	2.5	2	1.5	0.5

2.3. Procédure de fabrication du béton

Le protocole de fabrication du béton est le suivant :

- Pesage des différents constituants du béton pour faire une gâché de 50 litres avec un malaxeur d'une capacité maximale de 100 litres.
- les surfaces des moules sont recouvertes d'huile afin d'éviter tout risque d'adhérence entre le moule et le béton.
- Pré mouillage du malaxeur pour éviter une absorption d'eau par les parois du malaxeur ou nettoyage de celui-ci s'il a été utilisé auparavant.
- Introduction des éléments solides (sable, gravier et ciment)
- malaxer des constituants solides à sec pendant une minute.
- ajout les 2/3 de l'eau de gâchage, et malaxer pendant une minute.
- Ajouter le 1/3 de l'eau de gâchage et l'adjuvant et malaxer pendant une minute.
- mesurer de l'affaissement au cône d'Abrams, puis vidanger du malaxeur
- le remplissage des moules s'effectue par deux couches, chacune est mise sous vibration à l'aide d'une aiguille vibrante pendant une vingtaine de seconde, enfin on fait un surfaçage avec une truelle manuelle.



Figure 2.2 : Malaxeur à béton de capacité 100 litres.

2.3.1. Confection des éprouvettes de compression

L'étude de l'effet d'échelle en compression nécessite l'écrasement des éprouvettes de différentes dimensions, pour cela on a choisi trois types d'éprouvettes cubiques de dimensions normalisées 7x7, 10x10 et 15x15 cm.

Une quatrième dimension de 20.5x20.5 a été employée dont leur moule est préparé en bois étanche afin d'étudier l'effet d'échelle sur des éprouvette plus larges.

Vingt éprouvettes de chaque taille ont été confectionnées pour être conservées dans deux milieux différents et à différents âges à savoir 1, 3, 7, 28 et 90 jours.

La figure 2.3 schématise les dimensions des éprouvettes utilisées.

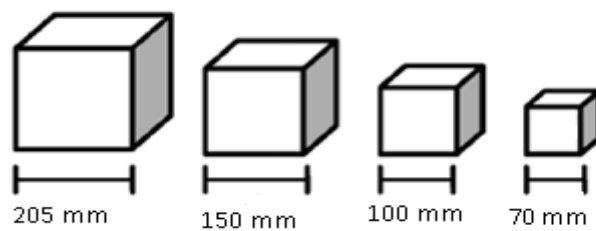


Figure 2.3 : dimensions des éprouvettes utilisées

2.3.2. Confection des prismes de retrait de dessiccation

Les prismes destinés à mesurer le retrait sont fabriqués dans des moules de sections carrées similaires à celles destinées à la compression simple avec un élancement allant de 2 à 4. La figure 2.5 schématise les dimensions des différents prismes utilisés. A fin d'étudier la dessiccation uniquement dans une seule direction, les

prismes sont menés d'une protection contre le séchage sur leurs faces extérieures par un film d'émulsion d'hydrocarboné.



Figure 2.4. Prismes en béton pour mesurer le retrait libre

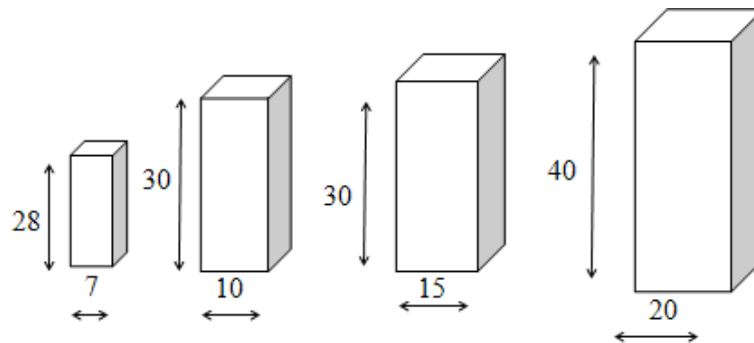


Figure 2.5. Dimensions des prismes pour mesurer le retrait libre

2.4. Conservation des éprouvettes

Afin d'étudier l'influence du paramètre de cure sur l'effet d'échelle en compression, les éprouvettes destinées aux essais de compression sont conservées dans leurs moules pendant 24 heures au laboratoire à température ambiante. Elles sont conservées sous une toile humide afin d'éviter toute évaporation. A un jour d'âge, elles sont démoulées et divisées en deux séries ; la première placée en milieu ambiant du laboratoire tandis que l'autre série est placée dans un bassin rempli d'eau saturée de la chaux.

Les prismes destinés à quantifier le retrait de dessiccation du béton sont placés dans le milieu ambiant du laboratoire. Ils sont posés verticalement sur une table en gardant un espacement de 2 à 4 centimètres entre les prismes. Pour éviter l'effet de bord sur la dessiccation, les prismes sont recouverts d'une couche de bitume et d'un papier adhésif sur les deux faces supérieures et inférieures afin de ne tolérer que la dessiccation latérale.

2.5. Principe de l'essai de compression

La résistance à la compression est déterminée en utilisant une Presse hydraulique de charge maximale 3000 Kn figure 2.6. La norme EN 206 exige certains critères pour que les résultats soient fiables, parmi ces critères on cite :

- lors de l'essai de compression, le cube est placé de telle sorte que les faces de moulage soient en contact avec les plateaux de la presse c'est-à-dire que le cube est à 90° par rapport à sa position de coulage.
- Les extrémités des prismes doivent être planes et perpendiculaire à l'axe de la presse.
- La vitesse de chargement est gardée constante (d'environ 0,4 MPa/s) durant toute la période d'essai.



Figure 2.6. presse hydraulique pour essai de compression

2.6. Principe de mesure des déformations du retrait

Les prismes destinés aux essais de retrait sont réalisés à l'aide de moules équipés de tiges ancrées sur une de leurs faces latérales à l'état frais. Ces tiges sont munies de deux trous bornes pour la fixation de l'équipement de mesure. La figure 4.5 montre les

éprouvettes et les tiges ancrées à leurs surfaces afin de suivre les déformations de retrait. La première mesure commence juste après le démoulage où le béton atteint 24 heures d'âge.



Figure 2.7: Prismes pour mesure de retrait

La déformation du retrait est calculée à partir de la variation de la longueur des éprouvettes. L'appareil servant à mesurer cette longueur est un extensomètre équipé d'un comparateur ayant une exactitude inférieure ou égale à 0,001 mm.

La variation de la longueur est calculée par différence entre la mesure initiale à l'instant (t_0) et la mesure à l'instant (t).

Les mesures de retrait ont commencé 24 heures après le coulage du béton sur les prismes de dimensions 7x7x28, 10x10x20, 15x15x30 et 20x20x40 cm. La technique utilisée est la mesure de la distance entre deux tiges noyées aux extrémités des deux faces opposées de l'éprouvette à l'aide d'un comparateur ayant une précision d'un micromètre. La déformation est donc calculée à partir de la formule suivante :

$$\varepsilon = \Delta L / L$$

Avec

ΔL : variation de longueur exprimée en mm,

L : longueur entre les deux tiges de mesure égale à 205 mm,

ε : déformation de retrait exprimée en $\mu\text{m}/\text{m}$.

2.7. Période d'essai

Les essais de compression sont effectués entre le mois de Mai et Août 2009, dans cette période l'effet de dessiccation est bien observé. Les essais de compression sont effectués à l'âge de 1, 3, 7, 28 et 90 jours pour les différents bétons et différents modes de cure. Le retrait a été suivi par mesure de déformations linéaire le long de sept mois. Les mesures ont débuté après le premier jour du coulage et se sont poursuivies durant toute la période d'essais avec des mesures plus concentrées au jeune âge et qui deviennent moins fréquentes à long terme.

2.8. Conclusion

Ce programme expérimental vise à évaluer l'effet d'échelle sur les résistances en compression et le retrait libre du béton, dans ce cadre, une composition de béton avec un dosage en ciment de 380 kg/m^3 a été retenue, les rapports E/C employés est de 0.40, 0.45, 0.50 et 0.55. Les essais d'écrasement sont effectués sur des éprouvettes de différentes tailles (cubes de 7, 10, 15 et 20 cm) à l'âge de 1, 3, 7, 28 et 90 jours. La déformation du retrait libre est mesurée sur des prismes.

Les essais de mesure du retrait sont repris plusieurs fois afin d'enregistrer avec plus de précision la déformation à l'instant (t).

La période des essais est caractérisée par une forte température enregistrée et ceci nous a permis d'étudier au mieux l'influence du retrait dessiccation sur les résistances mécaniques.

Chapitre III :

Présentation des résultats

3.1. Introduction

Après avoir exposé l'étude expérimentale destinée à la mesure des paramètres pertinents permettant de ressortir l'influence de l'effet d'échelle sur les résistances mécaniques et le retrait libre, on présente, dans ce chapitre, les résultats de cette étude.

L'analyse des résultats est présentée en deux parties. Dans la première partie, on présente les résistances mécaniques des cubes de dimension de 10x10, suivie du retrait libre des prismes en béton en fonction des paramètres suivants :

- rapport E/C
- type de ciment
- mode de cure (sec et humide).

3.2. Ouvrabilité du béton

Pour chaque opération de confection du béton, on mesure immédiatement l'ouvrabilité à l'aide du cône d'Abrams. Les bétons ont été confectionnés pour donner quatre classes différentes de béton tout en gardant la même ouvrabilité. On a varié le rapport E/C puis on a remplacé une partie de l'eau de gâchage par l'ajout d'un fluidifiant. Les résultats trouvés sont présentés dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Résultats de l'essai d'affaissement des différents bétons

Type de ciment	Type de Ciment	E/C	Affaissement (cm)
Ciment C1	Béton B1	0.4	7
	Béton B2	0.45	22
	Béton B3	0.5	16
	Béton B4	0.55	12
Ciment C2	Béton B5	0.4	9
	Béton B6	0.45	21
	Béton B7	0.5	15
	Béton B8	0.55	10

La figure 3.1 présente les résultats d'affaissement au cône d'Abrams trouvés pour les différents bétons. On a voulu gardé la même ouvrabilité tout en variant le rapport E/C. D'après ces résultats, il s'avère que le type de ciment est resté inerte et que l'ouvrabilité est pratiquement constante. Pour un rapport E/C de 0.45, le dosage en

super plastifiant semble être excessive par contre celui correspondant à 0.4 mérite d'être amélioré. Néanmoins, on a gardé ces compositions qui vont donner des bétons de différentes classes.

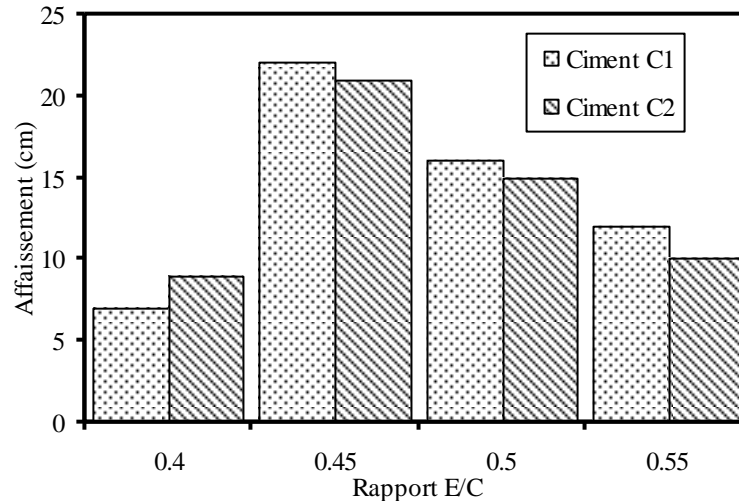


Figure 3.1 : Résultats d'affaissement des différents bétons testés

3.3. Résistance à la compression

3.3.1. Effet du type de ciment

La figure 3.2 illustre les résultats obtenus de la résistance à la compression sur des cubes de 10cm en béton réalisés avec le ciment C1 et C2. Pour les différents rapports E/C, les résistances de toutes les classes du béton évoluent en fonction de l'âge avec une vitesse décroissante qui sera plus visible au-delà de 28 jours. Il est constaté sur la figure 3.2 que l'accroissement des résistances de 28 à 90 jours est fortement lié au rapport E/C et au type de ciment. Pour un rapport E/C de 0.4, l'accroissement est de 8.5 et 6.5 MPa pour le ciment de Chlef et Zahana, par contre, pour un rapport plus élevé, l'accroissement n'est que de 3 et 1.5 MPa pour les deux types de ciments. Le ciment C2 à base de pouzzolane naturelle possède des résistances plus significatives au jeune âge, mais à long terme les valeurs s'inversent et le ciment C1 à base de calcaire promet des résistances accrues dès le troisième jour. A 90 jours le ciment C1 atteint une résistance de 53 MPa pour E/C de 0.4 alors que la résistance du ciment C2 n'est que 48.5 MPa. Pour un rapport E/C élevé de 0.55 l'effet du type de ciment disparaît et les résistances à la compression des deux ciments se convergent vers une valeur de 32.5 MPa.

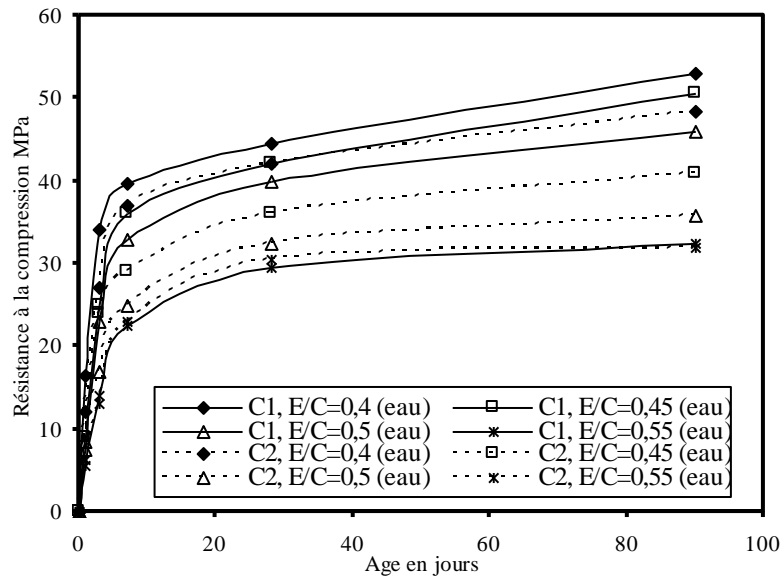


Figure 3.2: Evolution des résistances à la compression des bétons confectionné par le ciment C1 et C2 (cure à l'eau)

3.3.1. Effet du rapport E/C

Les résultats de la résistance à la compression sur cubes de 10 cm conçus avec les ciments C1 et C2 et conservés dans l'eau sont représentés sur la figure 3.3. A un jour d'âge, les résistances semblent moins influencées par le type de ciment où les valeurs sont très voisines. Le rapport E/C est moins marquant et son effet n'est ressenti qu'en voisinage la valeur de 0.4. La résistance à 28 jours est influencée par la quantité d'eau de gâchage et donne des résistances du béton à base de ciment C1 de 44.5, 42, 40 et 29.5 MPa pour un E/C respectivement de 0.4, 0.45, 0.5 et 0.55. Pour les mêmes rapports E/C, le ciment C2 enregistre des résistances de 42, 36, 32.5 et 30.5 MPa.

Il est clair d'après ces résultats que la pouzzolane naturelle présente dans ce ciment joue un rôle primordial dans le développement des résistances mécaniques surtout pour les faibles valeurs du rapport E/C. Pour un rapport E/C égal 0.4, la résistance à la compression a gagné 8 MPa de 28 à 90 jours grâce à son activité pouzzolanique. Par contre, le calcaire semble plus actif et joue un rôle primordial dans le développement des résistances mécaniques grâce à son effet physique et la qualité de son clinker.

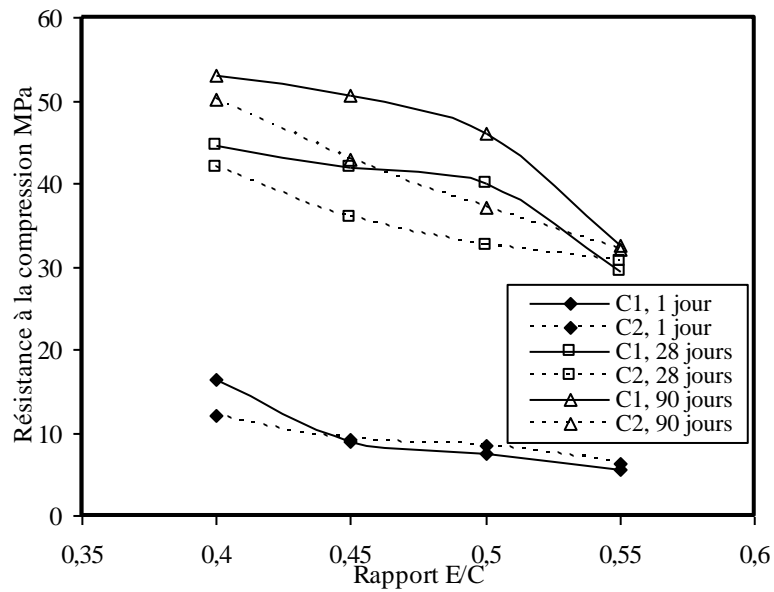


Figure 3.3: Evolution des résistances à la compression des bétons en fonction du rapport E/C pour différents âges (cure à l'eau)

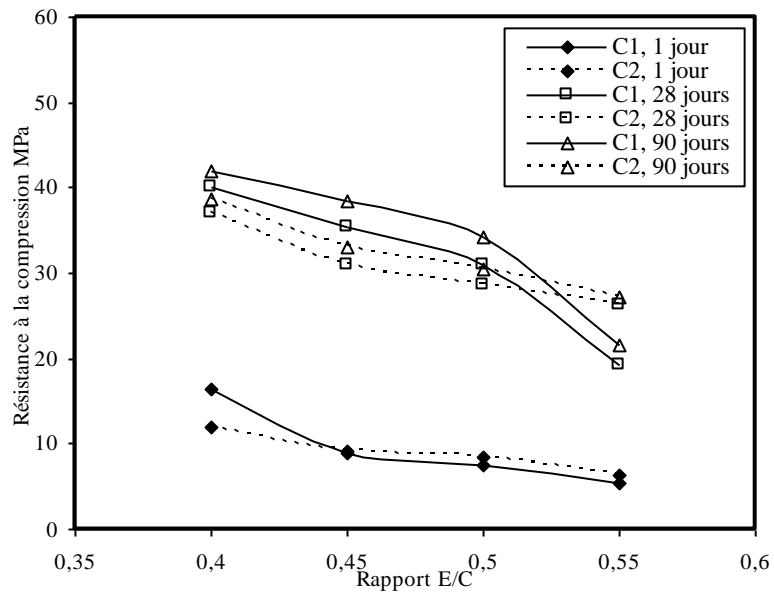


Figure 3.4: Evolution des résistances à la compression des bétons en fonction du rapport E/C pour différents âges (exposé à l'air)

En comparant les deux types de ciment, on trouve sur la figure 3.5 la variation des résistances mécaniques pour deux rapports E/C faible et élevé.

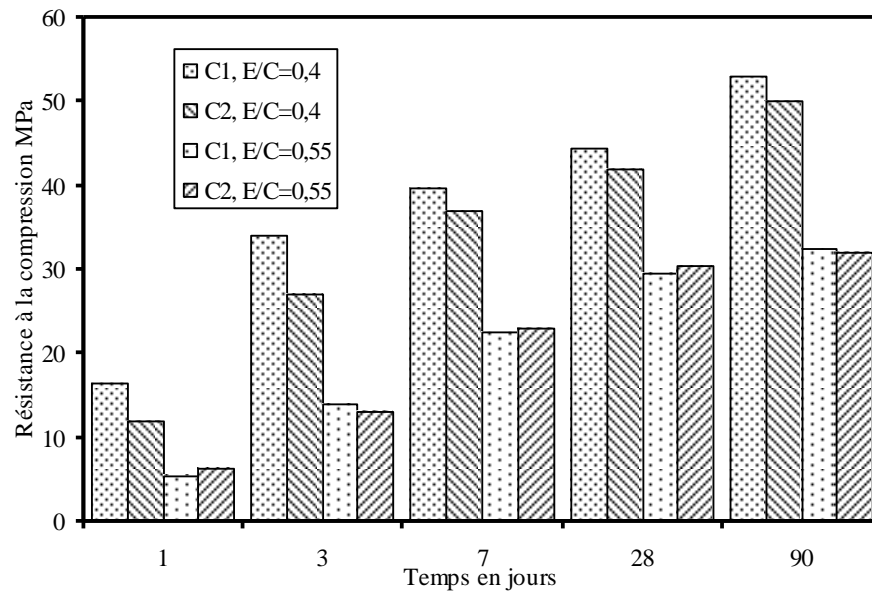


Figure 3.5 : histogramme des résistances pour les deux types de ciments

3.3.2. Effet de la cure

Il est évident que la cure sous l'eau confère au béton un gain de résistance considérable en lui évitant la dessiccation et lui garantissant une hydratation complète. L'influence du mode de cure est peu prononcé lorsque le béton est au jeune âge, puis il commence à se différencier progressivement en fonction de l'âge des éprouvettes et pour les différents rapports E/C. Les résultats présentés sur la figure 3.6 montrent un accroissement des résistances différemment influencé par le rapport E/C pour les deux types de ciments. A trois jours d'âge, les deux ciments enregistrent une faible évolution de la résistance sans autant être dépendante du rapport E/C. Dès le 7 jours, le ciment C1 gagne de la résistance sous l'eau en augmentant son rapport E/C. A long terme, une différence de 12 MPa marque l'effet bénéfique d'une cure humide du ciment de Chlef C1.

Par contre le ciment de Zahana C2, possède un comportement complètement différent à celui du ciment de Chlef où l'augmentation du rapport E/C affecte négativement le gain de résistance sous une cure humide. Ce n'est qu'après le 7^{ième} jour que le béton conservé sous l'eau gagne de considérables résistances. Comme c'est illustré sur la figure 3.7, ce gain reste décroissant en augmentant le rapport E/C. On peut dire qu'une présence abondante d'eau de gâchage préserve le béton contre la dessiccation et lui confère une résistance voisine à celle sous l'eau.

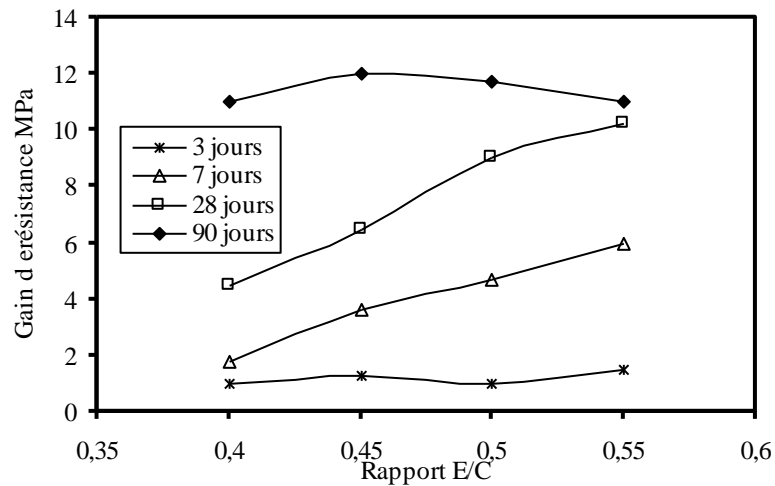


Figure 3.6 : Gain de résistance entre une cure sous l'eau et à l'air libre d'un béton à base de ciment C1.

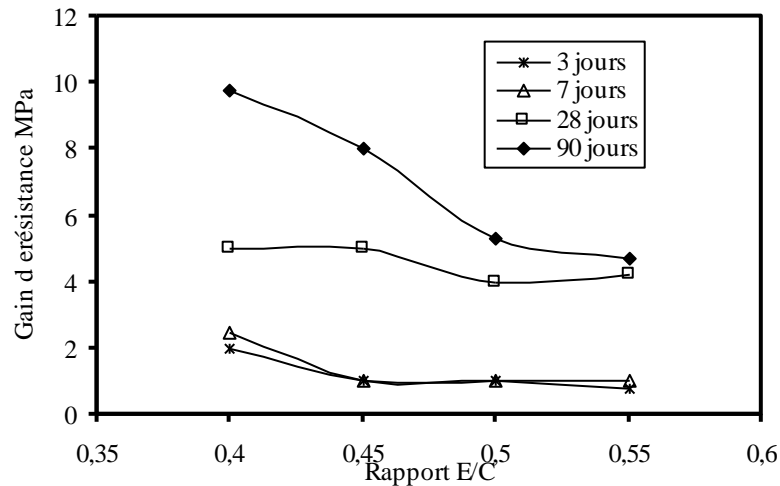


Figure 3.7 : Gain de résistance entre une cure sous l'eau et à l'air libre d'un béton à base de ciment C2.

Pour un rapport E/C égal à 0,4 on peut obtenir, sous une cure sous l'eau par rapport à une cure à l'air libre, un gain de résistance de 4,5 et 11 MPa respectivement à 28 et 90 jours pour le ciment C1. Ce gain est presque identique pour le ciment C2 avec des valeurs de 5 et 10 MPa. Pour un rapport E/C élevé de 0,55 et au-delà de 28 jours ce gain reste de 1 MPa pour le ciment C1 et chute à 4,7 MPa pour le ciment C2. On peut dire que la qualité du ciment joue un rôle important lors d'une conservation dans un milieu sec où la microstructure peut retenir de l'eau et fait perdre moins de résistances au béton.

3.4. Retrait libre

Le retrait libre des différentes éprouvettes a été suivi durant une période de sept mois d'exposition au milieu ambiant de laboratoire. Les déformations sont évaluées entre deux plots de mesure distants de 20.5 cm à l'aide d'un comparateur ayant 0.001 mm de précision. Le retrait mesuré représente la moyenne de deux retraits enregistrés sur deux éprouvettes identiques, les figures 3.8 et 3.9 illustrent les résultats obtenus sur le ciment de Chlef et Zahana pour un rapport E/C de 0.5. Dans cette partie d'analyse, on a examiné deux facteurs qui peuvent avoir un effet sur le retrait libre du béton, le premier est le rapport E/C, le second est le type de ciment.

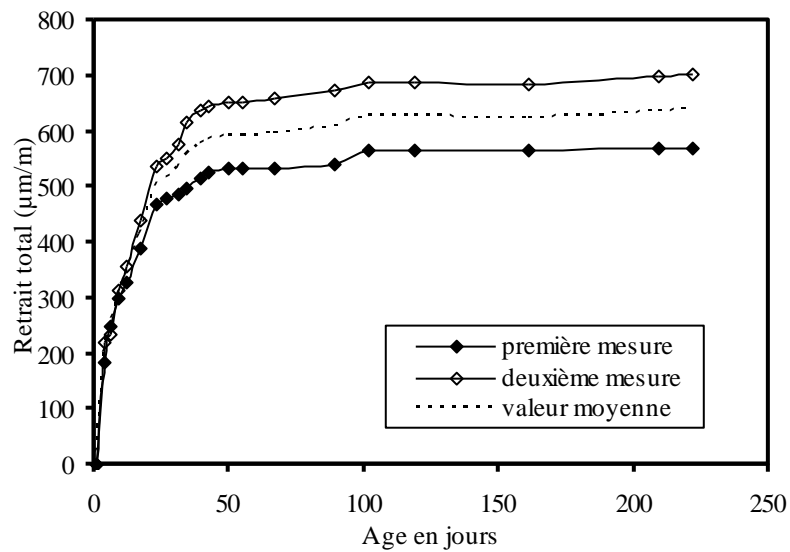


Figure 3.8 : Evolution du retrait total pour deux éprouvettes de 10 cm et E/C=0.5 à base du ciment C1

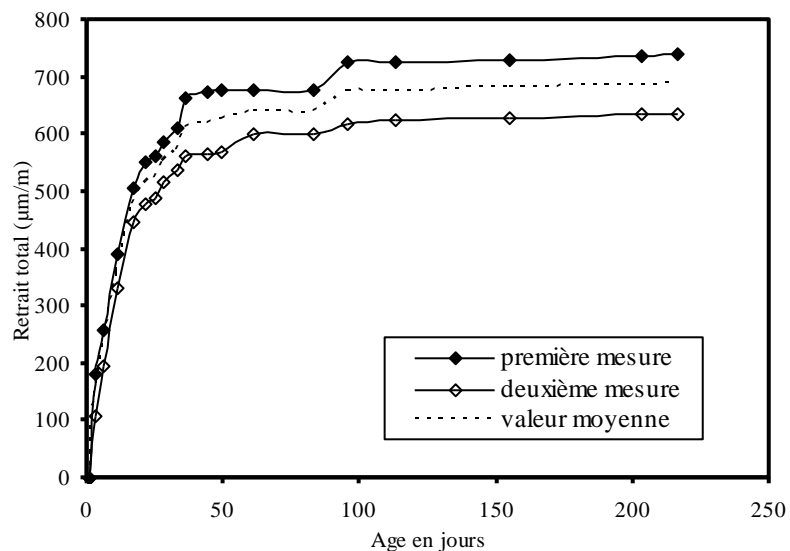


Figure 3.9 : Evolution du retrait total pour deux éprouvettes de 10 cm et E/C=0.5 à base du ciment C2

3.4.1. Reproduction des essais

La corrélation des deux retraits des deux éprouvettes représentée sur les figures 3.10 et 3.11 témoigne de la fiabilité des résultats et de leurs répétitivités. Il est bien clair, d'après ces résultats, que la mesure du retrait est estimée avec une précision de 98% ce qui justifie la maîtrise des paramètres d'essai.

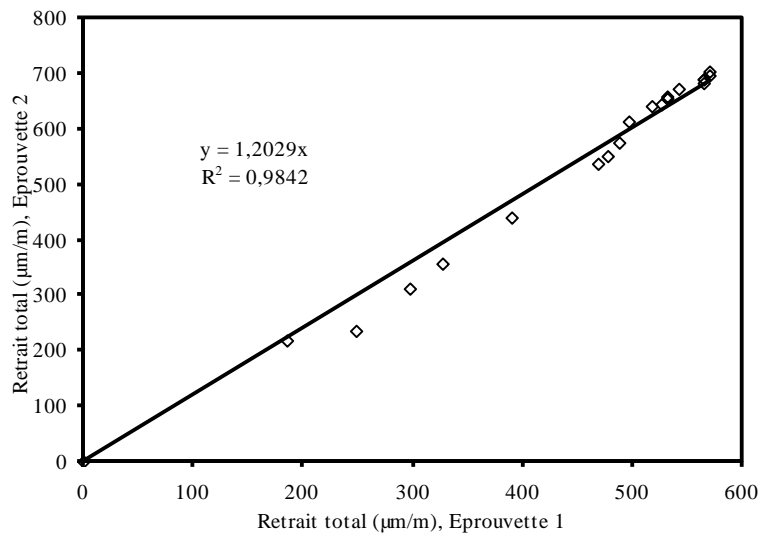


Figure 3.10 : Variation du retrait pour chaque éprouvette (ciment C1, E/C=0.5)

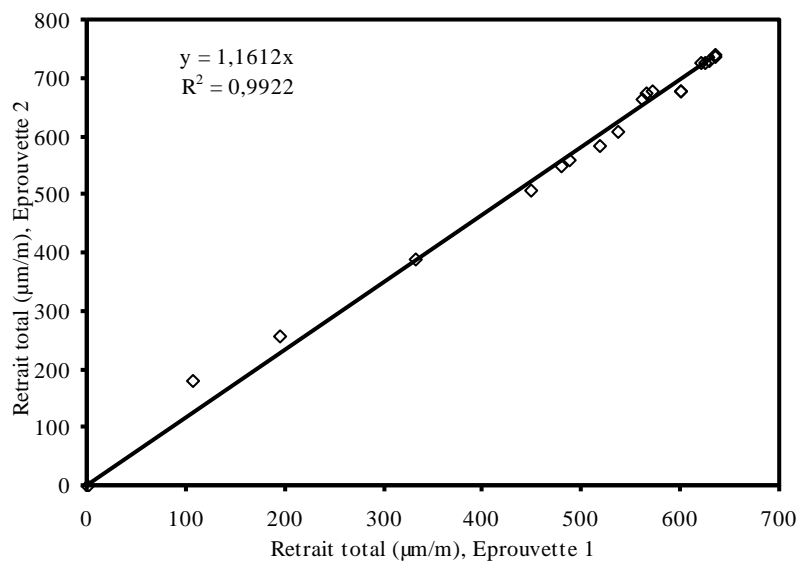


Figure 3.11 : Variation du retrait pour chaque éprouvettes (ciment C2, E/C=0.5)

3.4.2. Effet du type de ciment

La différence enregistrée entre le retrait des deux types de ciment est fortement liée au rapport E/C et à l'âge des éprouvettes. A 7 jours, le ciment C2 à base de pouzzolane naturelle présente un retrait supérieur pour des faibles rapports E/C par contre pour des rapports E/C élevés, les retraits des deux ciments semblent voisins.

Cet effet s'inverse à long terme, surtout au-delà de 28 jours, où l'augmentation du rapport E/C accentue le retrait du béton à base du ciment C2 comparativement à celui de C1. La figure 3.12 montre une comparaison des deux retraits à des échéances différentes avec un retrait du béton au ciment C2 très sensible au rapport E/C au-delà de 28 jours. Ceci peut être attribué à l'enclenchement de la réaction pozzoulanique de ce type de ciment.

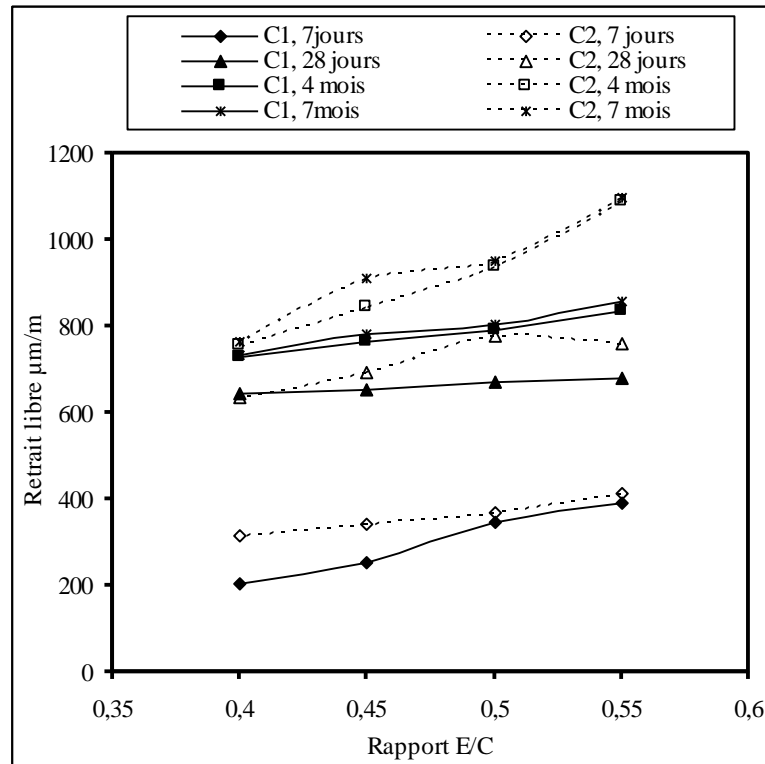


Figure 3.12 : Comparaison des retraits libres des deux types de ciments en fonction du rapport E/C

3.4.3. Effet du rapport E/C

Les figures 3.13 et 3.14 présentent l'évolution du retrait pour différents rapports E/C. Selon les deux figures, on constate que ; plus le rapport E/C est élevé plus de retrait enregistré augmente quelque soit le ciment utilisé ; un béton confectionné avec le ciment C1 présente un retrait final de 732, 783, 805 et 860 $\mu\text{m/m}$ respectivement pour des rapports E/C de 0,4, 0,45, 0,5 et 0,55. Par contre le béton à base de C2 enregistre dans les mêmes conditions un retrait de 766, 910, 951 et 1100. Cela est dû au fait que l'on a ajouté au gâchage plus d'eau qui n'a pas pu réagir avec le ciment anhydre. Le volume d'eau évaporable est plus important et la valeur du retrait final augmente. Les capillaires résultants dans ces conditions sont plus nombreux et de diamètres supérieurs.

En se basant sur ces résultats, on peut dire qu'un faible rapport E/C (E/C=0,4) donne moins de retrait à condition de maintenir une bonne ouvrabilité au béton par l'ajout d'un adjuvant fluidifiant.

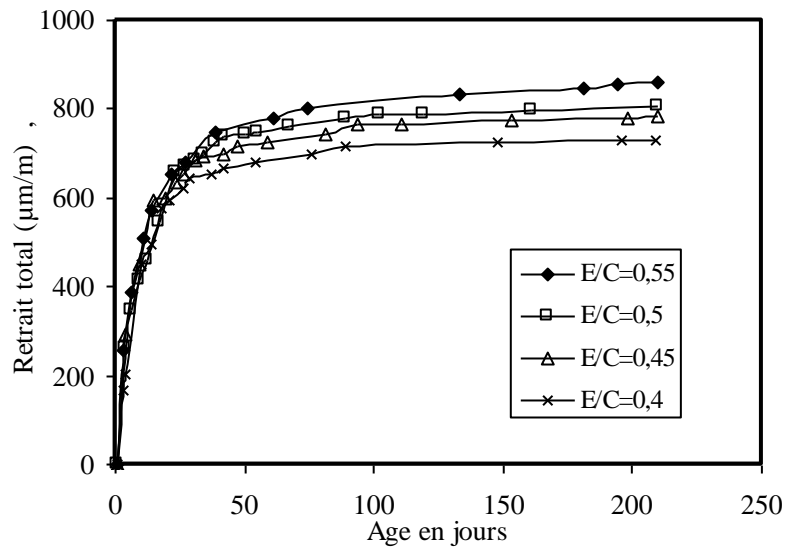


Figure 3.13 : Evolution du retrait à base du ciment C1 pour différents rapports E/C

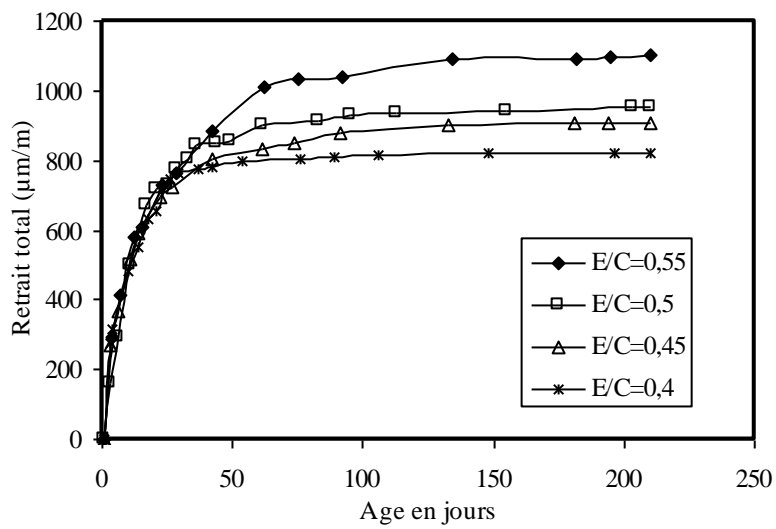


Figure 3.14 : Evolution du retrait à base du ciment C2 pour différents rapports E/C

3.5. Effet d'échelle

Afin de mieux cerner l'effet d'échelle sur l'évolution des résistances mécaniques et le retrait libre, les résultats obtenus des différents essais de compression et de retrait sur les éprouvettes de dimensions variables sont illustrés ci après, l'effet de type de ciment et le milieu environnant sont étudiés séparément.

3.5.1. Résistance à la compression

Les résistances à la compression mesurées sur des cubes de différentes dimensions confectionnées avec les deux types de ciment et conservées à l'air libre et sous l'eau sont représentées sur les figures 3.15 et 3.16. Pour le béton à base de ciment C1, l'effet d'échelle est plus significatif pour les cubes de petites dimensions. A 28 jours, le béton conservé sous l'eau voit sa résistance diminuée de 52.6 à 40 MPa lorsqu'il est coulé respectivement dans des cubes de 7 et 10 cm. Par contre, sa résistance n'est que 32.6 MPa lorsqu'il se trouve coulé dans des cubes de 20 cm. D'après les résultats illustrés sur la figure 3-15, il est clair que le type de cure possède une influence considérable sur la sensibilité des résistances mécaniques à l'effet d'échelle. Le béton conservé à l'air libre est moins sensible à la taille des éprouvettes où la résistance mécanique diminue linéairement avec l'augmentation de la taille des éprouvettes pour tous les âges testés.

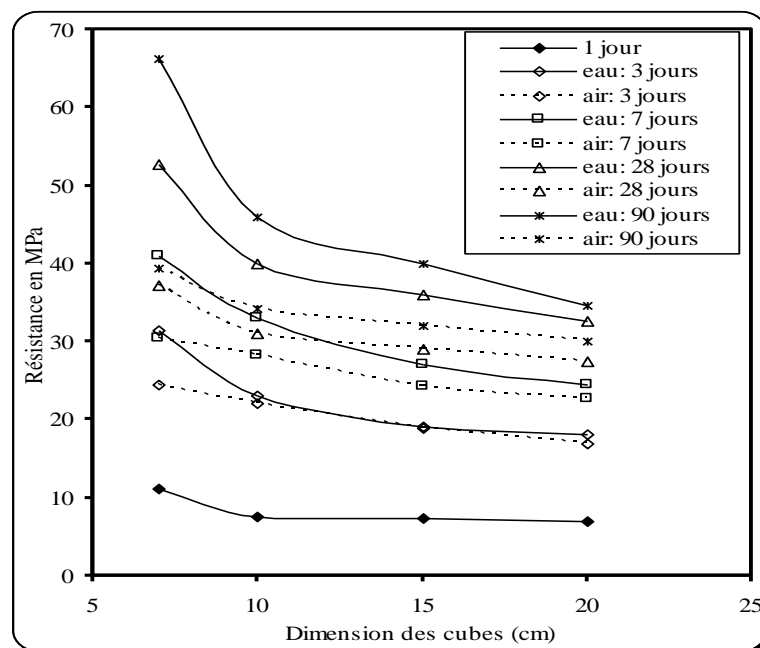


Figure 3.15 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la taille des cubes (ciment C1, E/C=0.5)

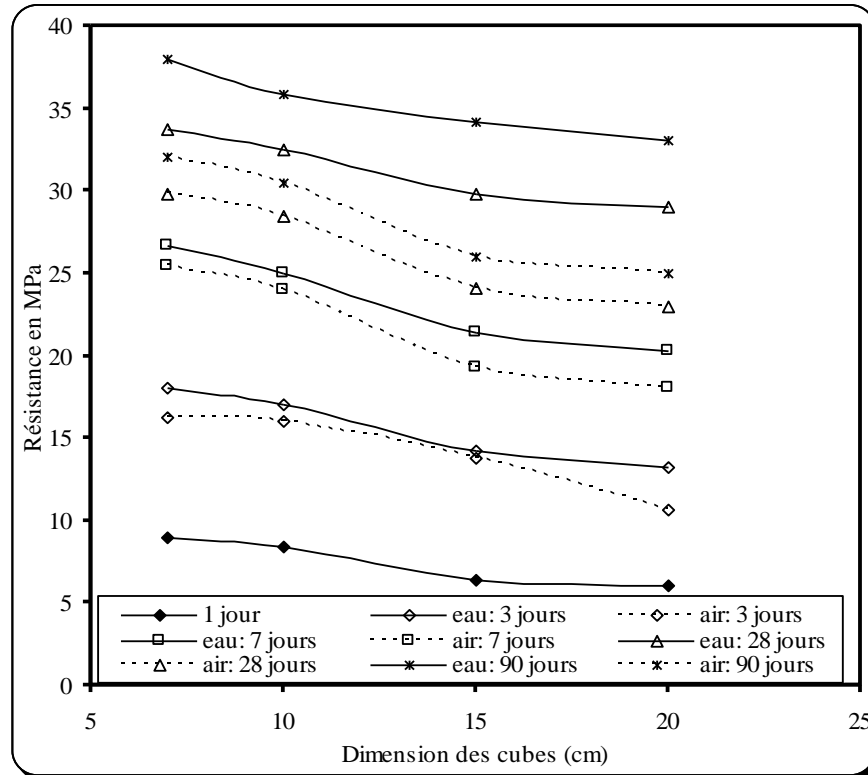


Figure 3.16 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la taille des cubes (ciment C2, E/C=0.5)

Les résistances à la compression du béton à base de ciment C2 sont représentées sur la figure 3.16 en fonction de la taille des éprouvettes et pour les deux milieux de conservation. L'effet d'échelle garde le même effet pour tous les âges et les deux milieux de conservation où les résistances décroissent linéairement avec l'augmentation de la taille des cubes. A 28 jours d'âge, on a enregistré sous une conservation humide une chute de résistance de 4.7 MPa entre les cubes de 7 et 20 cm. Par contre à l'air libre la chute était de 6.8 MPa.

Le type de ciment et le milieu de conservation des éprouvettes jouent un rôle primordial sur l'effet d'échelle. La figure 3.17 illustre une comparaison des résistances à la compression d'un ciment à base de calcaire (C1) avec celles d'un ciment à base de pouzzolane naturelle (C2). Sous une cure humide, le ciment C2 subit une diminution linéaire de la résistance à la compression au fur et à mesure que la taille des éprouvettes augmente. Le ciment C1 est plus sensible à la dimension des éprouvettes où une chute importante est enregistrée pour les faibles dimensions ensuite la diminution reste identique que celle d'un ciment C2. L'écart des résistances des deux types de ciment est directement lié à la taille de l'éprouvette testée, il varie de 20 MPa pour un cube de 7 cm à 3 MPa pour un cube de 20 cm. De ceci, on peut conclure que l'augmentation de la

taille des éprouvettes fait converger leurs caractéristiques et notamment la résistance à la compression.

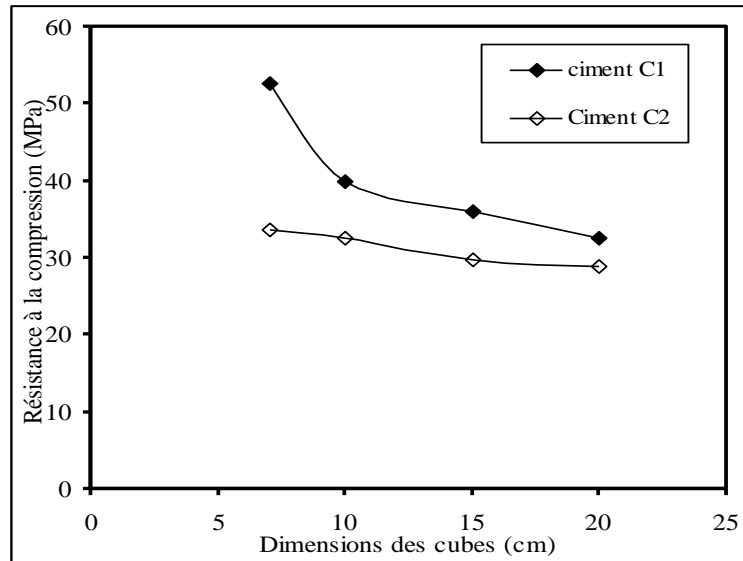


Figure 3.17 : Effet du type de ciment sur l'effet d'échelle en compression sous une cure humide. (t=28 jours, E/C=0.5)

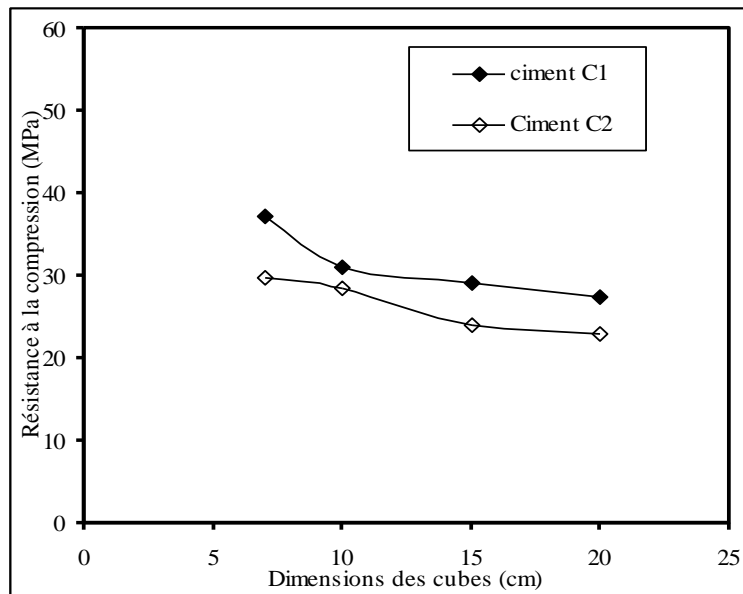


Figure 3.18 : Effet du type de ciment sur l'effet d'échelle en compression sous une cure à l'air libre. (t=28 jours, E/C=0.5)

Lorsque les éprouvettes sont conservées à l'air libre et soumises à la dessiccation leurs résistances sont plus proches et l'écart est pratiquement identique pour toutes les tailles d'éprouvettes. L'effet d'échelle garde la même influence pour les deux types de ciment avec une diminution linéaire sur la plage des valeurs testées figure 3.18.

A 28 jours, le béton au ciment C1 enregistre une chute de résistance de 5.5 MPa entre un cube de 10 et celui de 20 cm. Cette chute n'est que de 3.5 MPa pour le béton à base de ciment C2.

3.5.2. Retrait libre

Le retrait libre est mesuré sur des éprouvettes prismatiques de différentes dimensions conservées à l'air libre sous les conditions climatiques du laboratoire. Les résultats obtenus sont représentés sur les figures 3.19 et 3.20 en représentant la moyenne de mesures de deux éprouvettes identiques dans les mêmes conditions. Le retrait des différentes éprouvettes croît rapidement dès le premier jour, après 28 jours sa vitesse décroît et ses valeurs finales se stabilisent dès qu'on dépasse quatre mois d'observation.

Après sept mois d'observation, Le béton à base de ciment C1 enregistre un retrait de 840 μm sur une éprouvette de 7 cm alors que cette valeur décroît vers 810, 722 et 640 μm lorsqu'il est coulé respectivement dans des éprouvettes de 10, 15 et 20 cm. Lorsque le béton est confectionné avec un ciment à base de pouzzolane naturelle, les mêmes constatations sont observées où l'augmentation de la taille de l'éprouvette fait diminuer le retrait. Le retrait libre observé à 7 mois est de 782, 736, 683 et 632 μm respectivement pour des éprouvettes de 7, 10, 15 et 20 cm.

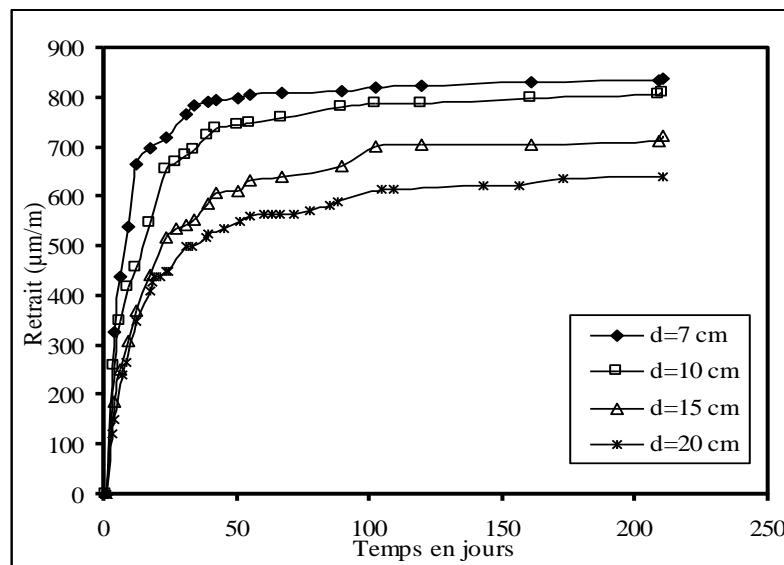


Figure 3.19 : Evolution des déformations du retrait libre d'un béton à base de ciment au calcaire (C1) pour différentes dimensions d'éprouvettes

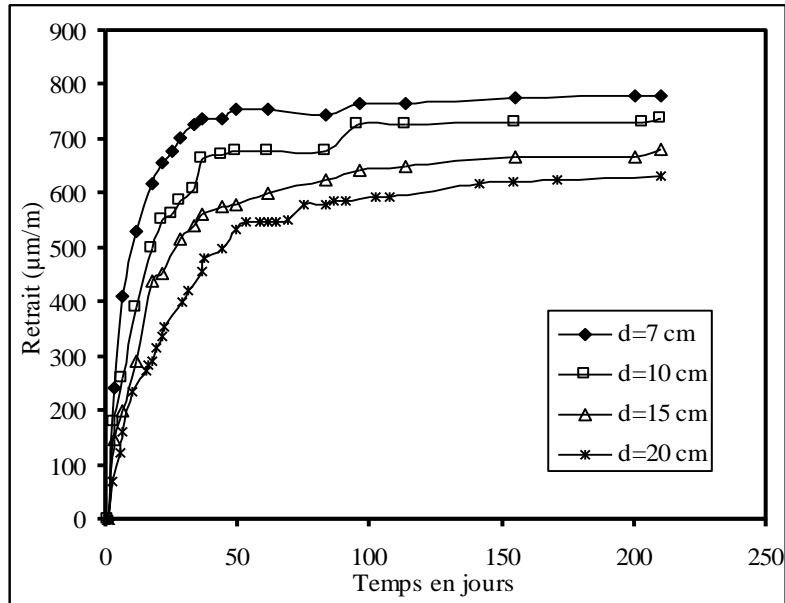


Figure 3.20 : Evolution des déformations du retrait libre d'un béton à base de ciment pouzzolanique (C2) pour différentes dimensions d'éprouvettes

En analysant la variation du retrait enregistré pour différentes tailles d'éprouvettes, on s'aperçoit sur les figures 3.21 et 3.22 une régression linéaire pour les deux types de béton. Dans la plage des valeurs enregistrées, on peut évaluer le retrait par une droite décroissante en fonction de la taille de l'éprouvette.

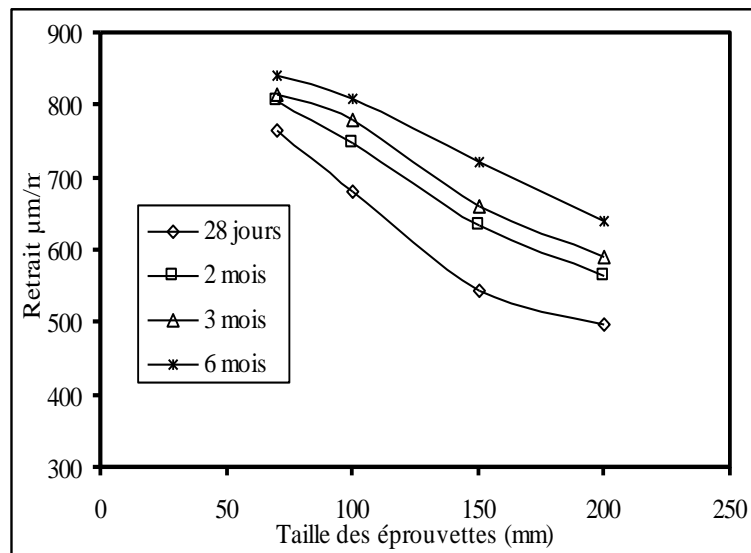


Figure 3.21 : Variation de la valeur du retrait en fonction de la taille des éprouvettes d'un béton à base de ciment C1

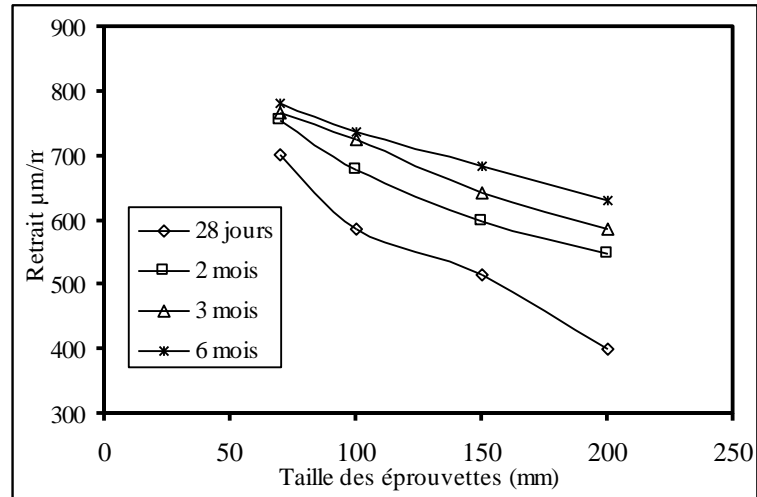


Figure 3.22 : Variation de la valeur du retrait en fonction de la taille des éprouvettes d'un béton à base de ciment C2

Sur la figure 3.23, on a représenté les valeurs de retrait des deux bétons à 28 jours et à 6 mois. Le béton à base de ciment C1 génère plus de retrait que celui à base de ciment C2 à tous les âges d'observation. L'effet d'échelle est plus marquant à long terme où à six mois et pour des éprouvettes de 200 mm le retrait des deux bétons ne diffère que de 10 µm.

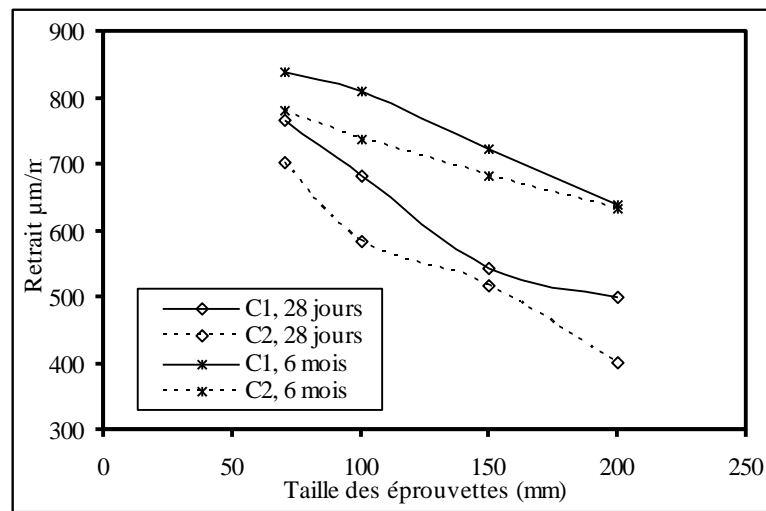


Figure 3.23 : Comparaison de l'effet d'échelle sur le retrait entre les deux ciments

3.6. Conclusion

Les résultats d'essai de compression obtenus permettent de conclure que :

- l'évolution des résistances mécaniques est fortement liée au type de cure des éprouvettes.
- Les rapports E/C plus élevés donnent souvent des retraits importants, en raison de la quantité d'eau évaporable présentée dans ces bétons.
- les résistances à la compression de différentes éprouvettes montrent un effet d'échelle significatif, de plus, cet effet est influé par la composition du béton et les conditions de conservation.
- Les différents ciments utilisés montrent l'influence de celles-ci sur la portance de l'effet d'échelle. De même, les résultats d'essais de mesure des déformations du retrait montrent l'existence d'un tel effet d'échelle, les prismes minces exhibent des retraits importants, par contre, le retrait des prismes larges est parfaitement négligeable.

Des analyses plus précises sur les résultats obtenus seront présentées dans le chapitre suivant.

Chapitre IV :

Analyse et discussion des résultats

4.1. Introduction

Les propriétés du béton dépendent essentiellement de sa composition telle que le rapport E/C et des conditions de cure. Néanmoins certains paramètres se trouvent très influencés par la taille des éprouvettes testées. Certains travaux ont mis en évidence ces paramètres et l'ont jugé le plus responsable de la variation de certaines propriétés.

La résistance à la compression est aussi affectée par les dimensions des éprouvettes où le comportement quasi fragile du béton engendre des chutes de résistance au fur et à mesure que la taille des échantillons testés augmente.

Le retrait est très sensible à l'effet d'échelle où ses valeurs se multiplient pour les pièces minces. Ce comportement est généralement lié à la migration de l'eau à travers les interstices du béton et le temps nécessaire à leur échappement. Ce travail vise à trouver des relations entre les propriétés du retrait et la résistance à la compression avec la taille des éléments expérimentés.

4.2. Effet de la cure sur les résistances mécaniques

4.2.1. Ciment de Chlef C1

En représentant les résistances mécaniques d'un béton conservé à l'air libre et ceux d'un béton conservé dans l'eau, on remarque sur la figure 4.1 une relation linéaire pour des résistances inférieures à 30MPa. Cette relation est plus valable si le béton était malaxé avec un faible rapport E/C. D'après ces résultats, les bétons à faible rapport E/C résistent mieux aux agressivités dues à la dessiccation.

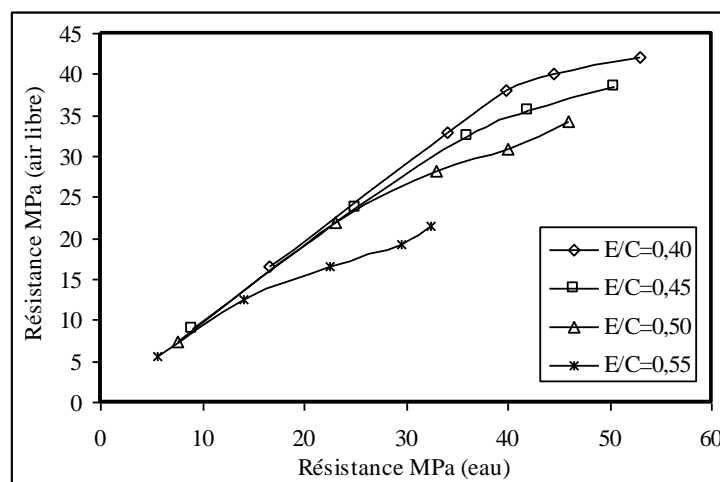


Figure 4.1 : Comparaison des résistances à la compression d'un béton conservé dans l'eau et à l'air libre pour le ciment C1 avec différents rapports E/C

On peut facilement trouver une corrélation donnant les résistances à l'air libre quelque soit l'âge d'observation et quelque soit le rapport E/C. Cette relation est donnée comme suit :

$$R(\text{air libre}) = 0.83 R(\text{eau}) \quad R^2=0.9233$$

Cette relation est donnée avec un coefficient de corrélation égal à 0.923 ce qui justifie ce choix. Il est évident que le béton durci à l'air libre est exposé à la dessiccation qui conduit à la fissuration et au freinage de la réaction d'hydratation. Selon les résultats trouvés, on peut s'attendre à une chute de résistance de 17% si aucune cure humide n'a été préconisée.

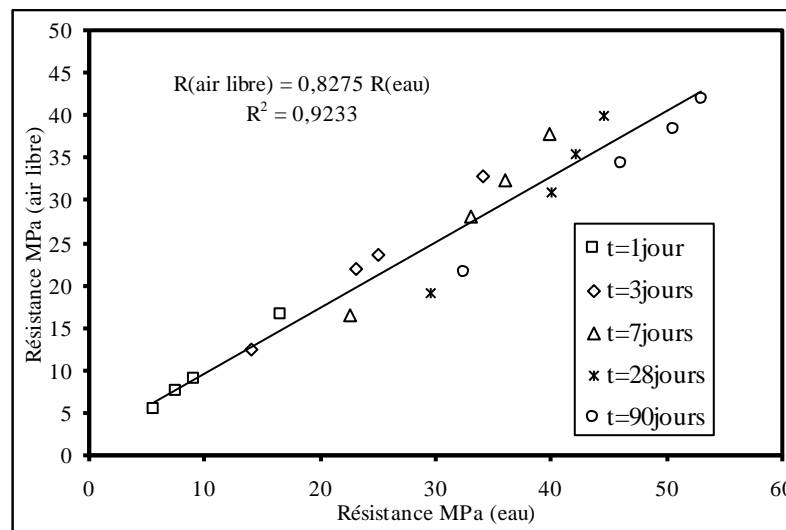


Figure 4.2 : Corrélation des résistance à la compression d'un béton conservé à l'air libre en fonction de celles d'un béton conservé dans l'eau et pour le ciment C1.

4.2.2. Ciment de Zahana C2

La figure 4.3 illustre la variation des résistances à la compression entre une cure humide et l'autre sèche. Il s'avère que les résistances inférieures à 30MPa sont affectées d'une chute proportionnelle. Au-delà de cette valeur, le rapport E/C influe largement sur la baisse de résistance à la compression où les fortes valeurs génèrent une chute plus prononcée comparée au faible rapport E/C de 0.4 qui garde une variation linéaire.

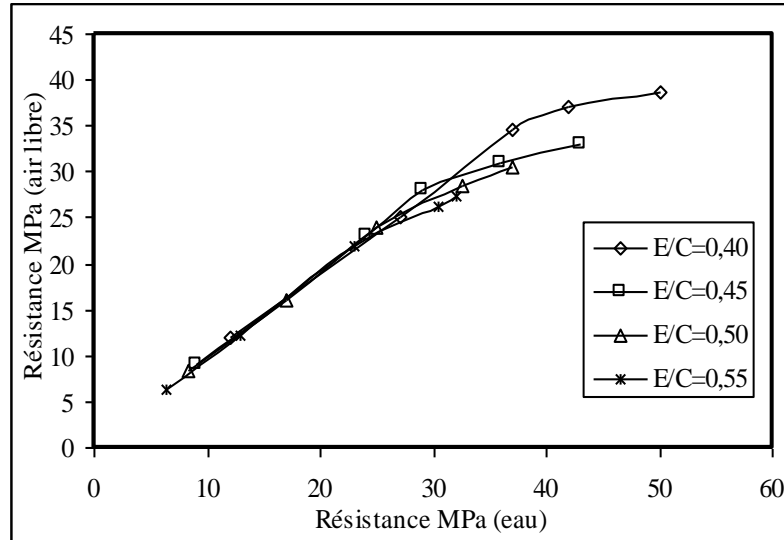


Figure 4. 3 : Comparaison des résistances à la compression d'un béton conservé dans l'eau et à l'air libre pour le ciment C2 avec différents rapports E/C

La représentation des résultats sur la figure 4.4 montre une variation linéaire entre la résistance d'un béton conservé dans l'eau et d'un béton conservé à l'air libre. Ceci montre que l'effet de l'âge et de la composition du béton est presque marginal. La résistance d'un béton à base d'un ciment pozzolannique possède une simple chute de résistance lorsque il est sous une dissiccation modérée, sa valeur est donnée par la relation suivante :

$$R(\text{air libre}) = 0.83 R(\text{eau}) \quad R^2=0.9557$$

Le coefficient de corrélation est proche de l'unité ($R^2=0.956$) et qui enregistre une résistance à l'air libre égale à 87% que celle d'un béton sous une cure humide. La nature de ciment joue un rôle important dans la préservation des caractéristiques d'un béton lorsqu'il est soumis à des conditions climatiques sévères.

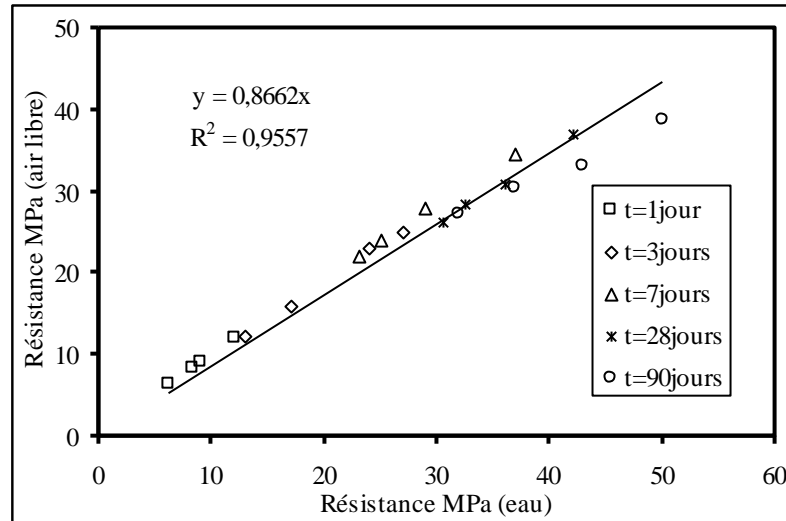


Figure 4.4 : Corrélation des résistances à la compression d'un béton conservé à l'air libre en fonction de celles d'un béton conservé dans l'eau et pour le ciment C2

4.3. Effet du rapport E/C

La figure 4-5 représente l'évolution des résistances des éprouvettes durcies sous l'eau et celles conservées à l'air libre pour différents rapports E/C. Pour un rapport E/C fixe, l'effet du type de cure ne se manifeste qu'à partir d'une certaine valeur de la résistance à la compression. Pour un rapport E/C faible de 0.4, les deux types de ciments résistent à l'effet de dessiccation et conservent des résistances identiques mais à partir d'une certaine valeur de 40MPa une nette chute est observée et l'effet de la dessiccation ne peut plus être évité. Cette valeur limite décroît avec l'accroissement de E/C vers 30, 25 et 15 MPa respectivement pour un rapport E/C de 0.45, 0.5 et 0.55. On peut observer facilement que le type de ciment joue un rôle fondamental contre l'effet néfaste de la dessiccation. Le ciment C1 à base de calcaire se comporte mieux que le ciment C2 avec des faibles rapports E/C, cette performance s'inverse dès que les quantités d'eau de gâchage augmentent. Ceci est dû à la qualité de la pâte durcie produite par le ciment et l'addition minérale et qui offre une certaine résistance contre la baisse d'humidité.

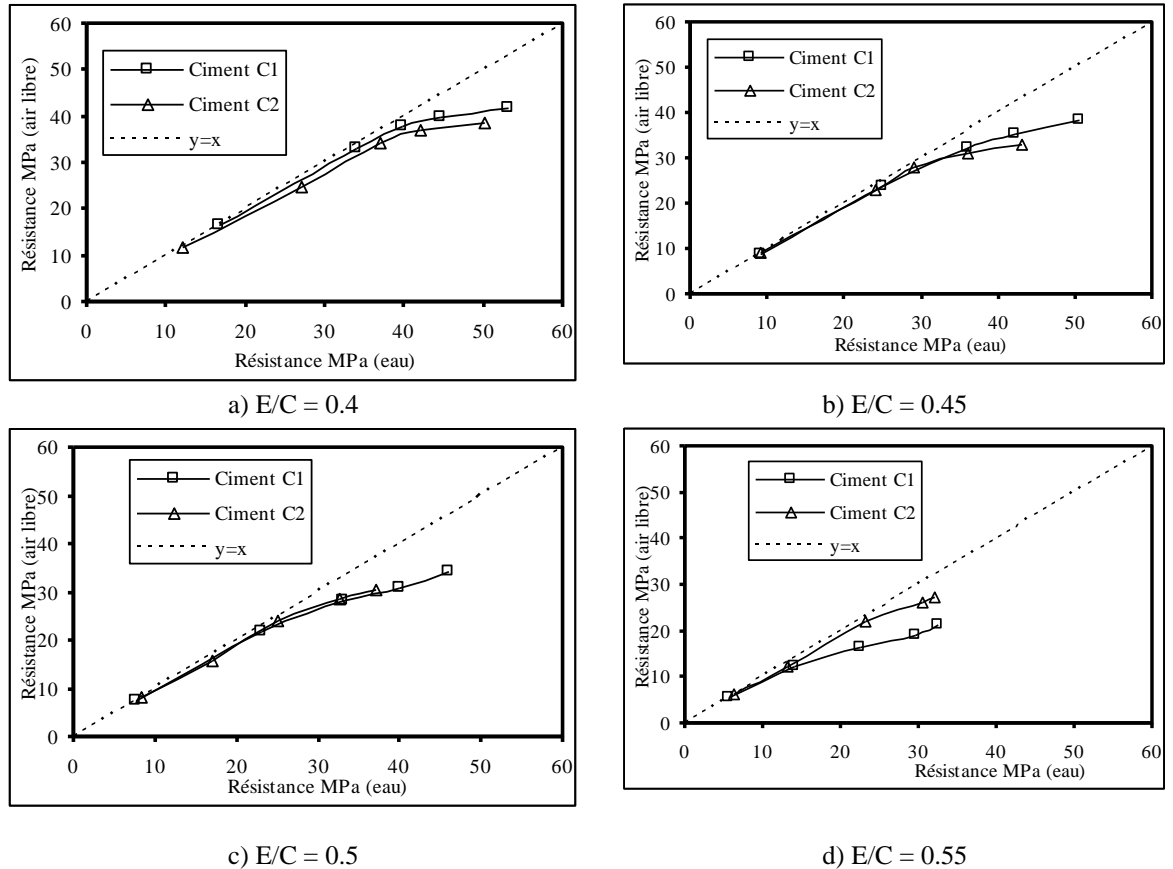


Figure 4.5 : Variation des résistances du béton conservé à l'air libre en fonction de celles du béton conservé dans l'eau pour divers rapport E/C et les deux types de ciments.

4.4. Effet de l'âge

L'effet du type de cure sur le développement des résistances mécaniques est directement lié au type de ciment et à l'âge des éprouvettes. Il apparaît d'après la figure 4.6 que la chute de résistance due à un séchage reste proportionnelle à l'âge. A trois jours, les éprouvettes ne subissent aucune perte de résistance pour les deux types de ciments utilisés. A sept jours, Le ciment C1 montre une plus grande sensibilité tandis que le ciment C 2 garde des résistances presque identiques pour les deux types de cure. Il s'avère que les ciments pouzzolaniques possèdent une matrice plus dense et moins poreuse pour retenir de l'eau et empêchent la dessiccation. Au-delà de 28 jours, l'effet du type de cure est plus marquant et la dessiccation affecte considérablement les résistances quelque soit le type de ciment utilisé.

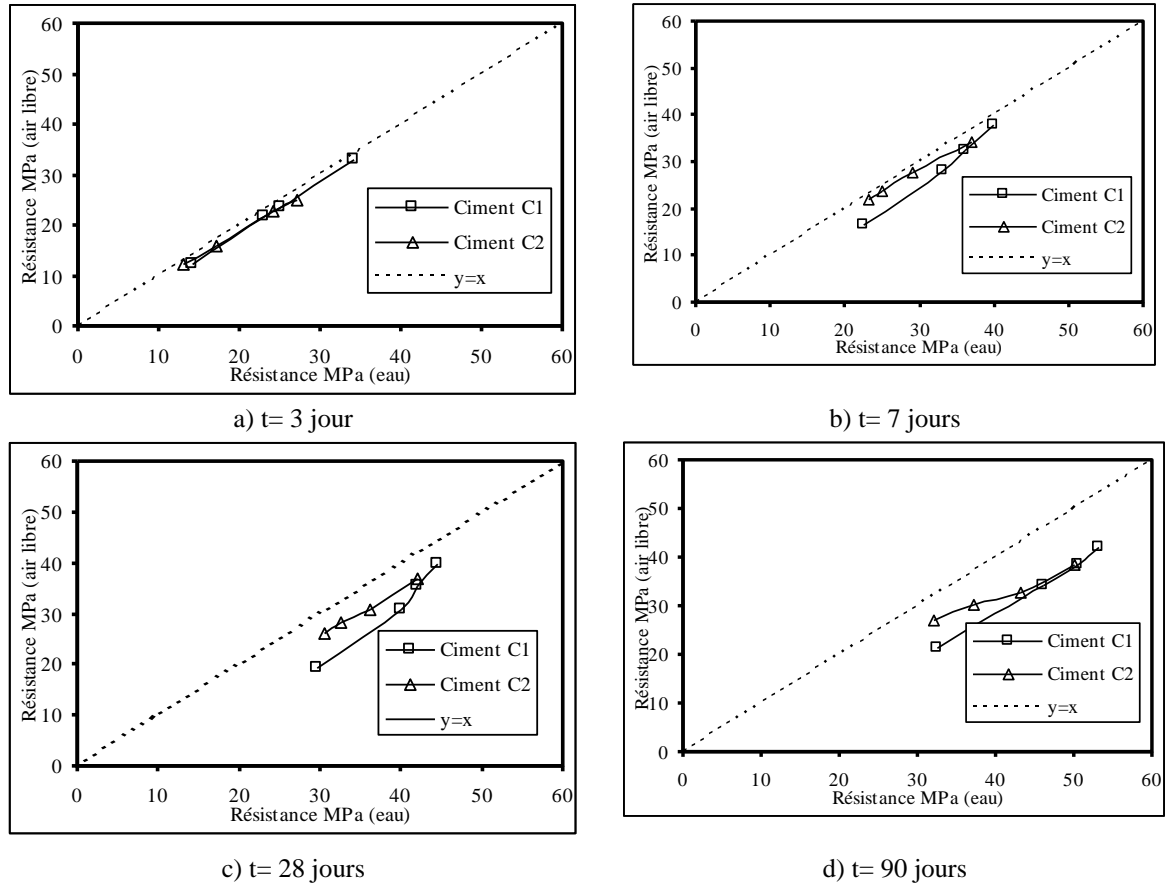


Figure 4.6 : Variation des résistances du béton conservé à l'air libre en fonction de celles du béton conservé dans l'eau pour divers âges du béton et les deux types de ciments.

4.5. Modèle de Féret

La résistance à la compression est une propriété dont l'équivalence doit être toujours prise en considération. Pour cela, on utilise le modèle de Féret pour la prévision de cette résistance sur un mortier ou un béton sans addition minérale.

$$R = K_F \left(\frac{c}{c + e + v} \right)^2$$

avec :

c, e, et v les volumes de ciment, d'eau et d'air occlus dans le mortier à l'état frais.

K_f : coefficient dépendant du squelette granulaire et de la classe de ciment.

Ecrivant cette dernière relation en remplaçant les volumes par leurs expressions équivalentes et en considérant que le volume d'air est proportionnel au volume d'eau, on trouve:

$$R_o = K_F \left(\frac{\frac{C_o}{\rho_c}}{\frac{C_o}{\rho_c} + \frac{E}{\rho_e} + y \frac{E}{\rho_e}} \right)^2 = \frac{K_F}{\left(1 + \frac{E}{C_o} d_c (1 + y) \right)^2}$$

Avec d la densité de ciment ($d=3.1$) et y un coefficient dépendant de la consistance du béton et qui prend la valeur $y=0.1$ pour une consistance normale. La corrélation des résultats obtenus par le modèle de Féret est illustrée sur les figures 4.7, 4.8, 4.10 et 4.11 pour les deux types de ciments. Il s'avère que le ciment C2 s'accorde mieux avec le modèle de Féret où les coefficients de corrélation sont largement supérieurs et s'approchent davantage de l'unité.

La variation du coefficient K_f est donnée sur les figures 4.9 et 4.12 pour le ciment C1 et C2 où une comparaison entre les deux modes de cures est présentée. Ceci prouve qu'un ciment à base de pouzzolane naturelle résiste mieux aux conditions de cure sévères caractérisées par une forte dessiccation.

Tableau 4.1 : Résultats de la corrélation des résistances à la compression par la loi de Féret.

Type de ciment	temps	Cure dans l'eau		Cure à l'air libre	
		K_f	R^2	K_f	R^2
Ciment C1	1	67,484	0,539	67,484	0,539
	3	165,39	0,722	157,58	0,6834
	7	222,74	0,8299	197,71	0,7348
	28	262,8	0,7743	214,93	0,7709
	90	307,76	0,8052	232,14	0,7697
Ciment C2	1	60,957	0,8481	60,957	0,8481
	3	139,16	0,7669	130,82	0,7564
	7	193,55	0,9204	183,94	0,9531
	28	237,28	0,943	206,75	0,9532
	90	274,32	0,9859	218,2	0,9671

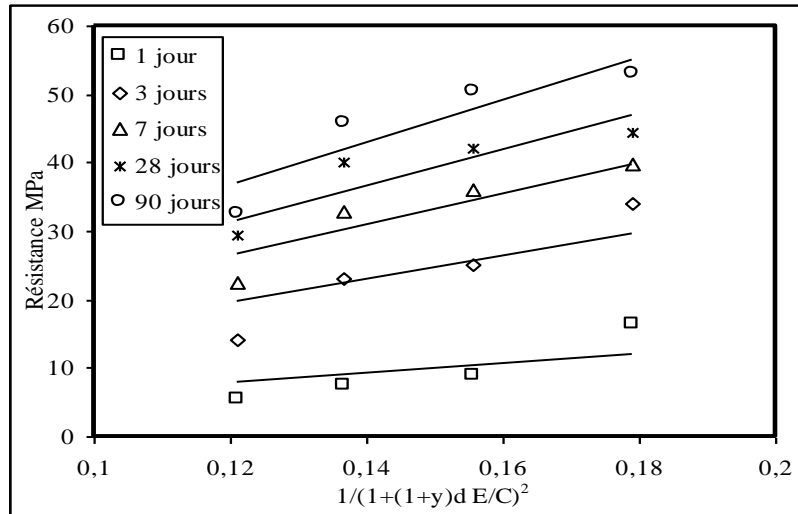


Figure 4.7 : Corrélation des résistances à la compression du ciment C1 selon le modèle de Féret pour une cure sous l'eau.

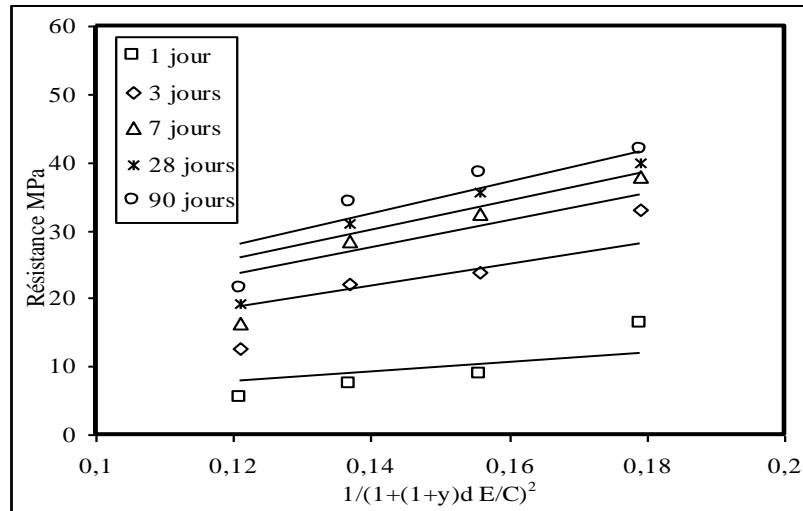


Figure 4.8 : Corrélation des résistances à la compression du ciment C1 selon le modèle de Féret pour une cure à l'air libre.

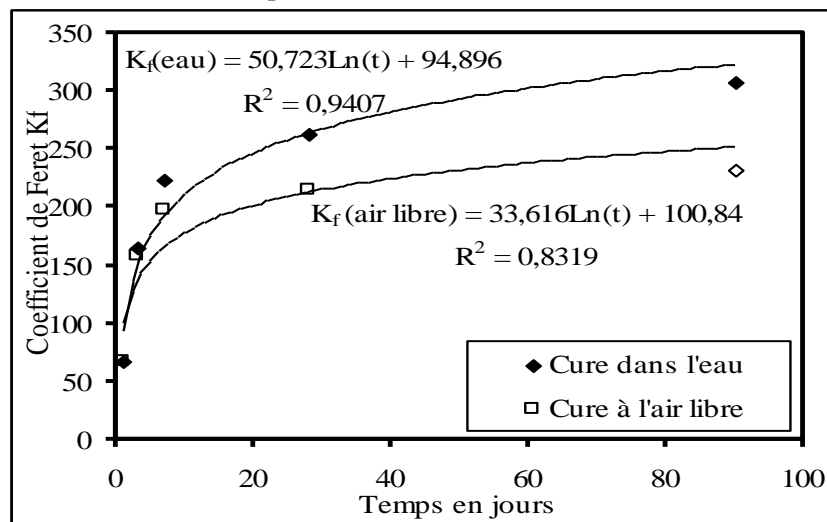


Figure 4.9 : Evolution du coefficient Kf pour le ciment C1 suivant les deux types de cure.

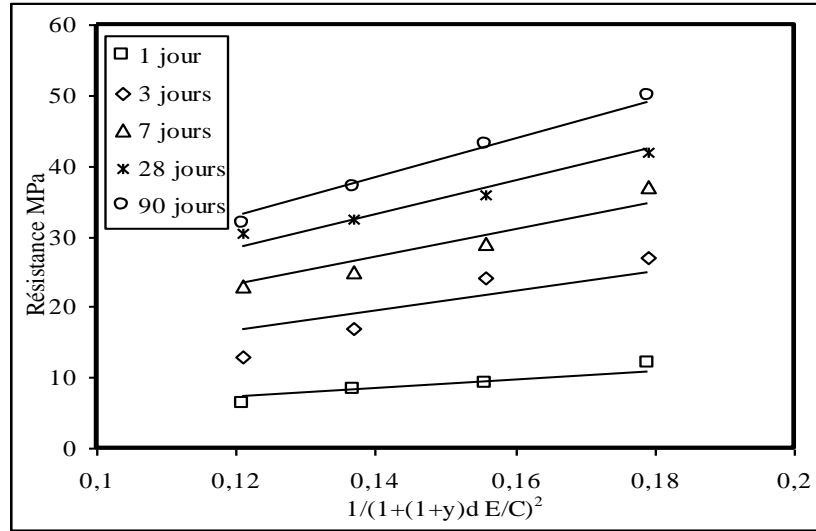


Figure 4.10 : Corrélation des résistances à la compression du ciment C2 selon le modèle de Féret pour une cure sous l'eau.

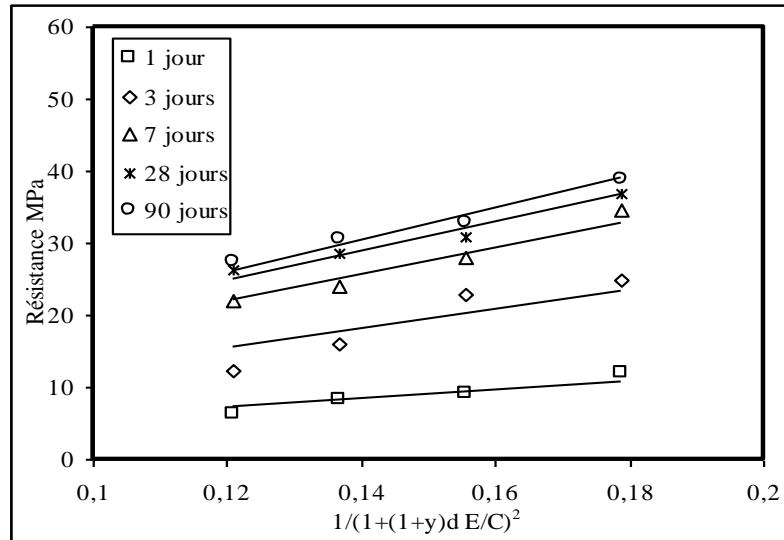


Figure 4.11 : Corrélation des résistances à la compression du ciment C2 selon le modèle de Féret pour une cure à l'air libre.

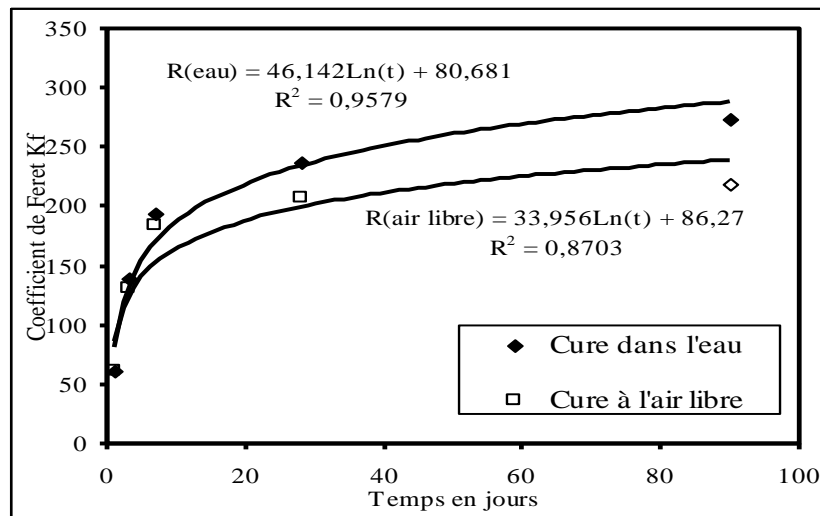


Figure 4.12 : Evolution du coefficient K_f pour le ciment C2 suivant les deux types de cure.

4.6. Résultats du retrait

Le retrait est généralement proportionnel au rapport E/C où l'évaporation de l'excès d'eau provoque un rétrécissement des vides capillaires. Ce retrait induit un état de contrainte dans la matrice qui peut entraîner des fissures et dégrader l'état du béton. En représentant la variation du retrait en fonction de celle correspondant à E/C égal à 0,5, la figure 4.13 montre une relation linéaire du retrait à base de ciment C1. La figure 4.14 montre qu'en diminuant le rapport E/C on obtient un retrait moins important tel qu'une diminution de la quantité d'eau de 10% entraîne une chute de retrait de plus de 9%.

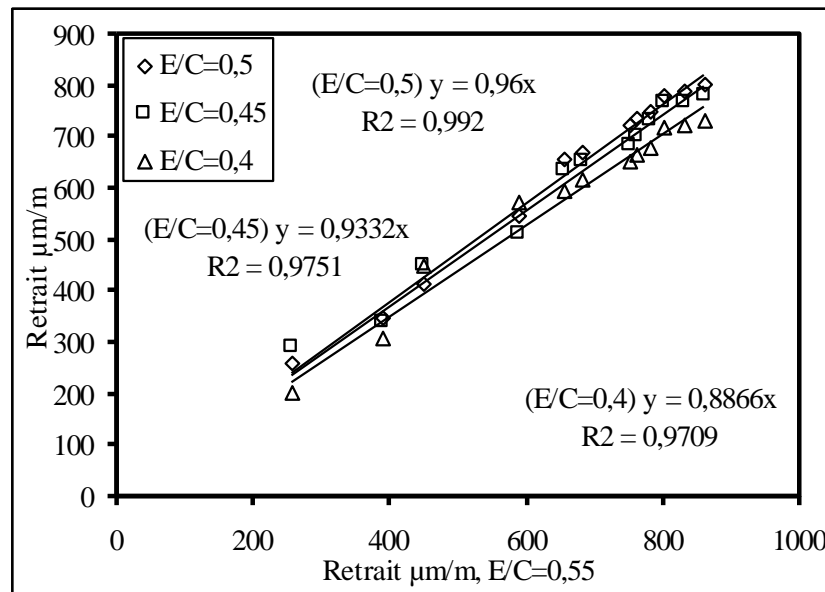


Figure 4.13 : Variation du retrait des éprouvettes en fonction de E/C=0,55.

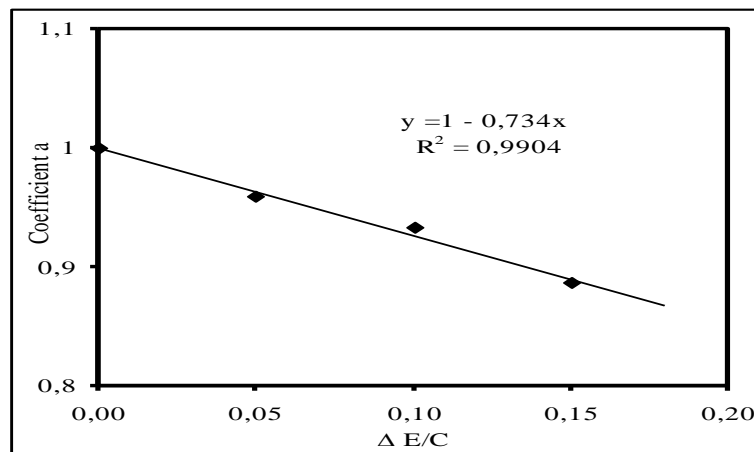


Figure 4.14 : Variation du coefficient a en fonction de la réduction de E/C.

En faisant la même opération pour le ciment C2, La figure 4.15 illustre des variations des retraits avec différents rapports E/C. La figure 4.16 donne une diminution linéaire du retrait avec la diminution du rapport E/C tel qu'on obtient pour une chute de 14% pour une diminution de E/C de 10%. Ceci montre que le ciment C2 à base de pouzzolane

naturelle est très sensible au rapport E/C et le manque d'eau provoque une dégradation de la microstructure et une plus grande dessiccation comparativement au ciment C1.

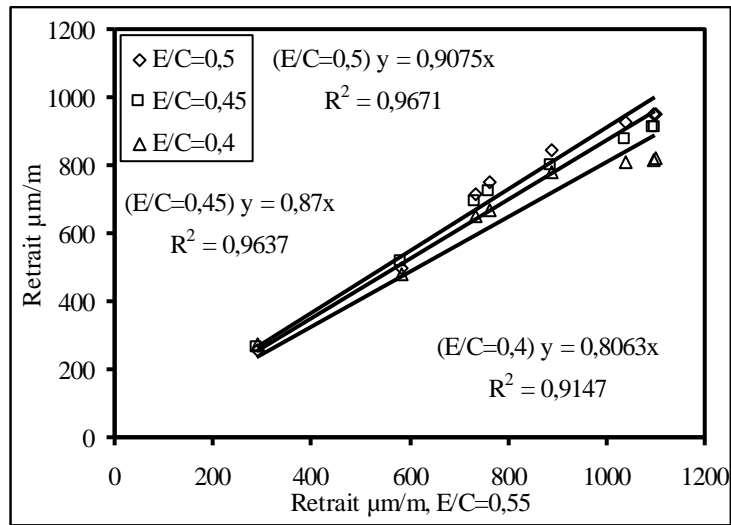


Figure 4.15: Variation du retrait des éprouvettes en fonction de E/C=0.55.

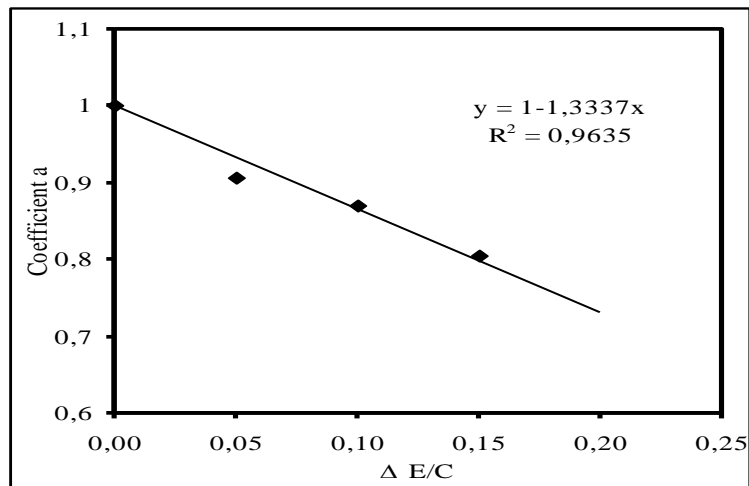


Figure 4.16: Variation du coefficient a en fonction de la réduction de E/C.

4.7. Effet d'échelle

4.7.1. Résistance à la compression

L'effet d'échelle de la compression simple du béton est testé sur des cubes de 7, 10, 15 et 20 cm en béton confectionné avec deux types de ciment avec un rapport E/C de 0.5.

Bazant [17] proposa une formule simple reliant la résistance R en fonction de la dimension de l'éprouvette d , cette formule est donnée par :

$$R = c_1 d^{-2/5} + c_0$$

Avec c_1 et c_0 deux constantes à déterminer en fonction du type de béton et l'âge des éprouvettes. Les figures 4.17 et 4.18 représentent la variation des résistances en fonction de $(d^{-2/5})$ où leurs variations sont quasiment des formes linéaires avec des coefficients de corrélations qui s'approchent parfaitement à l'unité.

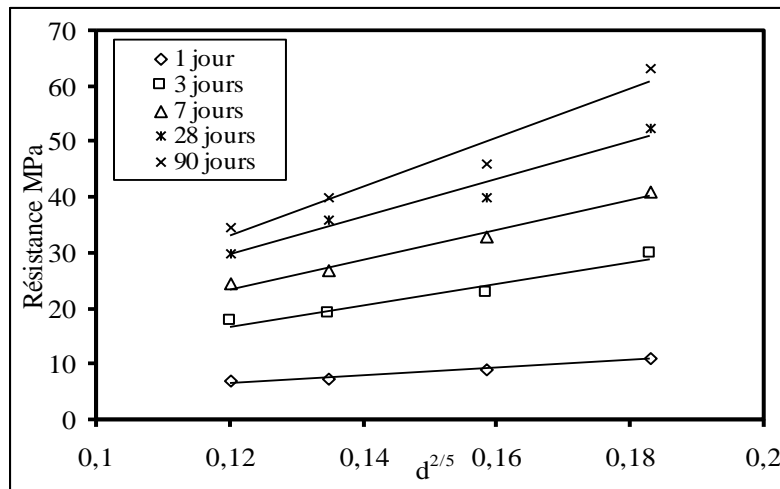


Figure 4.17: Variation des résistances mécaniques en fonction de la taille des éprouvettes pour un béton à base de ciment C1 conservé dans l'eau.

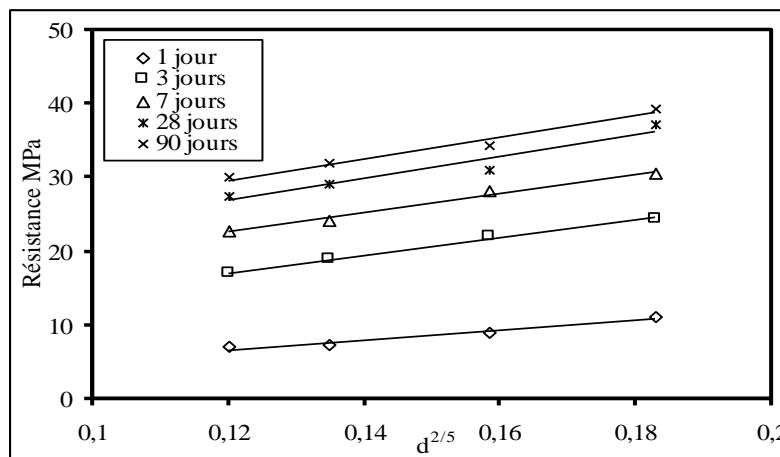


Figure 4.18: Variation des résistances mécaniques en fonction de la taille des éprouvettes pour un béton à base de ciment C1 conservé dans l'air

Les coefficients c_1 et c_0 de cette régression sont illustrés sur les figures 4.19 et 4.20. Leur variation est monotone pour les deux régimes de cure avec une dégradation du coefficient correspondant à la cure à l'air libre. Cette cure rend la dessiccation plus favorable par la peau causant ainsi une fissuration et un arrêt de l'hydratation. Par contre le coefficient c_0 prend une variation opposée par rapport à la cure, ceci se traduit par un effet important de la cure pour les éléments de faibles dimensions.

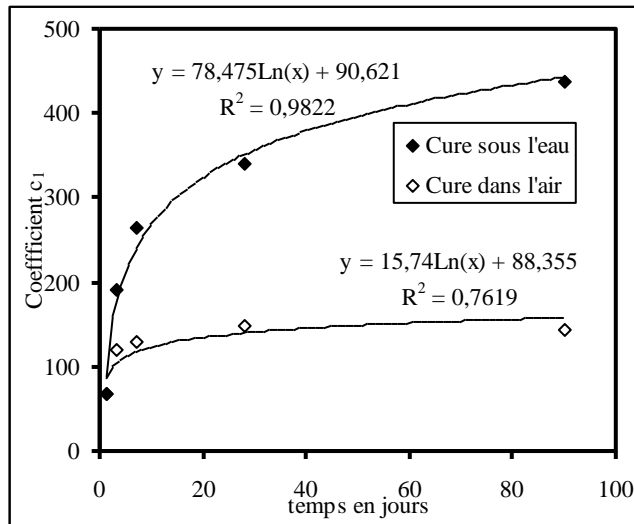


Figure 4.19: Variation du coefficient c_1 en fonction du temps (ciment C1)

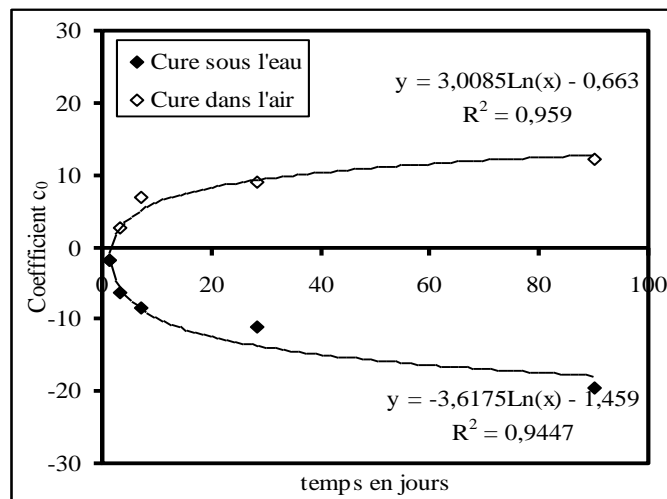


Figure 4.20: Variation du coefficient c_0 en fonction du temps (ciment C1)

En appliquant la même formule de Bazant aux résultats de la résistance à la compression du ciment C2 composé de la pouzzolane naturelle, on a trouvé les corrélations représentées sur les figures 4.21 et 4.22. La variation des résistances donne des courbes parfaitement linéaires décrites par la formule suivante :

$$R = c_1 d^{-2/5} + c_0$$

Avec c_1 et c_0 deux constantes à déterminer en fonction du type de béton et l'âge des éprouvettes. Les figures 4.21 et 4.22 représentent la variation des résistances en fonction de $d^{-2/5}$ où leurs variations sont quasiment des formes logarithmiques avec des coefficients de corrélations qui s'approchent parfaitement à l'unité.

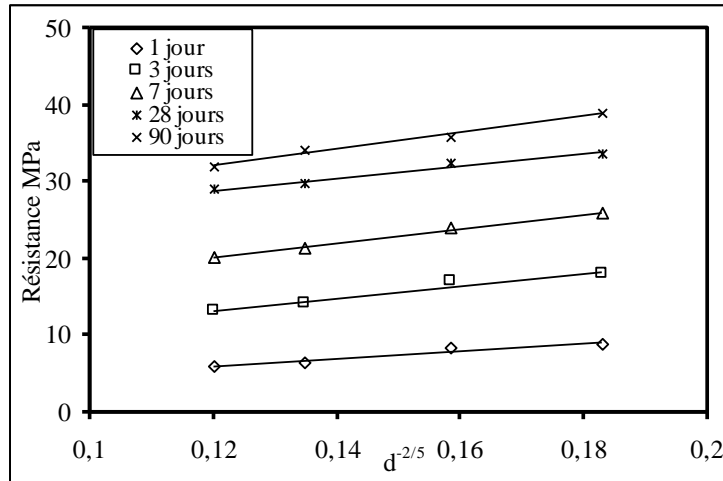


Figure 4.21: Variation des résistances mécaniques en fonction de la taille des éprouvettes pour un béton à base de ciment C2 conservé dans l'eau.

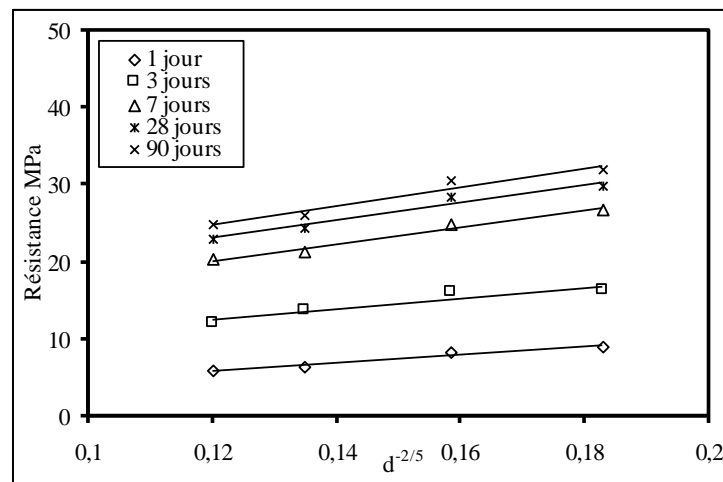


Figure 4.22: Variation des résistances mécaniques en fonction de la taille des éprouvettes pour un béton à base de ciment C2 conservé dans l'air.

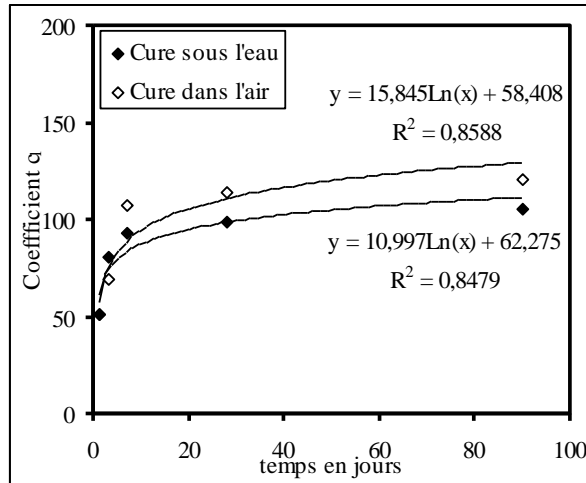


Figure 4.23: Variation du coefficient c_1 en fonction du temps (ciment C2).

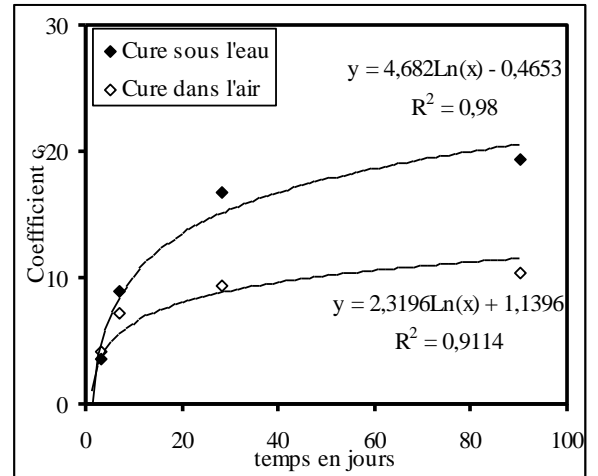


Figure 4.24: Variation du coefficient c_0 en fonction du temps (ciment C2).

4.7.2. Retrait libre

La variation du retrait libre est inversement proportionnelle à la taille de l'éprouvette. Ceci est dû à la distance importante que doit parcourir une molécule d'eau pour s'échapper à travers les pores capillaires. Les résultats illustrés sur les figures 4.25 et 4.26 montrent bien des droites dont la pente est largement dépendante de l'âge du béton. En faisant la même corrélation de Bazant on trouve la formule simple suivante :

$$\text{Ret} = a d^{-2/5} + b$$

Avec a et b deux constantes à déterminer en fonction du type de béton et l'âge des éprouvettes. Les figures 4.25 et 4.26 représentent la variation des déformations du retrait en fonction de $d^{-2/5}$ où leurs variations sont quasiment des formes logarithmiques avec des coefficients de corrélations qui s'approchent parfaitement à l'unité.

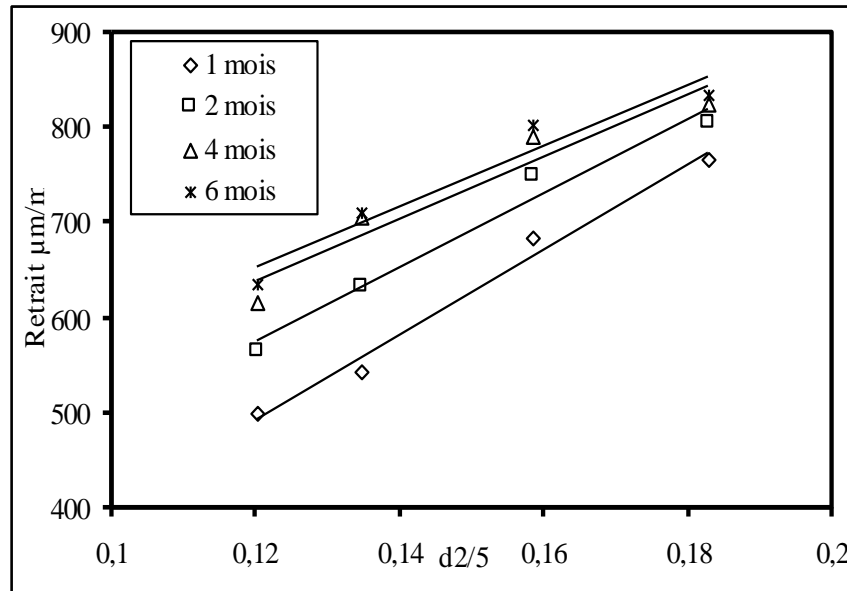


Figure 4.25: Variation du retrait libre en fonction de la taille des éprouvettes pour un béton à base de ciment C1 conservé dans l'air.

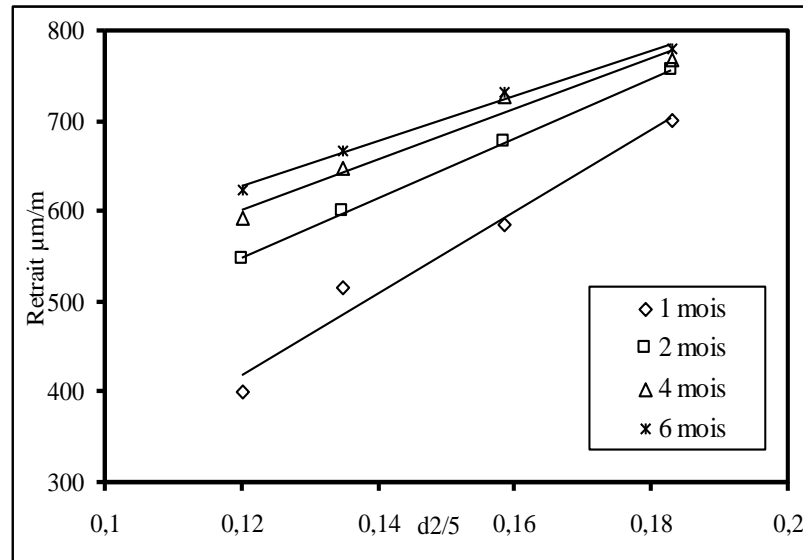


Figure 4.26: Variation du retrait libre en fonction de la taille des éprouvettes pour un béton à base de ciment C2 conservé dans l'air.

En comparant le retrait libre de différents types de ciment, on constate que le retrait est nettement diminué en présence de la pouzzolane dont le ciment (C2). L'effet d'échelle est presque identique à un mois où les droites correspondantes sur les figures 4.27 et 4.28 sont parallèles. A sept mois l'effet d'échelle est différemment affecté selon le ciment utilisé. Pour des petites éprouvettes le retrait est inférieure en présence de la pouzzolane naturelle par contre il demeure indépendant du type de ciment lorsque on utilise des éprouvettes épaisses.

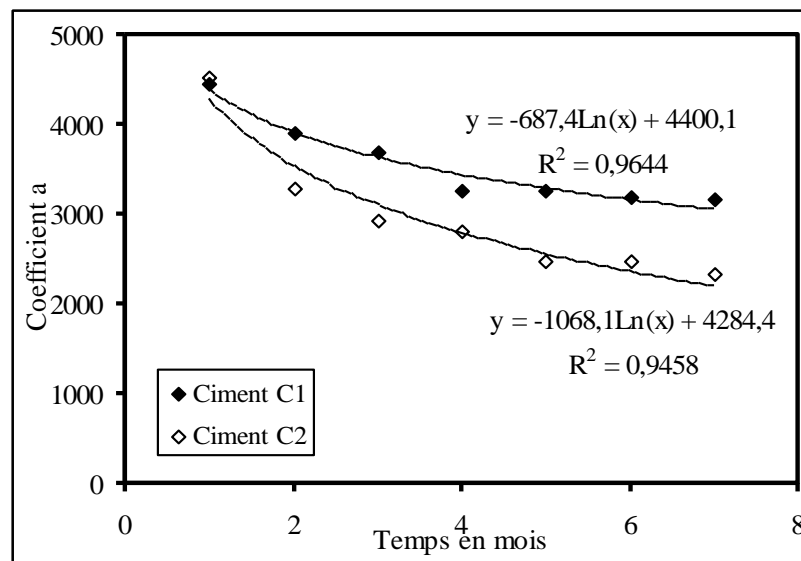


Figure 4.27: Variation du coefficient a de la formule donnant l'effet d'échelle du retrait.

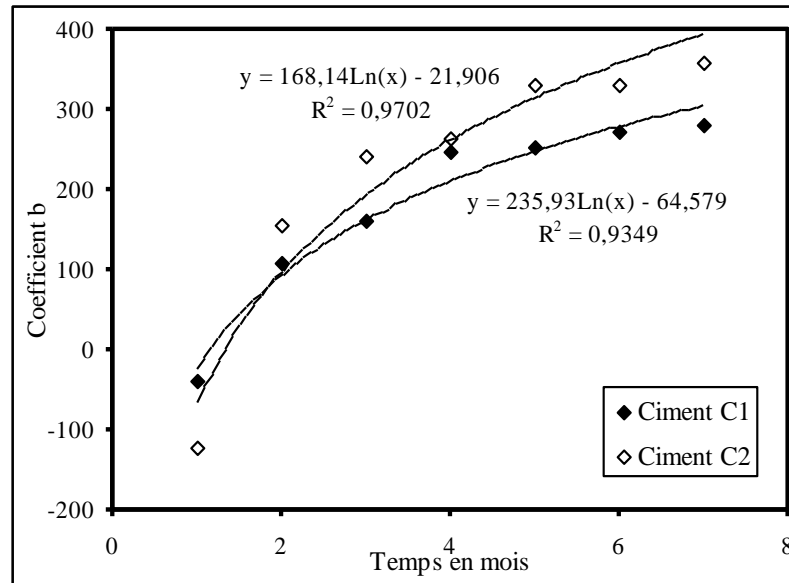


Figure 4.28 : Variation du coefficient b de la formule donnant l'effet d'échelle du retrait.

4.8. Conclusion

D'après la discussion de ces résultats, on peut conclure que les résistances mécaniques sont liées fortement à la composition du béton est principalement au rapport E/C et le mode de conservation des éprouvettes.

Les éprouvettes mûries sous une cure à l'eau présentent des résistances à la compression beaucoup meilleures que celles développées à l'air libre. La dessiccation affecte beaucoup plus les bétons qui ont un rapport E/C plus élevé, ceci s'exprime du fait qu'ils contiennent plus de quantité d'eau évaporable.

L'effet d'échelle est influé par le type de ciment, cet effet présente une ampleur plus élevée dans les ciments au calcaire que celles à la pouzzolane naturelle.

Les éprouvettes mises sous une cure à l'eau présentent un effet d'échelle plus prononcé par rapport à celles soumises dans l'air libre ; ces résultats s'accordent avec les résultats trouvés par Salah et al [30] dont les climats sévères (50°C et 5° HR), les éprouvettes de compression présentent un effet d'échelle plus important.

Les résultats obtenus s'accordent avec ceux indiquent que l'effet d'échelle sur le retrait libre du béton est peu influé par le type de ciment, les ciments C1 et C2 présentent des effets d'échelles similaires.

Conclusion générale

Conclusion générale

La présente étude a traité l'effet d'échelle sur les résistances mécaniques et le retrait de dessiccation d'un béton ordinaire. Des investigations expérimentales ont été entreprises et ont mis à l'épreuve :

- les ajouts cimentaires de calcaire et de la pouzzolane.
- de l'âge du béton et les conditions de cure du béton.
- Condition de cure du béton.

Les résultats obtenus permettent de conclure de l'effet d'échelle est bien affecté par ces paramètres.

- les ciments au calcaire présentent un effet d'échelle significatif par rapport aux ciments à la pouzzolane naturelle.
- L'effet de l'âge du béton a été également testé ; les résistances mécaniques sont d'autant plus faibles avec l'âge et suivent une fonction linéaire en allant de la plus petite taille vers la plus grande.
- Les conditions de cure produisent des changements importants sur les résistances mécaniques ; Les résistances des bétons développées sous une cure à l'eau présentent un effet d'échelle important par rapport à celles mûries à l'air libre.
- une concordance significative entre les résultats obtenus sur les résistances à la compression et le modèle d'effet d'échelle proposé par Bazant.
- En examinant les résultats de l'effet d'échelle sur le retrait, ces dernières indiquent que le retrait libre est inversement proportionnel à la taille des éprouvettes ; les éprouvettes de taille plus faible montrent des retraits plus importants.
- L'influence du type de ciment sur l'ampleur d'effet d'échelle est jugée négligeable lors qu'on compare les retraits enregistrés entre les différentes tailles d'éprouvettes.

Cependant, bien que nos observations sont incontestables sur l'effet d'échelle sur les résistances mécaniques et le retrait libre du béton, des investigations supplémentaires pourraient être envisagées afin d'évaluer son ampleur avec plus de précision. D'autre part, afin de lever certaines limitations et étendre les champs d'étude sur des compositions différentes en tenant compte d'autres types de ciment et d'autres classes de résistance des bétons employés. A cet effet on propose pour les futurs travaux de bien concentrer leurs efforts sur :

- Effet de la taille des éprouvettes sur les propriétés du béton en climat chaud
- Effet de la taille des éprouvettes sur les propriétés de durabilité
- Effet de la taille des constituants du béton sur les caractéristiques mécaniques

Références bibliographiques

- [1] Nicola PETROV ,effet combinés de différents facteurs sur l'expansion des bétons , Thèse de doctorat en sciences appliquées , Sherbrooke, Canada 2003
- [2] A. M. Neville “ Propriétés des béton” édition Eyrolles, Paris, pp. 255-296 -2000.
- [3] Norme ENV 206 « béton, spécification, performance, production et conformité »2000.
- [4] Influence des ajouts minéraux sur les résistances mécaniques et l'expansion des mortiers vis-vis les attaques aux sulfates. Thèse de magister, 2005, Univ de Msila.
- [5] .M Venuat – La pratique des ciments, mortiers et bétons – Tome 1 : « Caractéristiques des liants et des bétons, mise en oeuvre des coulis et mortiers » - édition2 – Collection Moniteur. 277p-1989.
- [6]. Erhan Güneyisi et al, Properties of Mortars with Natural Pozzolana and Limestone-Based Blended Cements, ACI Materials Journal .October 2011.
- [7] J. Bolomey, ‘Granulation et prévision de la résistance probable des bétons’ travaux 19 (1935) (30), pp 228-232.
- [8] Chanvillard G, Le matériau béton : connaissances générale, Aléas1999, p115-139.
- [9] JJ .BROOKS influence of mix proportions, plasticizers and super plasticizers on creep and drying shrinkage of concrete, Mag. Conc. Res .41 N0. 148. PP 145-54. (1989)
- [10] B. Bissonnette, P. Pierre, M. Pigeon, Influence of key parameters on drying shrinkage of cementitious materials, Cement and Concrete Research, 29, 1999, p 1655-1662.
- [11]. Karim.MILED, Effet de taille dans le béton léger de polystyrène expansé, thèse de doctorat, école nationale des ponts et chaussées, Novembre 2005.
- [12] ACI 446-1 commitee 446-1991.
- [13]. Mazen Albouchi, effet d'échelle dans les poutres en béton renforcées extérieurement en cisaillement à l'aide de matériaux composites, thèse de maîtrise en génie civil, Monterial.2004.
- [14]. Gonnerman, H. F. (1925) “Effect of Size and Shape of Test Specimen on Compressive Strength of Concrete,” *Proceedings, ASTM*, V.25, Part 2, 1925, pp.237-250.
- [15] Tran The Truyen, comportement mécanique et hydromécanique du béton, thèse de doctorat, université de Liège, 2008-2009.

- [16] Bazant. Z. P, scaling of structural strength, Elsevier, second edition, 2005.
- [17] R. Hermite, (1973). Influence de la dimension absolue sur la résistance à la flexion. Annales de l'ITBTP, (309-310), 39-41
- [18] BAZANT. Z. P: Concrete fracture model: testing & practice, *Engineering Fracture Mechanics*, 69, 2002..
- [19] Blanks R F, McNamara, Mass concrete tests in large cylinders. ACI J. Proc. 31: No. 280–303.
- [20] Aitcin, P.-C.; Miao, B.; Cook, W. D.; and Mitchell, D., “Effects of Size and Curing on Cylinder Compressive Strength of Normal and High-Strength Concretes,” *ACI Materials Journal*, V. 91, No. 4, July-Aug. 1994, pp. 349-354.
- [21]. Aziz Turkel and M. Hulusi Ozkul, Size and Wall Effects on Compressive Strength of Concretes *ACI Materials Journal/July-August 2010*
- [22]. J.R. del Viso, J.R. Carmona, G. Ruiz, Shape and size effects on the compressive strength of high-strength concrete, *Cement and Concrete Research* 38 (2008) p 386–395
- [23]. AN Ming-zhe et al, Size effect on compressive strength of reactive powder concrete, *J China Univ Mining & Technol* 18 (2008) 0279–0282
- [24] Baalbaki, W., Baalbaki, M., Benmokrane, B., Aitcin, P.C. (1992) “Influence of specimen size on compressive strength and elastic modulus of high-performance concrete”, *American Society for Testing and Materials*.
- [25] R G HERMITE, quelques problèmes mal connus de la technologie du béton, *II cemento*, 75, No.3, pp. 231-46(1978).
- [26] D. W. HOBBS, influence of specimen geometry upon weight change and shrinkage of air-dried concrete specimens, *Mag. Conc. Res.*, 29, No. 99, pp. 70-80 (1977).
- [27] J. A. ELMUDAIHEEM and W. HANSEN, Effect of specimen size and shape on drying shrinkage, *ACI Materials Journal*, 84, No. 2, pp 130-4 (1987).
- [28] T. C. HANSEN and A. H. MATTOCK, The influence of size and shape of member on the shrinkage and creep of concrete , *J. Amer. Conc. Inst.*, 63, pp. 267-90 (Feb. 1966).
- [29] S. E. PIHLAJAVAARA, On practical estimation of moisture content of drying concrete structures, *II Cemento*, 73, No. 3, pp129-38 (1976).
- [30]. Saleh A. Al-Saleh a,*, Rajeh Z. Al-Zaid b, Effects of drying conditions, admixtures and specimen size on shrinkage strains, *Cement and Concrete Research* 36 (2006) 1985– 1991.
- [31]. Jan Bisschop Size and boundary effects on desiccation cracking in hardened cement paste, *Int Journal of Fracture* (2008) 154 PP 211–224.

[32] NF EN 933-2 " Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 2 : détermination de la granularité, tamis de contrôle et dimensions nominales des ouvertures " AFNOR –Paris – 1997.

[33] G. Dreux "Nouveau guide du béton " Edition, Eyrolles- Paris- 1998.