

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	II
RESUME	IV
ABSTRACT	V
SOMMAIRE.....	VII
NOTATIONS ET DES ABREVIATIONS	XI
Liste des figures.....	XIII
Liste des tableaux :	XVI
INTRODUCTION GENERALE	XVII

CHAPITRE 1 : Retrait Des Matériaux Cimentaires

1. HYDRATATION DES MATERIAUX CIMENTAIRES	3
2. LE RETRAIT	5
2.1. Définition	5
2.2. Différent types de retrait.....	6
2.2.1. Retrait chimique	6
2.2.2. Retrait plastique	8
2.2.3. Retrait endogène.....	12
2.2.4. Retrait de dessiccation (séchage).....	18
2.2.5. Retrait thermique.....	21
2.2.6. Le retrait de carbonatation	23
3. LES TECHNIQUES DE MESURE DU RETRAIT	25
3.1. Déformations endogènes à l'état frais (0-24 heures)	25
3.2. A l'état durci (au-delà de 24 heures).....	28

CHAPITRE 2 : Paramètres Influent Sur Le Retrait Des Bétons

« Paramètres d'influence internes »	31
1. Influence du Rapport E/C.....	31
2. Influence du volume de pate sur le comportement du béton vis-à-vis du retrait.....	35
3. Influence du ciment sur le retrait	36
4. Influence des additions minérales sur le retrait	37
4.1. L'influence de la fumée de silice sur le retrait.....	38
4.2. L'influence de la cendre volante sur le retrait.....	39
4.3. L'influence de la pouzzolane sur le retrait	41
4.4. L'influence du Laitier sur le retrait	45
4.5. L'influence des fillers calcaires sur le retrait	45
5. Influence des Granulats sur le retrait	46
6. Influence des adjuvants sur le retrait.....	50
« Paramètres d'influence externes »	51
7. L'influence de la température sur le retrait.....	51
8. L'influence de L'Humidité sur le retrait	51
9. Bilan :.....	53

CHAPITRE 3 : Caractérisation Des Matériaux

1. LES GRANULATS	56
1.1. Le gravier	56
1.2. Le sable	57
1.3. Analyse granulométrique	58
2. LE CIMENT.....	62
3. LES FILLERS CALCAIRES.....	64
4. LA POUZZOLANE	64
5. EAU DE GACHAGE	66

6.	LES ADJUVANTS.....	66
6.1.	Essai au cône de Marsh	66
6.2.	Essai au mini cône.....	67
	• SUPERIOR RM 34	69
	• GLENIUM 26.....	69
	• GRANITEX « MEDAFLOW 30 »	70
	• TEK–SUPERFLOW 2000 R :	70

CHAPITRE 4 : Etude Expérimentale

1.	Formulation :	74
1.1.	Méthode de formulation chinoise :	74
1.1.1.	ETAPE 1 :	74
1.1.2.	ETAPE 2 :	75
1.1.3.	ETAPE 3 : Détermination du rapport E/F et E/P	75
1.1.4.	ETAPE 4 : Dosage de saturation	75
	• Dosage de saturation pour une pâte de ciment.....	76
	• Dosage de saturation pour une pâte des fillers calcaires	76
1.1.5.	ETAPE 5:	76
o	Dosage en fillers calcaires	76
o	Dosage en pouzzolane.....	76
1.1.6.	Etape 6 : Dosage en eau.....	76
1.2.	Méthode de formulation des Bétons ordinaire :	77
2.	Confection des Eprouvettes prismatiques :	79
3.	ETUDE DES DEFORMATIONS INSTANTANÉES (retrait)	79
3.1.	Procédure expérimentale :	79
3.2.	Perte de masse :	82

3.3. Résistance à la Compression :	82
4. RESULTATS ET INTERPRETATIONS :.....	83
4.1. Retrait des Bétons Auto-plaçant :	83
4.1.1. Influence des fillers calcaires :.....	83
4.1.2. L'influence de pouzzolane :.....	85
4.2. Etude du retrait des bétons ordinaires :.....	86
4.3. Perte de masse :	89
4.4. Résistance a la compression.....	92
CONCLUSION GENERALE	94
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	96

NOTATIONS ET DES ABREVIATIONS

Notations :

θ : l'angle de mouillage

r : rayon du pore

E/C : Rapport massique entre l'eau et le ciment

Rapport-gratuit.com 
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

PF : Facteur de compactage

S : Surface de l'éprouvette exposée au séchage

S/G+S : Volume de proportion du sable sur le volume totale des granulats

$P_{p\grave{a}te}$: masse volumique de la suspension

P_v : pression de la vapeur d'eau

P_c : pression dans l'eau

σ : tension superficielle de l'interface

v : volume massique d'eau

R : constante des gaz parfait

T : température absolue en K

M : masse molaire de l'eau

h : humidité relative

C-S-H : silicates de calcium hydrates

M_g, M_s, C, M_E : Dosages des gros granulats, du sable, du ciment et de l'eau

Abréviation :

BAP : Béton Auto-plaçant

BO : BETON ORDINAIRE

FL : FILLER CALCAIRES

PZ : POUZZOLANE

GX : adjuvant granitex

Gl : adjuvant glenium

SUP : adjuvant superiore

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1. Schéma récapitulatif de l'hydratation de deux grains de ciment.	4
Figure 1.2. (a) Déformation différée de retrait d'un spécimen non chargé : Illustration de la cinétique de retrait (shrinkage) et du gonflement par variation hydrique (moisture movement) – (b) Variation volumique d'une éprouvette de béton au retrait.	5
Figure 1.3. Evolution du retrait en fonction de l'âge du béton.	6
Figure 1.4. Volume absolu et volume apparent.	7
Figure 1.5. Définition du retrait plastique.	8
Figure 1.6. Schématisation des mécanismes du retrait plastique d'une pâte de ciment.	10
Figure 1.7. Evolution théorique de la pression de l'eau dans une pâte de ciment.	11
Figure 1.8. Représentation schématique d'un capillaire non saturé.	14
Figure 1.9. Schématisation du phénomène de tension de surface.	15
Figure 1.10. Représentation schématique de la pression disjonctive.	16
Figure 1.11. Illustration des différentes étapes du retrait chimique lors de l'hydratation du béton.	17
Figure 1.12. Distinction graphique entre le retrait endogène et le retrait chimique	18
Figure 1.13. Schématisation du retrait par variation de pression capillaire	20
Figure 1.14. Schématisation du retrait par variation de pression de disjonction.	21
Figure 1.15. Schéma du dispositif de mesure de retrait endogène linéique.	26
Figure 1.16. Schéma du dispositif de mesure de retrait endogène linéique.	27
Figure 1.17. Schéma du dispositif de mesure de retrait endogène volumique	27
Figure 1.18. Schéma du dispositif de mesure de retrait au-delà de 24 H.	28
Figure 2.1. Influence du rapport E/C sur la valeur du retrait.	32
Figure 2.2. Influence du rapport E/C sur la cinétique et l'amplitude du retrait endogène. Les références des courbes indiquent (le type de ciment)-(le rapport E/C en %)-(la teneur en fumée de silice en %)-(le dosage en superplastifiant)	33
Figure 2.3. Influence du rapport E/C sur la valeur du retrait.	34
Figure 2.4. Corrélation entre le retrait a 28 et a 360 jours et le rapport E/C	34

Figure 2.5. Retrait plastique de bétons avec 4 fractions volumiques de pates différentes (de -30 à + 10% par rapport à la composition de base)-cas d'un séchage forcé.....	35
Figure 2.6. Influence de la composition du ciment sur l'évolution du retrait endogène.	36
Figure 2.7. Influence du ciment sur le retrait endogène de pâtes de ciment	37
Figure 2.8. Relation entre la teneur en fumée de silice et la valeur du retrait endogène	38
Figure 2.9. Le retrait endogène après la prise pour des pâtes de ciment à E/C= 0.35,	39
Figure 2.10. Effet des cendres volantes sur le retrait	40
Figure 2.11. Influence de la cendre volante sur le retrait.....	41
Figure 2.12. Evolution du retrait des éprouvettes de mortier.....	42
Figure 2.13. Evolution de retrait total des bétons de classe de résistance 30 MPa.....	43
Figure 2.14. Evolution de retrait total des bétons de classe de résistance 70 MPa.....	43
Figure 2.15. Evolution du retrait endogène des bétons de classe de résistance 30 MPa.	44
Figure 2.16. Evolution du retrait endogène des bétons de classe de résistance 50 MPa.	44
Figure 2.17. (a) Ponts cristallins lors de la prise.....	47
Figure 2.18. Effet de la saturation des granulats sur le retrait endogène	48
Figure 2.19. Effet de la saturation des granulats sur le retrait endogène.	49
Figure 2.20. Influence du remplacement des granulats denses par des granulats légers sur le retrait un jour après le gâchage.	49
Figure 2.21. Effet des adjuvants sur la valeur du retrait endogène.....	50
Figure 2.22. Abaque d'évaluation de taux d'évaporation d'une surface en béton recouverte d'eau (ACI).	52
Figure 3.1. Essai équivalent de sable	57
Figure 3.2. Essai de l'analyse granulométrique.....	58
Figure 3.3: Courbes granulométriques des granulats.....	61
Figure 3.4. Échantillon de fillers (ENG).....	64
Figure 3.5. Échantillon de pouzzolane (avant et après broyage).....	65
Figure 3.6. Essai au cône de Marsh	66
Figure 3.7. Essai Mini Cône.	67
Figure 3.8. courbe dosage de saturation superior (cone de Marsh)	68
Figure 3.9. courbe dosage de saturation superior (Mini cone)	68
Figure 3.10. courbe dosage de saturation glenium (cone de Marsh).....	68
Figure 3.11. courbe dosage de saturation glenium (Mini cone).....	68

Figure 3.12. courbe dosage de saturation granitex (cone de Marsh).....	68
Figure 3.13. courbe dosage de saturation granitex(Mini cone).....	68
Figure4.1.Moule7x7x28.....	79
Figure 4.2. Eprouvette enveloppée.....	80
Figure 4.3. Eprouvette non enveloppée.....	80
Figure 4.4.L'ensemble des éprouvettes confectionnées de différentes formulations.....	80
Figure 4.5. Banc d'essai pour la mesure du retrait	81
Figure 4.6.Rétractomètre	81
Figure 4.7.Balance électrique avec précision de l'ordre de 0.1g	82
Figure 4.8. Surfaçage des éprouvettes.....	82
Figure 4.9. Presse universelle.....	82
Figure 4.10. Le retrait endogène et total des Bétons Auto-plaçant (% Filler)	83
Figure 4.11. Le retrait de dessiccation des Bétons Auto-plaçant (% Filler)	84
Figure 4.12. Le retrait endogène et total des Bétons Auto-plaçant (% pouzzolane).....	85
Figure 4.13. Le retrait de dessiccation des Bétons Auto-plaçant (% pouzzolane).....	86
Figure4.14. Le retrait endogène et total des Bétons ordinaire avec adjuvant GLENIUM (% Filler).....	87
Figure 4.15. Le retrait de dessiccation des Bétons ordinaire avec adjuvant glenium (% Filler).....	88
Figure 4.16.Le retrait endogène et total des Bétons ordinaire avec adjuvant granitex (% Filler)	88
Figure4.17.Le retrait de dessiccation des Bétons ordinaire avec adjuvant granitex(% Filler). 88	
Figure 4.18. Perte de masse Béton auto-plaçant (filler%).	89
Figure 4.19.perte de masse Béton auto-plaçant (pouzzolane%).	90
Figure 4.20.perte de masse des bétons ordinaire avec 03 types d'adjuvants et (0% filler)	91
Figure 4.21. Résistance à la compression des bétons étudiés avec variation d'adjuvant en fonction du taux de substitution (filler).	92
Figure 4.22. Résistance à la compression des bétons étudiés avec variation d'adjuvant en fonction du taux de substitution (pouzzolane).	92
Figure 4.23. . Résistance à la compression des bétons auto plaçants avec variation de taux des substitutions (fillers, pouzzolane).....	93

LISTE DES TABLEAUX :

Tableau 1.1 : Bilan volumique de l'hydratation du C3S (JAOUADI, 2008).	7
Tableau 3.1: Caractérisation physique du gravier.....	56
Tableau 3.2: Caractéristiques physiques du sable.	57
Tableau 3.3 : Analyse granulométrique du sable.....	59
Tableau 3.4: Analyse granulométrique du gravier 4/8.	60
Tableau 3.5: Analyse granulométrique du gravier 8/16.	60
Tableau 3.6: Analyse granulométrique du gravier 16/25.	61
Tableau 3.7: Composition chimique du ciment (%) (SCIBS).....	62
Tableau 3.8: Composition minéralogique du ciment (%) (SCIBS)	62
Tableau 3.9: Propriétés physico – mécaniques du ciment (SCIBS).....	63
Tableau 3.10: La masse volumique apparente et absolue du ciment.	63
Tableau 3.11: Propriétés chimiques des fillers calcaires (Taleb, 2009).	64
Tableau 3.12: Analyse chimique de la pouzzolane.	65
Tableau 3.13: Analyse minéralogique de la pouzzolane.....	65
Tableau 3.14. Caractéristiques chimiques de l'eau (Boukli, 2010).	66
Tableau 3.15: Caractéristiques du superplastifiant Superior RM 34.	69
Tableau 3.16: Caractéristiques du superplastifiant Glenium 26.....	69
Tableau 3.17: Caractéristiques du superplastifiant « MEDAFLOW 30».....	70
Tableau 3.18: Caractéristiques du superplastifiant «TEK–SUPERFLOW 2000 R »	70
Tableau 3.19: Dosage de saturation des adjuvants utilisé.....	71
Tableau 4.1 : Résultats d'étalement des pâtes pures de ciment, fillers et pouzzolane.....	75
Tableau 4.2 : Formulations des bétons auto-plaçant	77
Tableau 4.3 : Formulations des bétons ordinaires.....	78

INTRODUCTION GENERALE :

Le béton est aujourd'hui le matériau de construction par excellence, Pour être rentables, les réparations superficielles effectuées sur les infrastructures en béton de ciment doivent présenter un niveau de performance adéquat pendant une durée minimale. Parmi les facteurs pouvant affecter la durabilité de ce type d'interventions, le retrait. Le retrait des BAP est parfois considéré supérieur à celui des bétons classiques, à cause du volume de pâte, la quantité de ciment élevés et par sa grande fluidité, Cependant les nouvelles générations des BAP avec moins de ciment et plus d'additions rendent cette classification inappropriée. Par ailleurs, la prise en compte de l'impact environnemental de l'activité humaine, en particulier dans le secteur de construction impose aux entreprises de la construction à utiliser de plus en plus des bétons écologiques, Ces derniers sont obtenus en diminuant la quantité de clinker et par l'utilisation des matériaux de substitution (additions minérales), Les mesures de retrait débutent classiquement le lendemain du coulage du béton, et généralement depuis le coulage.

Car toute formulation passe par la compréhension de l'influence de chaque constituant sur le comportement du béton, le rôle d'un constituant dépend essentiellement de son état, (fluide, solide) et de sa nature minéralogique, chimique, et morphologique. Et pour cela nous allons décrire dans ce mémoire les caractéristiques des différents constituants entrant dans la composition des bétons ordinaires et auto-plaçants (granulats, ciment, additions minérales, adjuvants et eau), et les paramètres influents.

Les composantes de base d'un béton ordinaire sont le ciment, l'eau et les granulats, sa mise en œuvre nécessite une phase de vibration afin de remplir correctement les coffrages. Cette étape conditionne la qualité de la structure finale, mais c'est également un travail pénible qui demande un savoir-faire particulier.

Les bétons auto-plaçant par contre, sont possibles grâce aux ajouts d'adjuvants qui sont des produits chimiques incorporés au béton frais en faibles quantités afin d'en améliorer certaines propriétés, ainsi que les additions minérales substitués au ciment (filler, pouzzolane).

L'objectif de notre travail est double. Il s'agit de comprendre dans un premier temps s'il y a équivalence entre BAP et bétons ordinaires vis à vis le retrait, ensuite, s'il est possible d'optimiser la composition des BAP pour minimiser ce phénomène.

Ce travail est structuré en quatre parties dans l'organigramme présenté ci-après :

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique portant les principes de base de l'hydratation des matériaux cimentaires ainsi les type retrait et les mécanismes a l'origine de ce phénomène ainsi les méthodes de mesure du retrait.

Le deuxième chapitre s'intéresse aux différents paramètres influents sur le retrait des bétons (ciment, eau, granulats, rapport E/C, addition minérale, adjuvant...etc.), qui cause l'apparition de ce phénomène.

Dans le troisième chapitre, nous traitons les caractérisations des différentes propriétés mécaniques et physico-chimiques des constituants qui entrent dans composition de nos bétons confectionnés.

Le dernier chapitre présente les résultats expérimentaux sur le comportement mécanique et des déformations instantanées (retrait) des BAP et BO en intégrant deux type d'addition dans le mélange : les fillers calcaires et la pouzzolane

Après l'analyse des quatre chapitres, nous finissons notre étude par une conclusion générale.

CHAPITRE

1

RETRAIT DES MATERIAUX CIMENTAIRES

INTRODUCTION

Ce chapitre est consacrée à une revue bibliographique sur le processus du retrait et de l'hydratation des matériaux cimentaires. Cette étude constitue une base de connaissance pour mieux comprendre le comportement du béton vis-à-vis du retrait et les mécanismes qui sont à l'origine de ce phénomène qui est une des principales causes de la fissuration et qui agissent sans chargement extérieur et diminuent le volume du béton au cours du temps et en fonction de l'environnement.

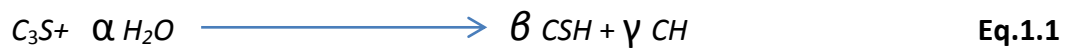
SOMMAIRE DU CHAPITRE 1

1. HYDRATATION DES MATERIAUX CIMENTAIRES	3
2. LE RETRAIT	5
2.1. Définition	5
2.2. Diffèrent types de retrait.....	6
2.2.1. Retrait chimique	6
2.2.2. Retrait plastique.....	8
2.2.3. Retrait endogène.....	12
2.2.4. Retrait de dessiccation (séchage).....	18
2.2.5. Retrait thermique.....	21
2.2.6. Le retrait de carbonatation	23
3. LES TECHNIQUES DE MESURE DU RETRAIT	25
3.1. Déformations endogènes à l'état frais (0-24 heures)	25
3.2. A l'état durci (au-delà de 24 heures).....	28

1. HYDRATATION DES MATERIAUX CIMENTAIRES

Le ciment Portland est composé de quatre phases principales : le silicate tricalcique (C_3S , alite), le silicate bicalcique (C_2S), l'aluminate tricalcique (C_3A) et le ferro-aluminate tétracalcique (C_4AF).

L'hydratation correspond à une suite de réactions chimiques entre les différents composants de clinker, le gypse et l'eau. On peut voir que les silicates de calcium représentent à peu près deux tiers de la composition du ciment. Ces produits réagissent avec l'eau et forment le produit principal d'hydratation, appelé calcium silicate hydraté C-S-H, et l'hydroxyde de calcium, CH appelé portlandite (Govin 2004 et Ghazali 2008).



L'hydratation de l'alite (C_3S) et de la bélite (C_2S) fournit une grande partie de la résistance développée dans la pâte du ciment. Le C-S-H et le CH occupent respectivement environ 50 à 60% et 20 à 25% du volume total des hydrates. Le C-S-H est un gel amorphe qui contient des pores, appelés pores de gel, dont le diamètre est de l'ordre de quelques nanomètres.

Par conséquent, le C-S-H est responsable de la plupart des propriétés de la pâte de ciment durcie, comme la résistance, la perméabilité, les variations de volume, etc.

En plus de l'eau dans les pores de gel, le C-S-H contient une certaine quantité d'eau chimiquement liée. Contrairement au C-S-H, le CH est un matériau cristallin avec une composition fixe. C_3A et C_4AF réagissent avec le gypse et l'eau et produisent l'ettringite (Govin 2004).

Les C-S-H sont des composés mal définis du point de vue de leur composition chimique et mal cristallisés du fait d'une germination rapide de ces hydrates. Cette phase est souvent appelée « gel » indiquant le faible degré de cristallinité et le caractère gorgé d'eau de ces composés (BAROGHEL, 1994).

A température ambiante, après le mélange du ciment et de l'eau, le coulis préparé reste dans un état relativement fluide jusqu'à 2 à 4 heures et ensuite commence à se solidifier avec une vitesse plus rapide. La phase de prise initiale correspond au temps nécessaire pour

que le coulis perd sa fluidité. La résistance du ciment augmente rapidement dans les deux premiers jours et continue à augmenter plus lentement pendant plusieurs mois. Le processus d'hydratation et la formation de la microstructure de la pâte du ciment, schématisés sur la figure 1.1, commencent par la production des hydrates solides qui naissent à la surface des grains anhydres et remplacent l'espace initialement rempli par l'eau. Ces hydrates, appelés (C-S-H) de faible densité forment une matrice continue et relient les grains anhydres. En raison de leur densité plus faible (2 g/cm^3 à comparer avec $3,2 \text{ g/cm}^3$ pour les grains anhydres) ils occupent un volume plus grand que les grains anhydres. Par conséquent, la porosité capillaire qui est initialement remplie par l'eau, diminue progressivement au cours de l'hydratation. Les hydrates de faible densité contiennent des impuretés.

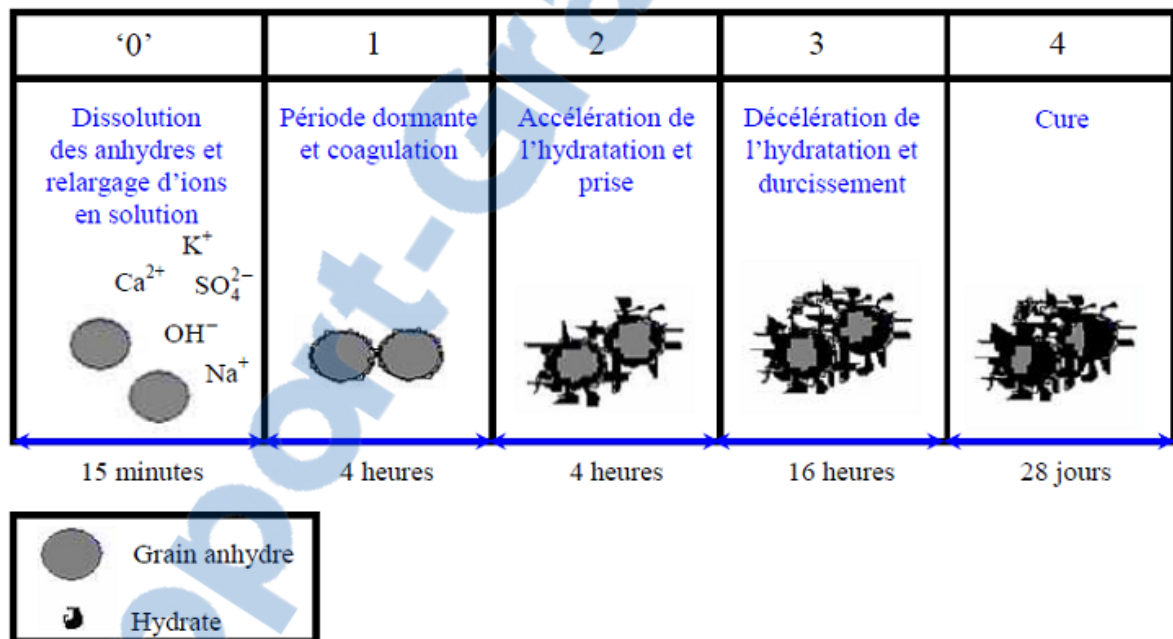


Figure 1.1. Schéma récapitulatif de l'hydratation de deux grains de ciment, schéma adapté par (RIXOM et MAILVAGANAM, 1999).

2. LE RETRAIT

2.1. Définition

Le retrait se présente comme la réduction du volume liée au départ ou à la consommation d'eau au sein du béton non contraint extérieurement (figure 1.2 (b)). Par opposition, un gonflement s'observe par immersion de l'éprouvette (ou lors de conditions hygrométriques saturées) (figure 1.2 (a)) (COQUILLAT, 1987).

Les processus de diffusion hydrique du retrait tendent à se stabiliser à environ un an d'âge du béton. La déformation finale de retrait varie entre 500 et 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ (BISSONNETTE et POIGEON, 2000). Des processus de fissuration intrinsèques au retrait sont donc prévisibles.

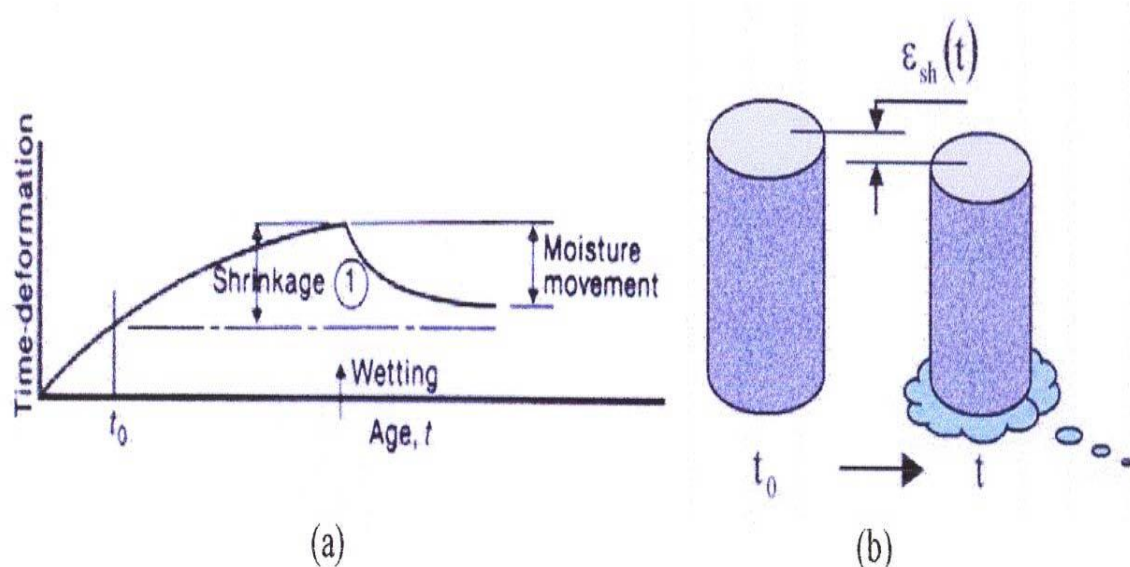


Figure 1.2. (a) Déformation différée de retrait d'un spécimen non chargé : Illustration de la cinétique de retrait (*shrinkage*) et du gonflement par variation hydrique (*moisture movement*) – (b) Variation volumique d'une éprouvette de béton au retrait (NEVILLE et al, 1983).

Plusieurs types de retrait se succèdent à partir de la fabrication du béton et jusqu'à maturité (figure 1.3).

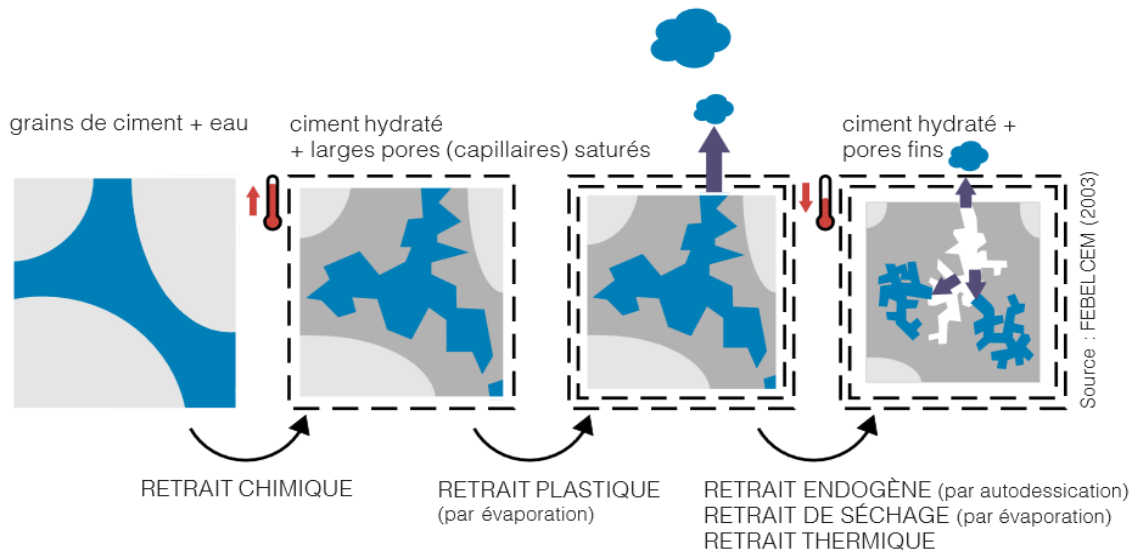


Figure 1.3. Evolution du retrait en fonction de l'âge du béton.

2.2. Différent types de retrait

2.2.1. Retrait chimique

L'hydratation de la pâte de ciment ne se produit pas à volume constant: le différentiel négatif entre le volume absolu des produits de l'hydratation et la somme des volumes des hydrates formés engendre une déformation de la matrice cimentaire. Ce phénomène a été observé par Le Chatelier d'où le nom de « Contraction Le Chatelier ». Cette diminution du volume absolu peut atteindre 10% du volume initial à hydratation complète. La contraction Le Chatelier appelée encore retrait chimique, a pour conséquence une contraction globale du matériau connu sous le nom du retrait externe ou retrait endogène (JAOUADI, 2008).

L'amplitude de la contraction chimique dépend uniquement de la nature du ciment et de la vitesse d'hydratation (fonction par exemple de la température). Le retrait chimique influe sur le retrait endogène.

Il est important de distinguer les notions de volume apparent et de volume absolu dans l'analyse des déformations endogènes. Le volume apparent peut être défini comme la somme des volumes des différentes phases du matériau qu'elles soient solide, liquide ou gazeuse. Le volume absolu correspond à la somme des volumes des phases solides et liquides uniquement (BENKECHKACHE, 2012).



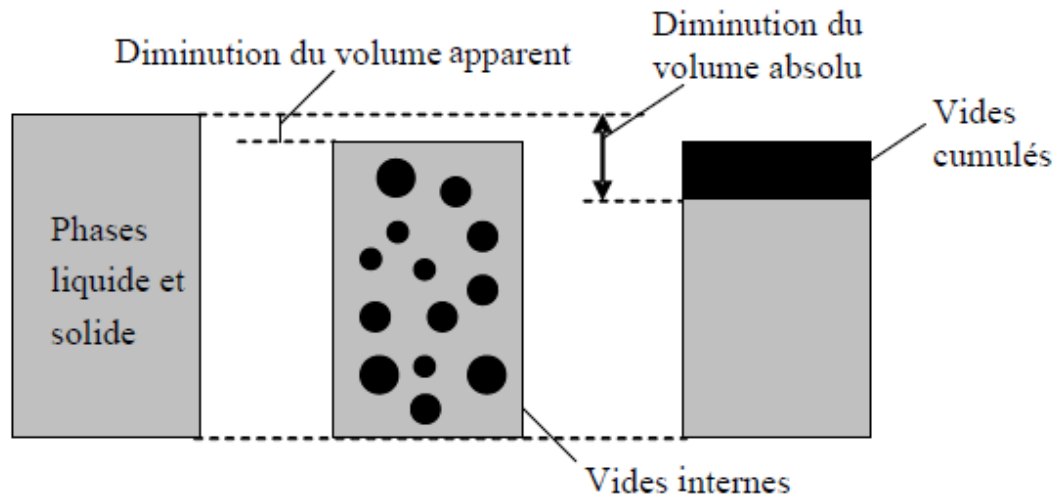


Figure 1.4. Volume absolu et volume apparent (BISSONNETTE et POIGEON, 2000).

La variation du volume absolu dépend de la densité du C-S-H, la contraction Le Chatelier est de l'ordre de 10% avec une densité de C-S-H de 2.1 g/cm^3 et passe à 3% avec une densité de C-S-H de 1.9 g/cm^3 . Selon la teneur en eau des C-S-H ainsi que de la méthode de séchage (Gartner, 2002), différentes valeurs sont proposés dans la littérature. Les valeurs vont de 1.85 à 2.1 g/cm^3 .

Dans le cas du C_3S , pour une hydratation complète et pour une densité de C-S-H de 2 g/cm^3 , la contraction de Chatelier est de l'ordre de 6.6 % (Tableau 1.1).



Tableau 1.1 : Bilan volumique de l'hydratation du C_3S (JAOUADI, 2008).

Nombre de moles	1	5.3	1	1.3
Masse molaire (g/mol)	228	18	227.4	74
Masse de la réaction (g)	228	95.4	227.4	96.2
Densité (g/cm^3)	3.15	1	2	2.24
Volume de la réaction (cm^3)	72.4	95.4	113.7	42.9
	$V_{\text{réactifs}} = 167.8 \text{ (cm}^3\text{)}$		$V_{\text{produits}} = 156.6 \text{ (cm}^3\text{)}$	

2.2.2. Retrait plastique

2.2.2.1. Définition

Le retrait plastique est défini, de manière classique, comme la contraction du béton en phase plastique ultérieure au séchage. Il se développe lors que la quantité d'eau évaporée à la surface est supérieure à la quantité d'eau de ressuage (WITTMANN, 1976 cité par BOUCHENEB, 2011). En effet, certaines études sur les bétons à hautes performances font état de fissuration possible avant la fin de prise, malgré toute protection contre l'évaporation (AITCIN et col, 1998). Cette fissuration est aussi la conséquence du retrait endogène, de grande amplitude chez les bétons de rapport E/C inférieur à 0,4.

Il reste à définir la "phase plastique". C'est la période s'écoulant entre la fabrication et le début de prise, période pendant laquelle le béton ne présente pas de cohésion. Mais, comme le début de prise est difficile à mesurer pour un béton, les mesures de retrait plastique disponibles dans la littérature englobent très souvent la contraction totale pendant la prise (figure 1.5).

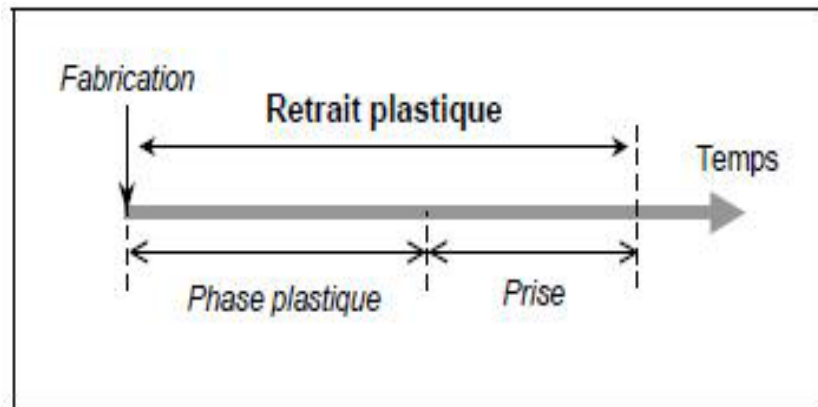


Figure 1.5. Définition du retrait plastique.

2.2.2.2. Mécanismes à l'origine du retrait plastique

Pour illustrer les mécanismes, nous prenons l'exemple d'une pâte de ciment à l'état frais, dont la surface sèche (figure 1.6 (a)).

a) Le tassement

Juste après le coulage, les grains de ciment et l'air entraîné sont en suspension dans l'eau. Sous l'effet de la gravité, les particules solides sédimentent, alors que les bulles d'air remontent : la pâte se compacte (figure 1.6 (b)). Au cours de cette consolidation, l'eau est contrainte de percoler vers la surface. Il se forme alors une couche d'eau, appelée eau de ressuage, schématisée par le trait en pointillés sur la figure 1.6 (c).

Même si la période avant la prise est dite dormante, les réactions d'hydratation commencent dès la mise en contact de l'eau et du ciment. Les hydrates, en noir sur les figures, sont produits en périphérie des grains de ciment. Leur volume est inférieur à ceux des réactifs (eau + ciment). Il se produit donc une diminution de volume, appelée retrait chimique ou contraction de Le Chatelier.

En plus de la consolidation et du retrait chimique, une troisième composante s'ajoute à la diminution de volume : le départ de l'eau due à l'évaporation. Au total, la contraction provoque un mouvement vers le bas de la surface de la pâte, appelé "tassement" (TURCRY, 2004).

b) Retrait de séchage

A un instant donné, l'épaisseur de la couche d'eau ressuée dépend de la vitesse de consolidation, mais également du taux d'évaporation. Le retrait de séchage n'apparaît que si le ressuage est négligeable devant l'évaporation, dans le cas où l'eau s'évapore plus vite à la surface qu'elle n'y apparaît, il se forme un système complexe de ménisques entre les grains solides (figure 1.6 (d)).

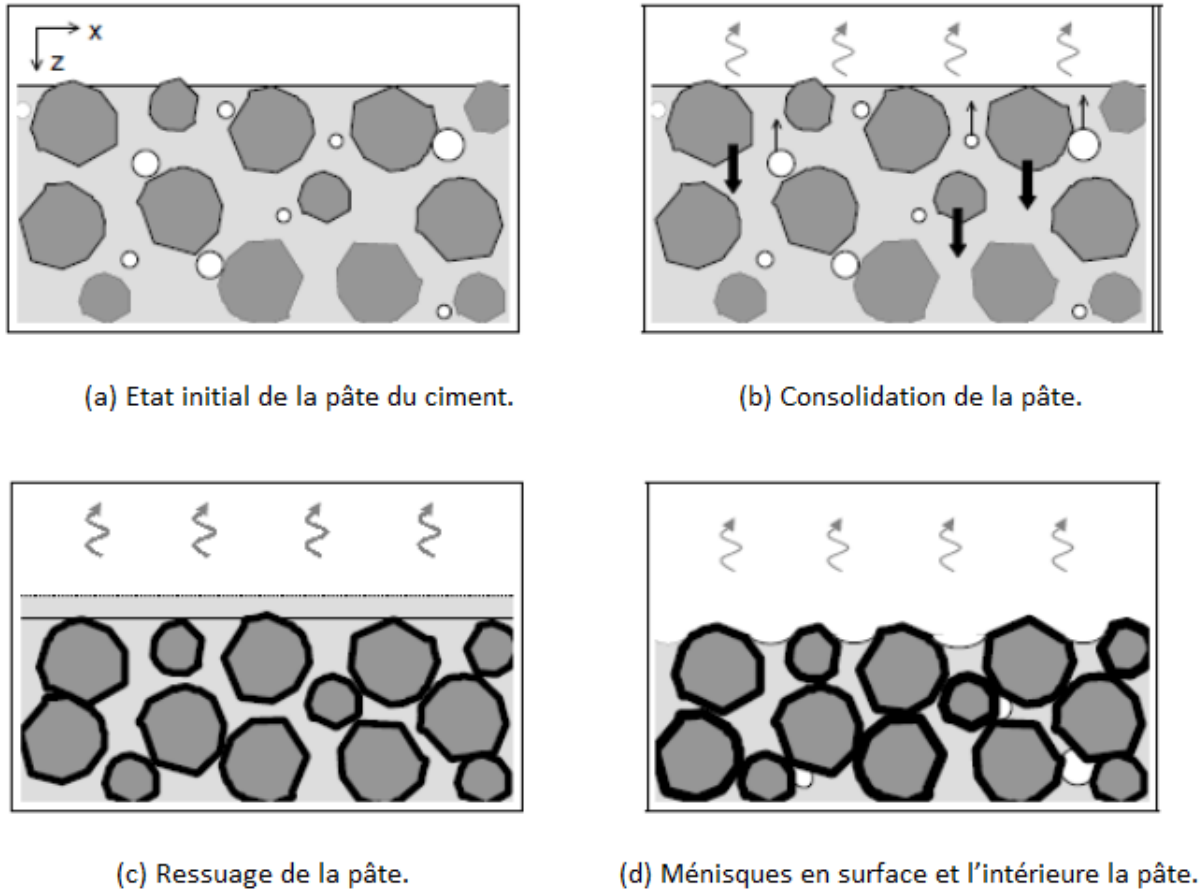


Figure 1.6. Schématisation des mécanismes du retrait plastique d'une pâte de ciment (BOUCHENE, 2011).

Selon la relation de Laplace (Eq.1.3), la variation de pression de l'eau, consécutive à la formation d'un ménisque, est négative. La pression capillaire p est proportionnelle à la tension de surface de l'eau σ , à l'angle de mouillage θ , et au rayon du pore r .

$$p = (-2\sigma/r)\cos\theta \quad \text{Eq.1.3}$$

La géométrie et la taille des pores contrôlent le développement de la pression capillaire créée par un départ d'eau.

La figure 1.7 présente l'évolution théorique de la pression de l'eau, à la profondeur z dans la pâte de ciment (HAMMER, 2002). A l'instant initial, la pression est égale à :

$$p_1 = \rho_{\text{pâte}} g z \quad \text{Eq.1.4}$$

Où :

$\rho_{p\grave{a}te}$ est la masse volumique de la suspension.

A l'âge t_1 , quand la consolidation se termine, le squelette granulaire supporte son propre poids, la pression est égale à la pression hydrostatique (Eq.1.5):

$$p_2 = \rho_{eau} g Z \quad \text{Eq.1.5}$$

Durant l'intervalle ($t_1 - t_2$), la pâte est recouverte d'eau de ressuage. A l'âge t_2 , l'évaporation provoque la création de ménisques en surface. La durée de l'intervalle ($t_1 - t_2$) est bien sûr fonction du taux de séchage et de la vitesse de ressuage : les ménisques peuvent aussi bien apparaître avant l'âge t_1 . Les mesures de pression capillaire présentent typiquement un saut au bout d'un temps donné, noté t_{max} sur la figure 1.7.

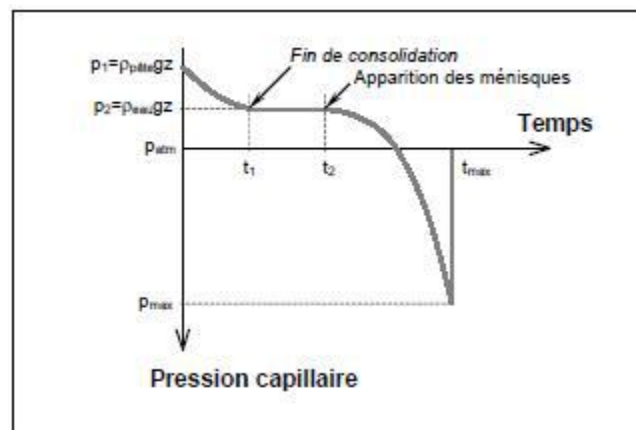


Figure 1.7. Evolution théorique de la pression de l'eau dans une pâte de ciment (HAMMER, 2002).

Le module de retrait relie la déformation volumique et la pression capillaire. Avant la prise, c'est la compressibilité du milieu granulaire. Après le début de prise, il représente la compressibilité du squelette.

C) Retrait d'auto-dessiccation

Le retrait d'auto-dessiccation correspond au départ de l'eau des pores capillaires, de l'eau absorbée ou encore de l'eau des hydrates. Il est défini donc par :

- Le retrait par variation de la dépression capillaire.
- Le retrait par variation de la tension superficielle du solide, due à la diminution de l'épaisseur de la couche d'eau adsorbée.
- Le retrait par variation de la pression disjonctive liée aussi à une diminution de la couche d'eau adsorbée.

2.2.3. Retrait endogène

2.2.3.1. Définition

Des changements volumiques se produisant après la prise peuvent prendre la forme de retrait ou gonflement. Lorsqu'un apport d'eau existe, la poursuite de l'hydratation conduit à une expansion. Par contre, lorsque le mouvement de l'humidité de /ou vers la pâte de ciment n'est pas possible, on observe un retrait qui est la conséquence de l'absorption de l'eau des pores capillaires due à l'auto-dessiccation. Le retrait d'un tel système est connu comme étant le retrait endogène ou encore une variation volumétrique endogène et il se produit, en pratique, à l'intérieur des pièces massives de béton (NEVILLE, 2000).

D'après le même auteur la contraction de la pâte de ciment est empêchée par le squelette rigide formé par la pâte de ciment déjà hydratée ainsi que par les granulats.

Bien que le retrait endogène du béton soit tridimensionnel, il est généralement exprimé comme une déformation linéaire, ce qui permet de le comparer avec le retrait de séchage.

Le retrait endogène tend à augmenter lorsque la température est plus élevée, lorsque le dosage en ciment est plus élevé, vraisemblablement lorsque le ciment est plus fin et pour les ciments ayant une teneur élevée en C_3A et C_4AF (NEVILLE, 2000).

D'après le même auteur, le retrait endogène est très important pour les très faibles rapports E/C : une valeur de 700 μ m a été signalée pour le béton dont le rapport E/C était de 0.17.

2.2.3.2. Mécanismes expliquant le retrait d'auto- dessiccation

Dans la littérature, les auteurs font généralement référence à trois mécanismes fondamentaux afin d'expliquer le retrait endogène. Dans les sections suivantes, une

explication de ces trois mécanismes, basée sur les travaux de (Baron,1982) et (Hua et col, 1995) est présentée.

a) Mécanisme lié à la variation de la dépression capillaire

L'eau consommée durant l'hydratation et la réduction du volume qui s'en suit permettent l'apparition d'un volume gazeux à l'intérieur du réseau poreux. Des ménisques d'eau apparaissent à l'intérieur des pores, créant de la dépression capillaire. Le phénomène physique décrivant cette dépression peut être expliqué par les lois de Laplace et Kelvin.

Loi de Laplace :

$$P_v - P_c = \frac{2\sigma}{r} \quad \text{Eq.1.6}$$

Avec :

P_v : pression de la vapeur d'eau

P_c : pression dans l'eau

σ : tension superficielle de l'interface (18g/mole) eau-vapeur d'eau

v : volume massique d'eau

θ : angle de mouillage

r : rayon d'un pore où le ménisque existe

Loi de Kelvin :

$$P_c - P_v = \frac{RT}{Mv} \ln(h) \quad \text{Eq.1.7}$$

Avec :

R : constante des gaz parfait

T : température absolue en K

M : masse molaire de l'eau

h : humidité relative

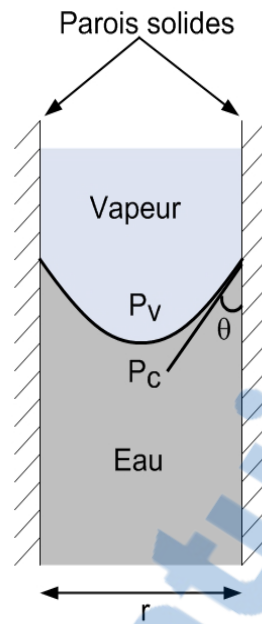


Figure 1.8. Représentation schématique d'un capillaire non saturé (adapté par Hua et col, 1995).

Si on considère un système non saturé, l'équation de Kelvin (Eq.1.7) permet de démontrer qu'il existe un rayon d'accès r_0 en deçà duquel un capillaire est rempli d'eau et inversement lorsque le rayon d'accès est supérieur à r_0 , il est vide. L'équation de Laplace (Eq.1.6) montre que la présence d'un ménisque d'eau dans un pore capillaire, schématisée à la Figure 1.8, crée une dépression du liquide qui doit être équilibrée par une compression du solide (BARON, 1982). Lorsque le ciment s'hydrate, il consomme de l'eau, faisant alors diminuer les ménisques des pores. La pression du liquide augmente et le solide est de plus en plus comprimé, ce qui se traduit par une contraction.

b) Mécanisme lié à la variation de l'énergie de surface des particules colloïdales

Il ne permet d'expliquer que partiellement le retrait par dessiccation. Au voisinage de toute surface, il existe une tension superficielle due à la dissymétrie des forces d'attraction entre atomes et molécules. L'énergie de surface diminue lorsque des atomes ou molécules sont adsorbés. La Figure 1.9 représente schématiquement le phénomène de tension de surface.

Ainsi, s'il y a une désorption, l'énergie de surface augmente, ce qui met alors le matériau en compression, induisant ainsi un retrait à l'échelle macroscopique.

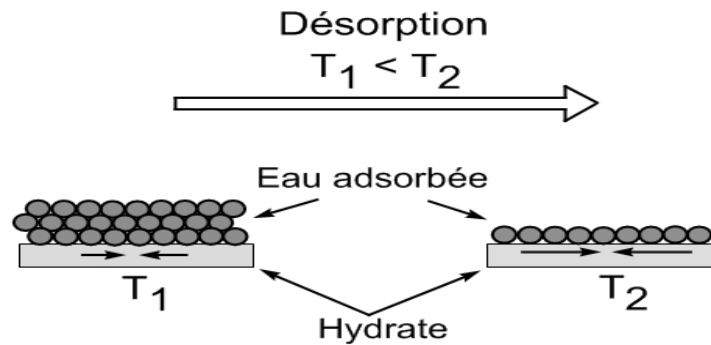


Figure 1.9. Schématisation du phénomène de tension de surface (adapté par CHARRON, 2002).

Cependant, à partir d'une certaine humidité relative, le solide est recouvert de plusieurs couches d'eau adsorbées qui induisent une diminution de l'énergie de surface. Ainsi, ce mécanisme ne fonctionne que pour les faibles humidités relatives.

c) Mécanisme lié à la variation de la pression disjonctive

De même, ce mécanisme ne permet d'expliquer que qualitativement le retrait par dessiccation. Il correspond à l'interaction de deux solides très proches, schématisée à la Figure 1.10. Notons d la distance entre ces deux solides. À température, constante l'épaisseur de la couche d'eau adsorbée (notée e) sur chacun de ces solides dépend de l'humidité relative.

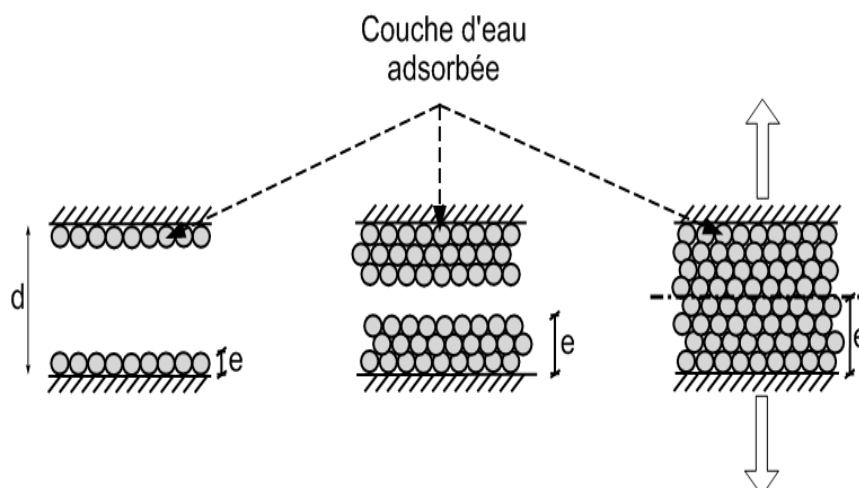


Figure 1.10. Représentation schématique de la pression disjonctive (adapté par CHARRON, 2002).

Si on augmente l'humidité relative, la couche d'eau adsorbée augmente, jusqu'au moment où $2 \times e > d$. Dans ce cas-là les solides auront tendance à se séparer, les couches d'eau se mettent sous pression qui est appelée pression de disjonction. À l'inverse, si on passe d'un état saturé à un état non saturé, il se crée un retrait.

2.2.3.3. Différence entre le retrait chimique et le retrait endogène

Il est important de faire la différence entre le retrait chimique et le retrait endogène puisqu'ils ne surviennent pas dans les mêmes conditions. Tel que mentionné précédemment, le retrait chimique est inévitable tandis que le retrait endogène est fonction des conditions hygrométriques locales.

Les Figures 1.11 et 1.12 permettent de mieux comprendre la différence entre les deux formes de retrait (KOSMATKA et col, 2003). Les deux premières colonnes de la Figure 1.11 illustrent le retrait chimique avant la prise initiale du béton. A ce moment, le retrait chimique et le retrait endogène sont identiques (Figure 1.12). Lorsqu'il y a prise initiale, la pâte de ciment ne peut plus se déformer aussi librement que lorsqu'elle était à l'état plastique. Si le béton est en condition scellée, il y a auto-dessiccation et à partir de ce moment, le retrait endogène se manifeste. La courbe de retrait endogène est donc distincte de celle du retrait chimique (Figure 1.12). Certains chercheurs (BEDARD, 2009). considèrent que le retrait endogène débute au moment de la prise initiale, alors que d'autres considèrent qu'il commence dès le contact du ciment avec l'eau. Durant l'hydratation du béton et sous conditions scellées, il y a continuité du retrait endogène et il y a également formation de vides microscopiques dans le béton. Après la prise finale du béton, les vides causés par l'hydratation ainsi que la diminution apparente de volume (retrait endogène) correspondent approximativement au retrait chimique total du béton (troisième et quatrième colonne de la Figure 1.11).

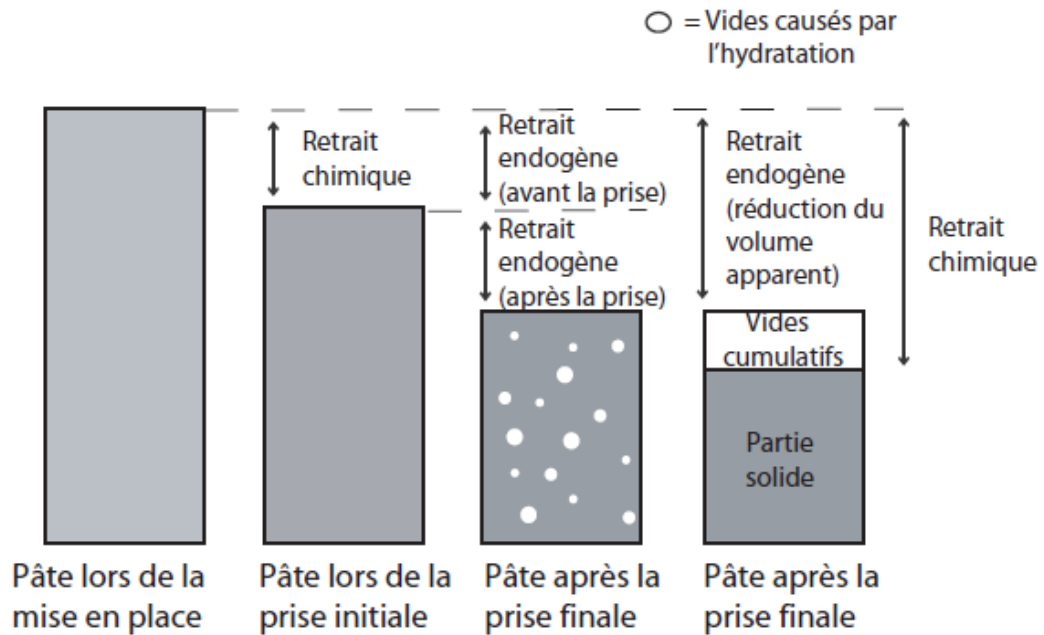


Figure 1.11. Illustration des différentes étapes du retrait chimique lors de l'hydratation du béton.

Le retrait chimique, se produit durant toute la durée de l'hydratation du béton. Si l'auto-dessiccation est prévenue, le retrait chimique total ne cause pas de variations apparentes des dimensions de l'élément de béton étant donné que la plus grande quantité de changement volumétrique est interne (BEDARD, 2009).

Les retraits chimiques et endogènes sont deux types de retraits qui surviennent durant l'hydratation du béton. Il faut par contre considérer que d'autres formes de retrait peuvent également survenir dans le béton.

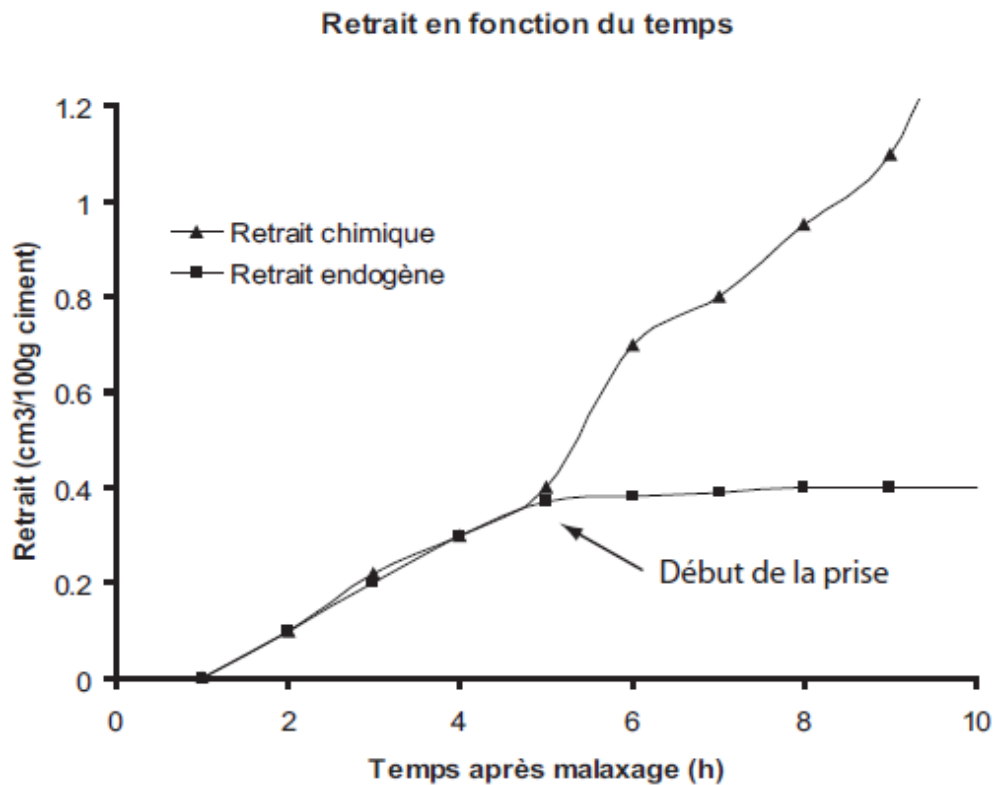


Figure 1.12. Distinction graphique entre le retrait endogène et le retrait chimique (BEDARD, 2009).

2.2.4. Retrait de dessiccation (séchage)

Avant que la réaction chimique débute, le béton contient une quantité initiale d'eau. Selon le rapport E/C du béton, la majorité de cette eau est consommée par la réaction chimique lors de l'hydratation du béton. Si le béton n'est pas en conditions scellées, une partie de l'eau, qui n'est pas consommée dans les premiers temps de la réaction chimique, a tendance à s'évaporer (cela peut cependant varier selon les conditions externes auxquelles est exposé le béton). Ce phénomène est dû à la tendance naturelle au rétablissement d'un équilibre entre l'humidité relative du béton et l'humidité relative de l'environnement ambiant. La perte d'humidité à l'intérieur du béton a comme conséquence de créer le retrait de séchage.

Aïtcin et col. (1997) expliquent que le retrait de séchage est un phénomène de dessiccation localisé qui commence à se développer à la surface du béton par où s'évapore l'eau interne du béton. La cause essentielle du retrait de séchage est, évidemment, l'évaporation de l'eau contenue dans les capillaires de la pâte de ciment hydraté à partir des surfaces de béton

exposées à l'air ambiant. L'évaporation se produit aussitôt que le degré hygrométrique de l'air ambiant, est inférieur à celui qui règne dans le réseau capillaire. Les forces de tension développées dans les ménisques à l'intérieur du béton entraînent une contraction du béton. La valeur du retrait de séchage dépend de plusieurs facteurs. Il est possible de contrôler l'évaporation de l'eau contenue dans le béton frais en utilisant une méthode de cure adéquate (application d'un produit de cure, mise en place de jute humide).

2.2.4.1. Les mécanismes du retrait de dessiccation

Les importants mécanismes sont fournis dans la littérature pour expliquer le retrait de dessiccation pour les valeurs usuelles d'humidité relative (SOKORA, 1979) :

a) La tension superficielle

Une partie de l'eau libre dans le matériau est adsorbée sur la surface du réseau. La surface spécifique des C-S-H est très élevée. L'énergie surfacique des C-S-H liée à cette interaction varie avec l'épaisseur du film d'eau adsorbée. Plus celui-ci est grand, plus petite est la tension de surface. Ainsi, lorsqu'il y a adsorption, les tensions surfaciques diminuent et en cas de désorption, les contraintes induites augmentent à l'inverse, provoquant une contraction du solide et donc une déformation de retrait. Ce phénomène a été vérifié expérimentalement par (Wittmann, 1968 cité par BENKECHKACHE, 2012).

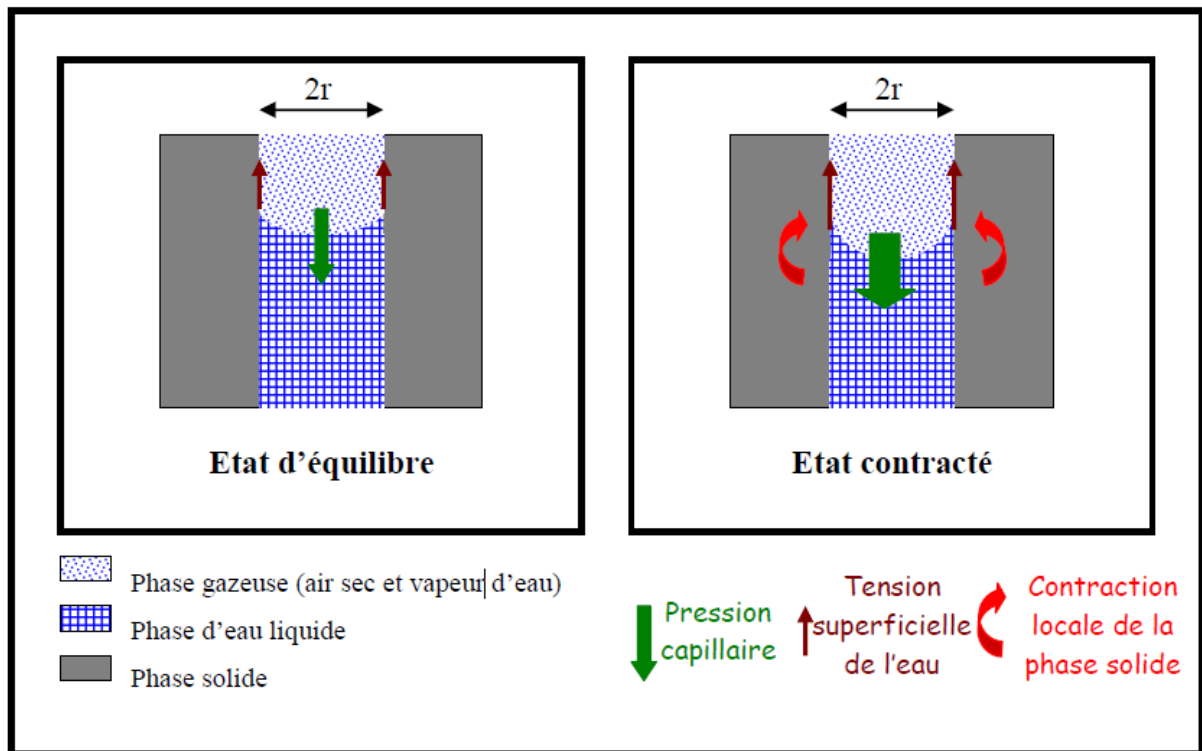


Figure 1.13. Schématisation du retrait par variation de pression capillaire (Flore BRUE, 2009).

b) La pression de disjonction

L'eau associée à la pression de disjonction est en équilibre avec l'humidité relative environnante. Une diminution de l'humidité relative entraîne un départ de cette eau.

Il se produit alors une diminution de l'épaisseur de la couche d'eau adsorbée dans la zone d'adsorption empêchée et donc une diminution de la pression de disjonction. Il en résulte alors une déformation du squelette solide correspond à la déformation de retrait (BENKECHKACHE, 2012).

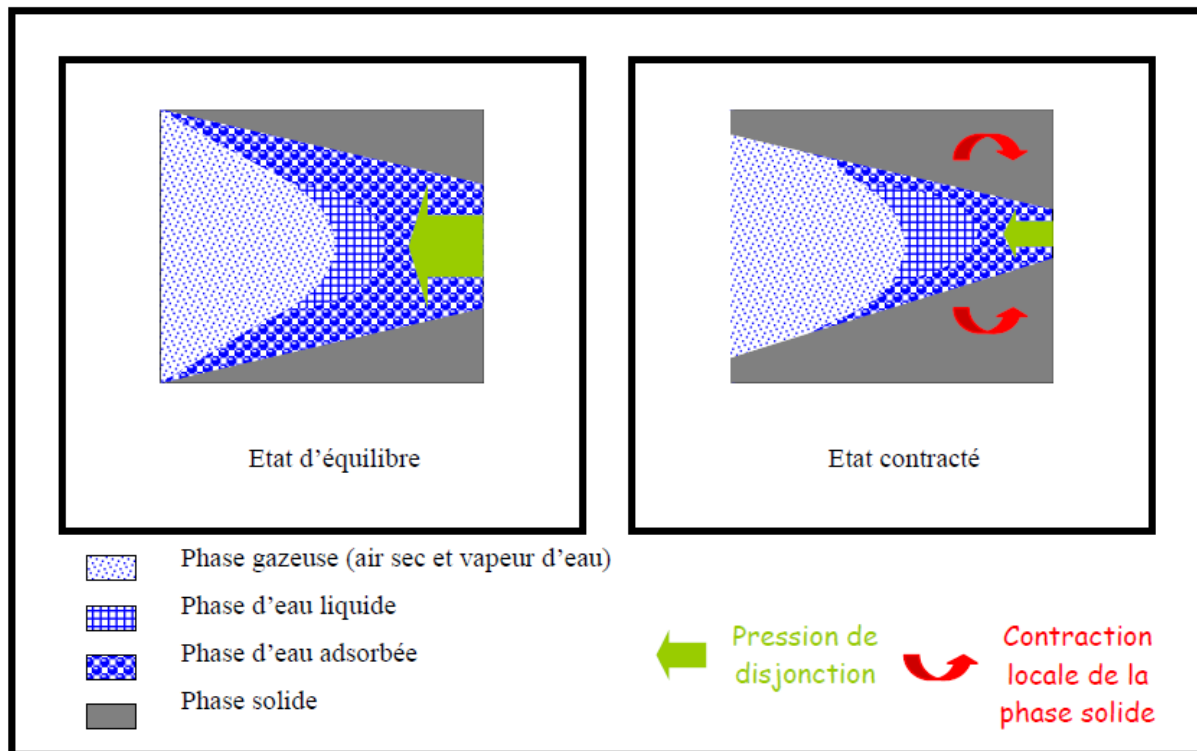


Figure 1.14. Schématisation du retrait par variation de pression de disjonction (Flore BRUE, 2009).

c) La force capillaire

Ces forces sont la principale cause du retrait. La diminution de l'humidité relative au sein du béton (due au séchage) induit une diminution de la pression de l'eau liquide, provoquée par la vaporisation de celle-ci. La coexistence des phases liquides (eau) et gazeuses (vapeur d'eau et air sec) entraîne la formation d'un ménisque à l'interface liquide/gaz, et donc l'apparition de tensions capillaires. Elles entraînent alors la contraction du squelette solide (BENKECHKACHE, 2012).

2.2.5. Retrait thermique

Il est dû aux gradients de température qui se manifestent dans le béton lors d'un déséquilibre calorifique. Ces variations de température interne sont induites soit par une source de chaleur externe (d'origine naturelle, climatique ou industrielle par traitement thermique ou cure) soit par une source interne, comme celle issue de la nature exothermique des réactions d'hydratation. La quantité de chaleur interne produite par l'hydratation peut être assez importante surtout dans les ouvrages massifs où la capacité de

conduction thermique du béton est faible comparée aux cinétiques d'hydratation. Ceci conduit à un fort gradient entre le cœur du béton, où la température est assez élevée, et l'extérieur, qui a commencé à se refroidir. La température due à la chaleur d'hydratation peut atteindre les 80° C dans le cas d'ouvrage massif (pile de pont par exemple (DIVET ,2001). Cette compétition entre la dilatation thermique à l'intérieur et la contraction à l'extérieur, à un moment où le béton est déjà rigide, entraîne la création de contraintes supplémentaires en tractions. Si ces contraintes dépassent la résistance limite du matériau, une fissuration se produit. Selon la nature de la structure mise en jeu, deux types de fissuration thermique peuvent être ainsi distingués :



- la fissuration de peau : (cas des blocs de fondation coulés en continu, segments de piliers...), elle est due aux gradients locaux de température. Ces fissures sont toutefois peu ouvertes vu que la distance séparant deux fissures principales consécutives est de l'ordre de grandeur de la profondeur de la zone de traction, qui ne peut excéder le quart de l'épaisseur de la structure.

- la fissuration localisée : Dans le cas des joints de bétonnage (plaques minces coulées sur plusieurs couches) ou des structures à extrémité(s) fixée(s) (barrages, plaques fixées au bloc de fondation, chape sur support rigide ou sol...), des fissures localisées peuvent avoir lieu. Elles sont largement espacées (dans les chapes en béton continuellement restreint 'CRC', la distance entre deux fissures peut être supérieure à 50 m) et généralement beaucoup plus ouvertes que les précédentes (HAOUAS 2007).

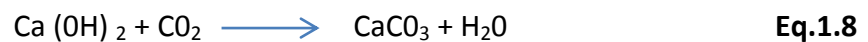
Notons que cette grande variabilité dans l'espacement (allant de quelques centimètre jusqu'à plusieurs dizaines de mètre) et l'ouverture des fissures est plutôt liée à la fonction critique des conditions aux limites mécaniques de la structure qu'au paramètre thermiques et mécaniques du matériau.

2.2.6. Le retrait de carbonatation

2.2.6.1. Définition

Le retrait de carbonatation est un type de retrait spécial causé par une réaction chimique. Quand le béton durci est exposé à l'air, le gaz carbonique présent dans l'air pénètre à l'intérieur du béton et réagit avec l'hydroxyde de calcium (portlandite), libéré par l'hydratation, pour former du carbonate de calcium (BARRON, 1982) :

Cette réaction libère de l'eau, car son bilan s'écrit :



Cela peut engendrer :

- une augmentation du volume des solides
- une modification de la distribution des tailles de pores ainsi qu'une réduction du volume poreux et de la surface spécifique du matériau.
- une lente augmentation de la masse des échantillons de faible épaisseur au cours du temps.
- une libération d'eau chimiquement liée qui augmente donc la quantité d'eau évaporable.

Le retrait de carbonatation est le résultat d'une augmentation de la Compressibilité de la pâte due à la dissolution de la portlandite cristallisée. Ce type de retrait est limité, quand le béton est exposé à l'environnement d'une humidité relative, soit faible (< 25%) ou très élevée (~ 100%); d'une manière générale, il est maximal quand l'humidité relative est d'environ 50% (Swenson et col, 1968 cité par Ingrid APAYA, 2011).

La profondeur de carbonatation est très faible dans un béton d'une qualité satisfaisante, dont la porosité n'est pas très élevée. À cause de cela, le retrait de carbonatation est souvent considéré comme insignifiant et il n'est pas pris en considération dans la pratique (KOSMATKA et col, 1995).

2.2.6.2. Mécanismes du retrait de carbonatation

Comme on l'a déjà vu la carbonatation de Ca(OH)_2 entraîne une augmentation de volume des solides de 12% à 19% selon que le produit de la réaction est de la calcite ou de vaterite. Il paraît donc à première vue curieux que cette réaction entraîne un retrait et non un gonflement. Pourtant toutes les expériences mettent en évidence un retrait. Afin d'expliquer cette apparente contradiction, diverses explications ont été avancées. On a d'abord attribué le retrait de carbonatation à la perte d'eau provoquée par la réaction. On a observé que la quantité d'eau libérée par cette réaction était accompagnée d'un retrait qui est du même ordre de grandeur que celui que provoque le départ d'une même quantité d'eau, sans carbonatation. Cette explication est toutefois peu satisfaisante, car elle n'explique pas comment le départ de l'eau provoque du retrait. De plus, on trouve de façon générale qu'un corps poreux solide subit ou ne subit pas de retrait lorsqu'il perd de l'eau. Si la perte d'eau est accompagnée d'un retrait, alors invariablement le corps a une humidité interne plus faible qu'avant cette perte, et réciproquement. Le retrait de carbonatation n'est par contre pas accompagné d'une diminution d'humidité interne, ce qui montre que le retrait de carbonatation est lié à d'autres mécanismes.

Cette constatation a conduit (POWERS 1962, cité par Houst 1993) à émettre une hypothèse sur le retrait de carbonatation. Selon cet auteur, le retrait de carbonatation est dû à la dissolution des cristaux d'hydroxyde de calcium alors que ceux-ci sont soumis à une contrainte de compression.

(Powers 1962 cité par DINH 2012) s'assume que dans les conditions partiellement saturées, le retrait est dû à l'augmentation temporaire de la compressibilité de la pâte de ciment résultant de la dissolution de la portlandite (CH) à partir des régions sous la contrainte de compression (créée par la tension capillaire dans le liquide). La carbonatation des silicates de calcium hydrates (C-S-H) n'est donc pas estimée significativement.

D'autre part la carbonatation des particules de C-S-H, le silicate de calcium hydraté, a lieu par une réaction topo chimique, c'est-à-dire sans transport de matière ou dissolution. La carbonatation du C-S-H ne provoque ainsi pas de déformation de l'échantillon.

La diminution de l'eau chimiquement liée, c'est-à-dire de l'eau faisant partie des particules de C-S-H, a également été avancée comme cause du retrait de carbonatation. Dans ce cas, il faut attribuer le retrait de carbonatation, non plus essentiellement à l'hydroxyde de calcium, mais bien au C-S-H. Cette explication est basée sur l'observation qu'il y a moins d'une molécule de CO₂ avec la pâte de ciment durcie, alors que lors de la carbonatation de l'hydroxyde de calcium, une molécule libère une molécule d'eau. Selon (E.G. Swenson 1968 cité par DINH 2012) suggère que la carbonatation favorise la polymérisation et la déshydratation des silicates de calcium hydrates (C-S-H), conduisant au retrait.

3. LES TECHNIQUES DE MESURE DU RETRAIT

3.1. Déformations endogènes à l'état frais (0-24 heures)

Il existe deux grandes classes de méthodes de mesure des déformations endogènes : les mesures linéiques et les mesures volumiques.

3.1.1. Les mesures linéiques

Les mesures linéiques des déformations endogènes conduisent couramment à mesurer le changement de longueur de l'échantillon par l'emplacement d'un transducteur à l'extrémité du spécimen. Deux groupes peuvent être distingués: les mesures verticales et horizontales.

Plusieurs dispositifs de mesure fondés sur l'un des deux principes ont été développés. Parmi les différents travaux réalisés, on peut mentionner, pour :

3.1.2. Les mesures verticales

Boivin (2001) coule ces échantillons dans des cylindres en Téflon (PTFE) de diamètre de 2 cm et de hauteur 16 cm (Figure1.15). Après coulage sous vibrations, l'éprouvette est mise en rotation jusqu'à la prise à une vitesse de 4 tours/min. Dès que le démoulage est fait, les éprouvettes sont emballées avec une double couche de papier aluminium adhésif. Les mesures sont ensuite effectuées verticalement au rétractomètre. La longueur de référence est celle du prisme au moment du démoulage.



Figure 1.15. Schéma du dispositif de mesure de retrait endogène linéique.

3.1.3. Les mesures horizontales

BOUASKER (2007) a développé un dispositif qui permet de mesurer les déformations linéiques du spécimen juste après le moulage. Ce dispositif comporte un moule plissé appelé dilatomètre qui permet, grâce à sa souplesse (très faible module d'élasticité), de changer les déformations volumiques en déformations linéiques avant la prise (Figure 1.16). Les mesures linéiques de déformations endogènes sont très délicates à la direction de la mesure et les deux formes de l'essai (vertical ou horizontal) présentent un désaccord entre leurs résultats aux moins dans la période qui précède la prise. Ce phénomène s'explique par une perte d'homogénéité avant la prise dans le cas de la mesure verticale suite à la sédimentation du matériau. (BARCELO et col, 1999) suppose que la déformation endogène peut ne pas être isotrope même après la prise, et ceci peut expliquer, en partie, la différence entre les deux techniques.

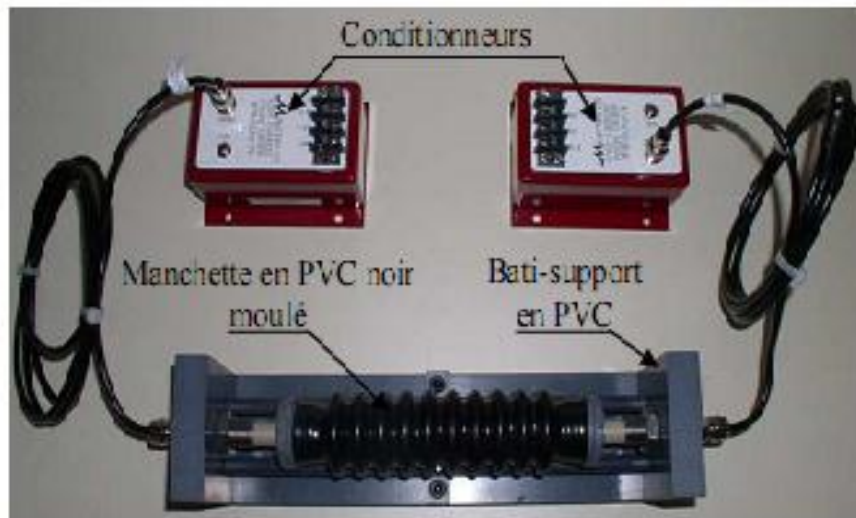


Figure 1.16. Schéma du dispositif de mesure de retrait endogène linéique.

3.1.4. Les mesures volumiques

La mesure volumétrique de la déformation endogène est généralement réalisée en mettant la pâte fraîche de ciment dans une membrane en Latex introduite dans l'eau. Le changement du volume de la pâte de ciment est déterminé à travers une pesée hydrostatique pour laquelle les différences de pesées sont converties en différences de volume (figure 1.17)

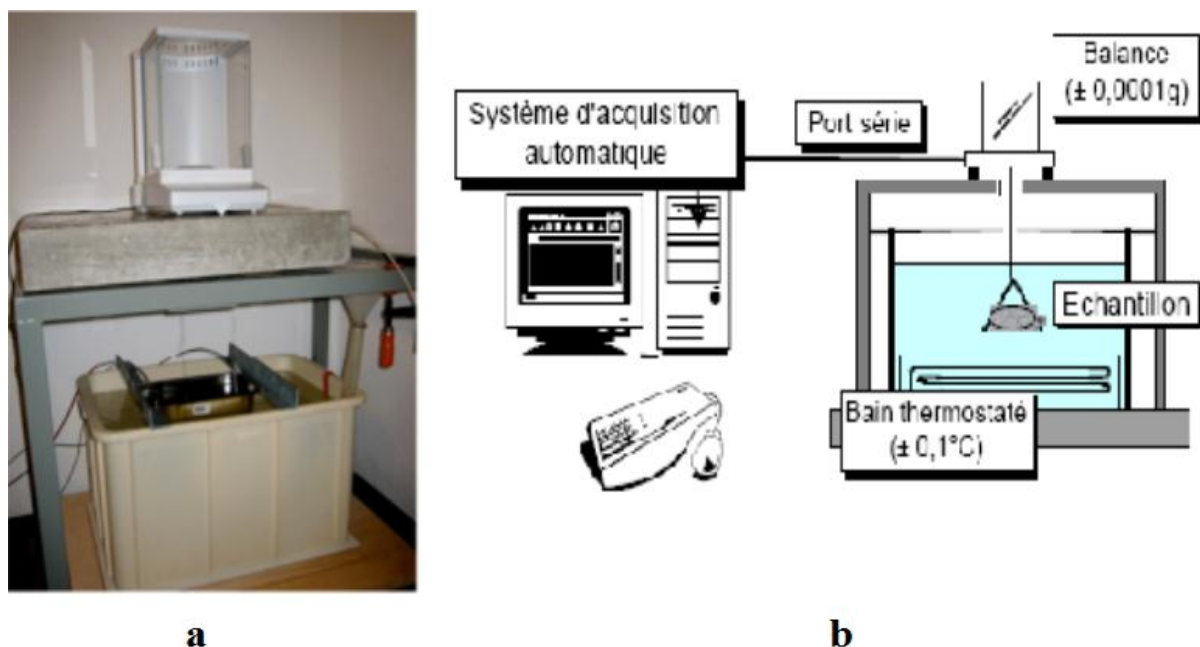


Figure 1.17. Schéma du dispositif de mesure de retrait endogène volumique (MOUNANGA, 2003).

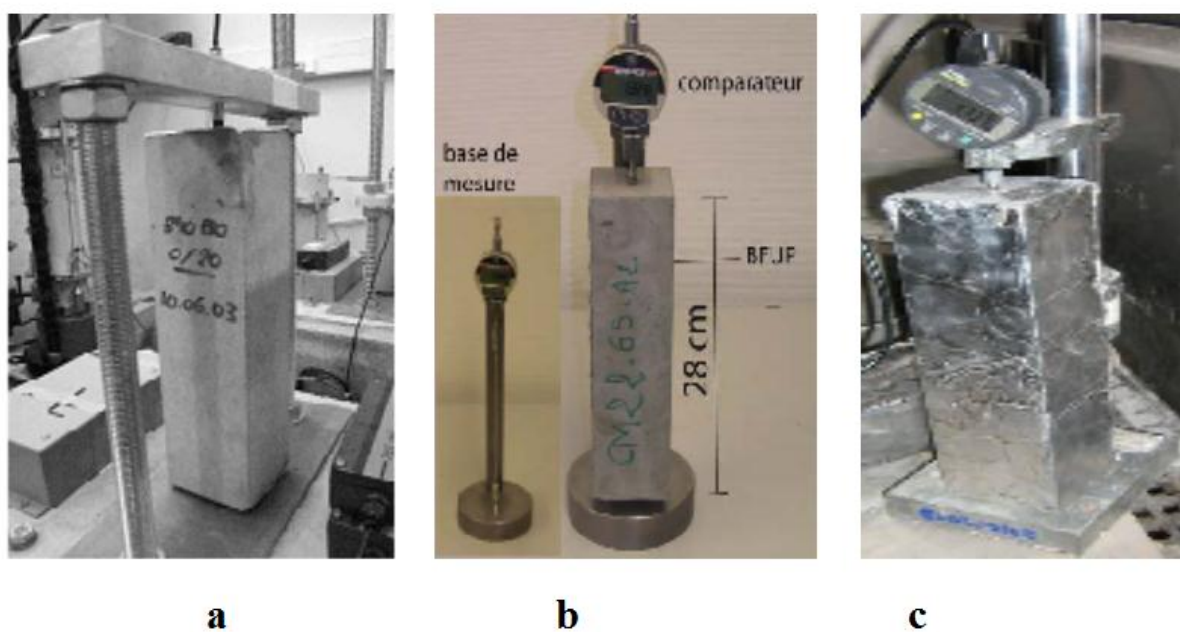
3.2. A l'état durci (au-delà de 24 heures)

Le but de cet essai est de mesurer, en fonction du temps, la variation de longueur due aux effets de l'hydratation et de la dessiccation des matériaux cimentaires.

Cet essai est exécuté sur matériau durci grâce à un rétractomètre admettant de mesurer les variations de longueur des spécimens installés dans une salle à $20 \pm 1^\circ$ de température et à $50 \pm 5\%$ d'humidité relative, selon deux conditions :

- Avec échange hydrique du matériau avec l'ambiance : on obtient le retrait total,
- Sans échange hydrique avec l'ambiance en enveloppant les éprouvettes dans une (ou deux) feuille (s) de papier aluminium autocollant : on mesure le retrait endogène.

Les échantillons testés dans cette étude sont prismatiques (de dimensions 7x7x28 cm). Ceci a entraîné l'utilisation d'un dispositif de mesure présenté sur la (figure 1.18).



CHAPITRE

2

PARAMETRES
INFLUENTS SUR
LE RETRAIT
DES BETONS

INTRODUCTION

Le présent chapitre met en évidence l'influence des constituants intrinsèques du béton (température, humidité...etc.) sur le retrait des bétons formulés et ce si dans le but de comprendre leurs rôles et leurs susceptibilités d'entrer dans la formulation et chercher à mieux cerner les mécanismes qui régissaient les comportements en ce qui concerne le retrait.

SOMMAIRE DU CHAPITRE 2

« Paramètres d'influence internes »	31
1. Influence du Rapport E/C	31
2. Influence du volume de pate sur le comportement du béton vis-à-vis du retrait.....	35
3. Influence du ciment sur le retrait.....	36
4. Influence des additions minérales sur le retrait.....	37
4.1. L'influence de la fumée de silice sur le retrait	38
4.2. L'influence de la cendre volante sur le retrait	39
4.3. L'influence de la pouzzolane sur le retrait	41
4.4. L'influence du Laitier sur le retrait	45
4.5. L'influence des fillers calcaires sur le retrait	45
5. Influence des Granulats sur le retrait.....	46
6. Influence des adjuvants sur le retrait.....	50
« Paramètres d'influence externes »	51
7. L'influence de la température sur le retrait	51
8. L'influence de L'Humidité sur le retrait.....	51
9. Bilan :	53

« Paramètres d'influence internes »

1. Influence du Rapport E/C

Le rapport E/C est un paramètre qui influence directement l'amplitude du retrait. Beaucoup de chercheurs ont trouvé que le rapport E/C influe significativement sur le retrait endogène et de séchage puisque ce rapport détermine la porosité du béton, (NEVILLE, 2000).

NEVILLE (2000) a trouvé que le retrait d'une pâte de ciment est directement proportionnel au rapport E/C lorsque ce rapport est compris entre 0,20 et 0,60. Cette relation pourrait être généralisée même au béton, même si d'autres paramètres rentrent en jeu.

Toutefois, ce rapport a un effet moins important sur le béton en raison des agrégats. Il a été montré que, pour un volume de pâte constant, le retrait de séchage n'est pas sensiblement affecté par la réduction du rapport E/C, (FORTIN, 2005).

Le rapport E / C joue un rôle prépondérant sur l'humidité relative interne. Pour un faible rapport E/C, l'humidité relative décroît significativement en raison de l'autodesiccation conduisant à un retrait endogène supérieur. (JAOUADI, 2008), (LOUKILI, 1996), (TAZAWA et col, 1995).

TAZAWA et col. (1998) ont constaté une stabilisation du retrait à long terme. Ceci est expliqué par le fait de la diminution des réactions d'hydratation qui est due à un manque d'eau dans le réseau poreux.

HUA et Col. (1996) ont effectué un travail expérimental pour un faible rapport E/C afin de valoriser son influence sur le retrait endogène, ils ont constaté une augmentation avec la hausse de la densité des hydrates, car les dépressions capillaires sont plus fortes d'où la diminution d'eau permet non seulement de diminuer le volume total des pores mais aussi de réduire leur diamètre. Ainsi pour un rapport E/C de 0.45 à 0.25 le volume total des pores passent de 40% à moins de 20%, et dans le même temps, le diamètre moyen des plus gros pores diminue de 10 fois.

Le retrait de dessiccation diminue aussi avec la hausse de la densité des hydrates car l'évaporation de l'eau est plus faible, Il convient de prendre des dispositions de cure à court terme pour s'assurer de limiter les effets du retrait dans ce cas, les auteurs ont remarquer que le retrait endogène est négligeable pour des rapports E/C élevés est très important pour des rapports E/C inférieurs à 0.4, c'est la raison pour laquelle le retrait endogène est important pour des bétons à hautes performances qui nécessitent un rapport de E/C au voisinage de 0.3, (figure 2.1).

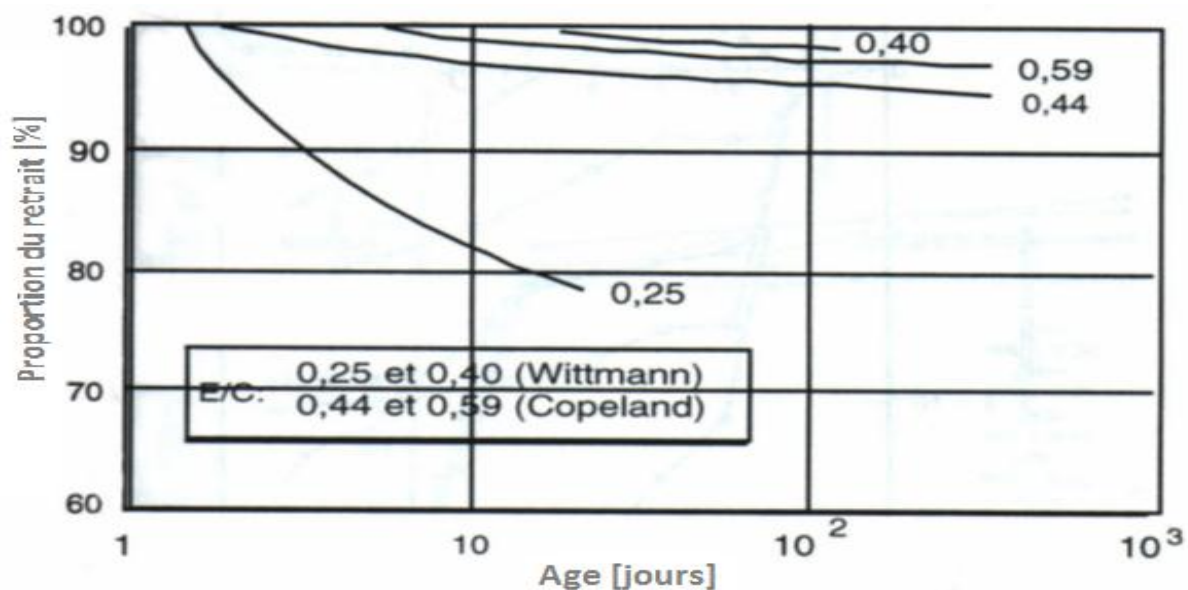


Figure 2.1. Influence du rapport E/C sur la valeur du retrait (HUA et Col, 1996).

TAZAWA et col (1998) ont constaté une limite du retrait à long terme, qui peut être expliqué par l'arrêt de la réaction d'hydratation lorsque la teneur en eau dans le réseau poreux baisse sous un certain seuil (figure 2.2), Cette même figure présente l'influence du rapport E/C sur la valeur du retrait en fonction de la quantité de fumée de silice (F.S) et de l'adjuvant (ADJ). Par exemple : N23-10-0.6 représente E/C = 0.23, 10 % de fumée de silice et 0.6% d'adjuvant.

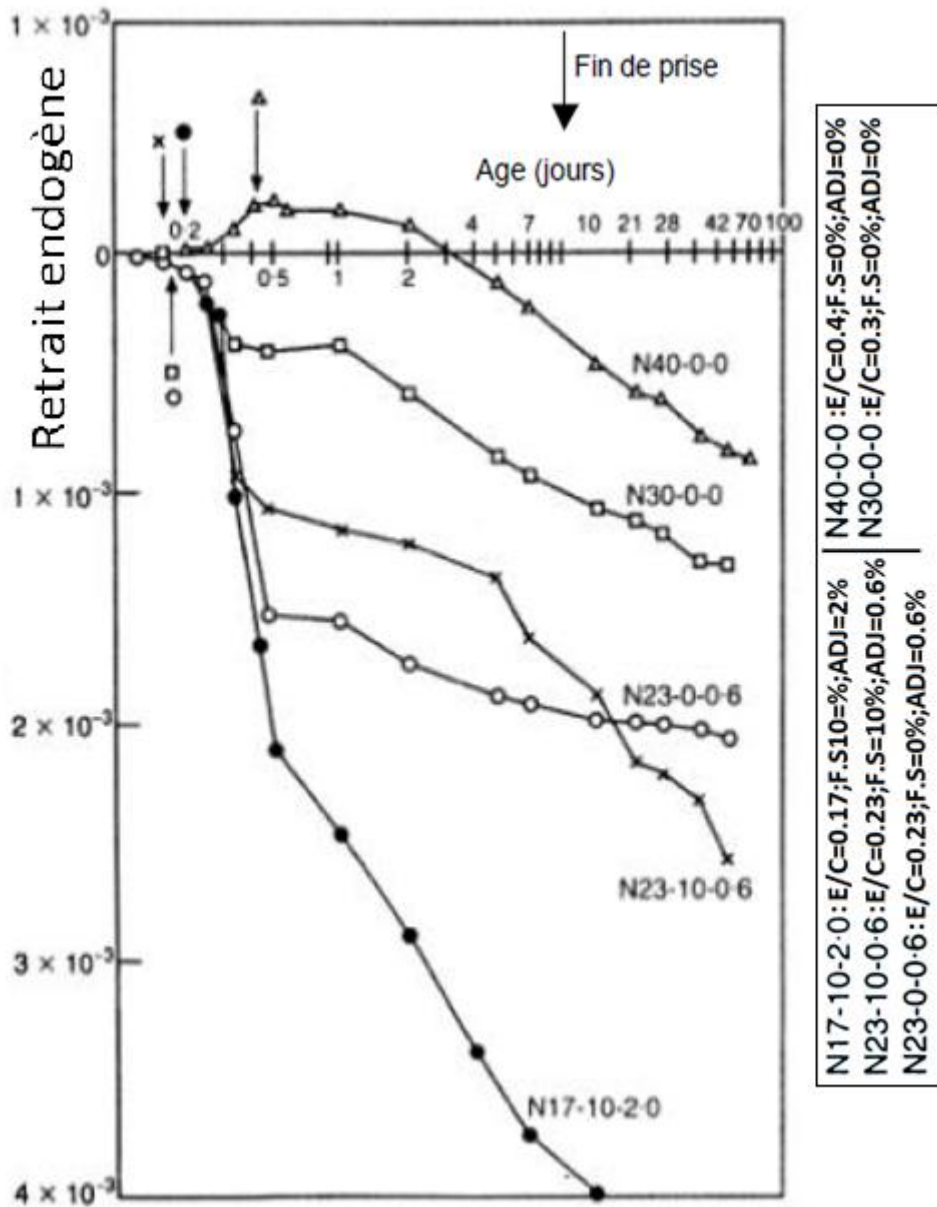


Figure 2.2. Influence du rapport E/C sur la cinétique et l’amplitude du retrait endogène. Les références des courbes indiquent (le type de ciment)-(le rapport E/C en %)-(la teneur en fumée de silice en %)-(le dosage en superplastifiant), (TAZAWA et col, 1998).

BAROGHEL et col (2000) ont étudié uniquement l’influence du rapport E/C sur le retrait endogène pendant une année (figure 2.3) .ils ont observé que l’augmentation du rapport E/C réduit le retrait. Ils ont aussi noté que le retrait a tendance à s’arrêter après 150 jours. Ils ont trouvé une expansion visible lorsque le rapport E/C=0.6. Les mêmes auteurs ont aussi montré qu’il existe une corrélation linéaire entre le rapport E/C et la valeur du retrait endogène à 28 et à 360 jours (figure 2.4).

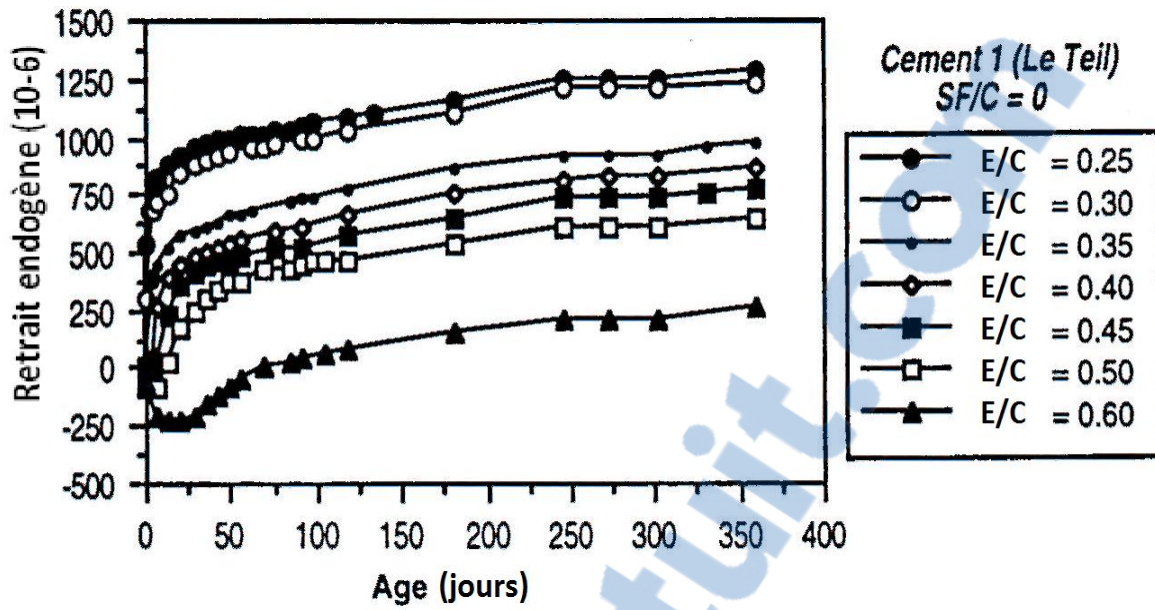


Figure 2.3. Influence du rapport E/C sur la valeur du retrait (BAROGHEL et col, 2000).

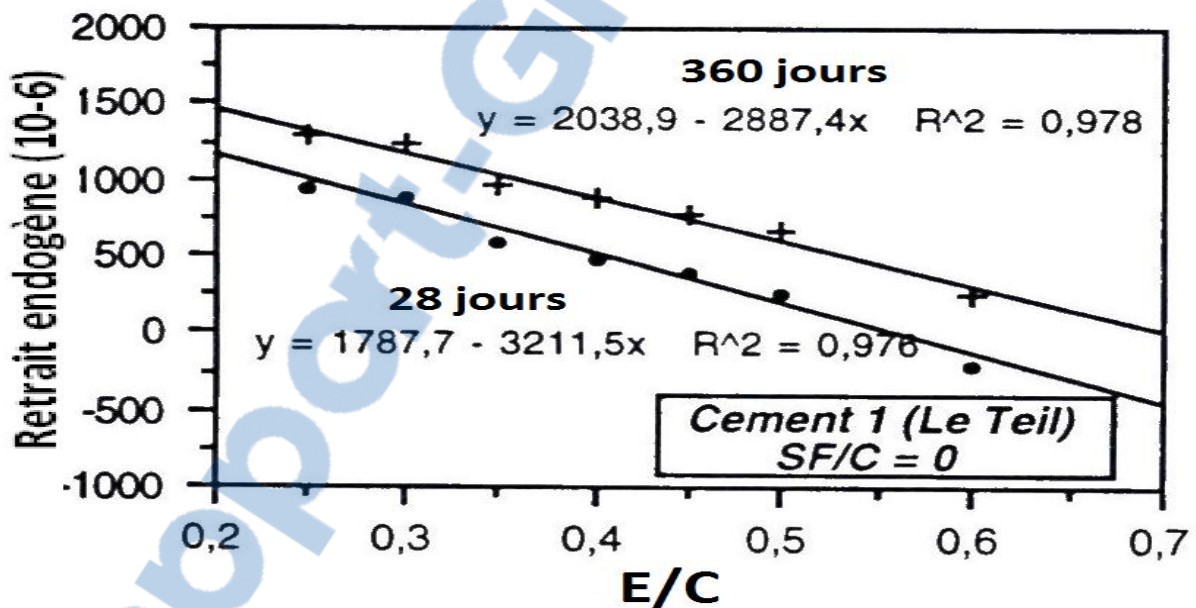


Figure 2.4. Corrélation entre le retrait à 28 et à 360 jours et le rapport E/C (BAROGHEL et col, 2000).

En conclusion toutes ces études montrent la grande influence du rapport E/C sur le retrait et spécialement endogène.

2. Influence du volume de pâte sur le comportement du béton vis-à-vis du retrait

La pâte est formé essentiellement par le ciment ; les additions ; l'eau. En effet, une quantité élevée de la pâte surtout pour les BAP les rend susceptibles d'être plus déformables que les bétons vibrés. En mode endogène les BAP présentent un retrait endogène à 28 jours similaire à celui des bétons vibrés. Au-delà d'un an, le retrait endogène des BAP se révèle être légèrement supérieur à celui des bétons vibrés (de l'ordre de +20 à +70%), qui peut s'expliquer par la quantité de pâte élevée (ASSIÉ, 2004).

Et puisque les granulats ne connaissent pas de retrait, il devient une fonction croissante du volume de pâte car ce dernier reste un paramètre majeur qui contrôle le retrait du béton ainsi l'influence devient encore plus significative lorsqu'un courant d'air est appliquée à la surface des échantillons (LOUKILI, 2011), (figure 2.5).

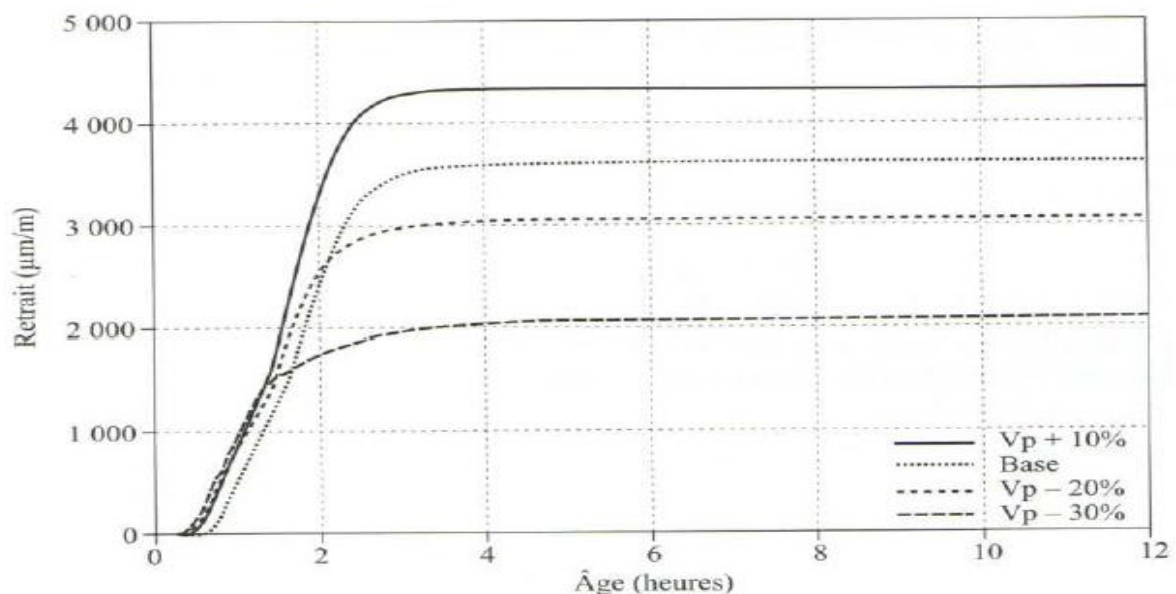


Figure 2.5. Retrait plastique de bétons avec 4 fractions volumiques de pattes différentes (de -30 à + 10% par rapport à la composition de base)-cas d'un séchage forcé (LOUKILI, 2011).

3. Influence du ciment sur le retrait

Le ciment est un des composants essentiels du béton. Agissant comme une colle, il permet d'agréger les différents constituants du béton. C'est un liant hydraulique qui fait prise par hydratation, c'est-à-dire au contact de l'eau, vu que ce dernier joue un rôle déterminant dans la fabrication des mortiers et des bétons à base de liants hydrauliques.

D'un côté, Le ciment utilisé Peut influencer sur l'évolution du retrait endogène par sa granulométrie et sa composition minéralogique. D'un point de vue morphologique, un ciment plus fin développera un retrait endogène plus important et ceci au jeune âge.

Par ailleurs, des chercheurs ont trouvé que ce sont les teneurs en C_3A , et à un degré moindre, l'aluminoferrite qui conditionne en grande partie l'amplitude du retrait endogène, l'hydratation de ces phases est en effet à l'origine d'une diminution importante de volume absolu, (MOUNANGA, 2003), (TAZAWA et col, 1995), (figure 2.6 et 2.7).

Cependant, JENSEN (2000) a obtenu des résultats différents sur l'influence du C_3A , il a observé une diminution des déformations endogènes lorsque du C_3A pur était ajouté au ciment. Ces divergences de résultats montrent qu'il n'existe pas encore aujourd'hui d'explication claire de l'effet minéralogique du ciment sur l'allure des courbes de retrait. (Mounanga, 2003).

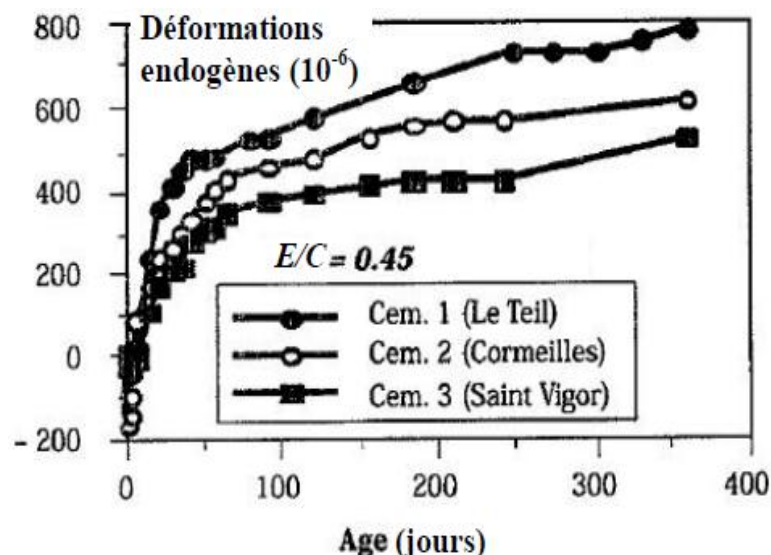


Figure 2.6. Influence de la composition du ciment sur l'évolution du retrait endogène. (Mounanga, 2003).



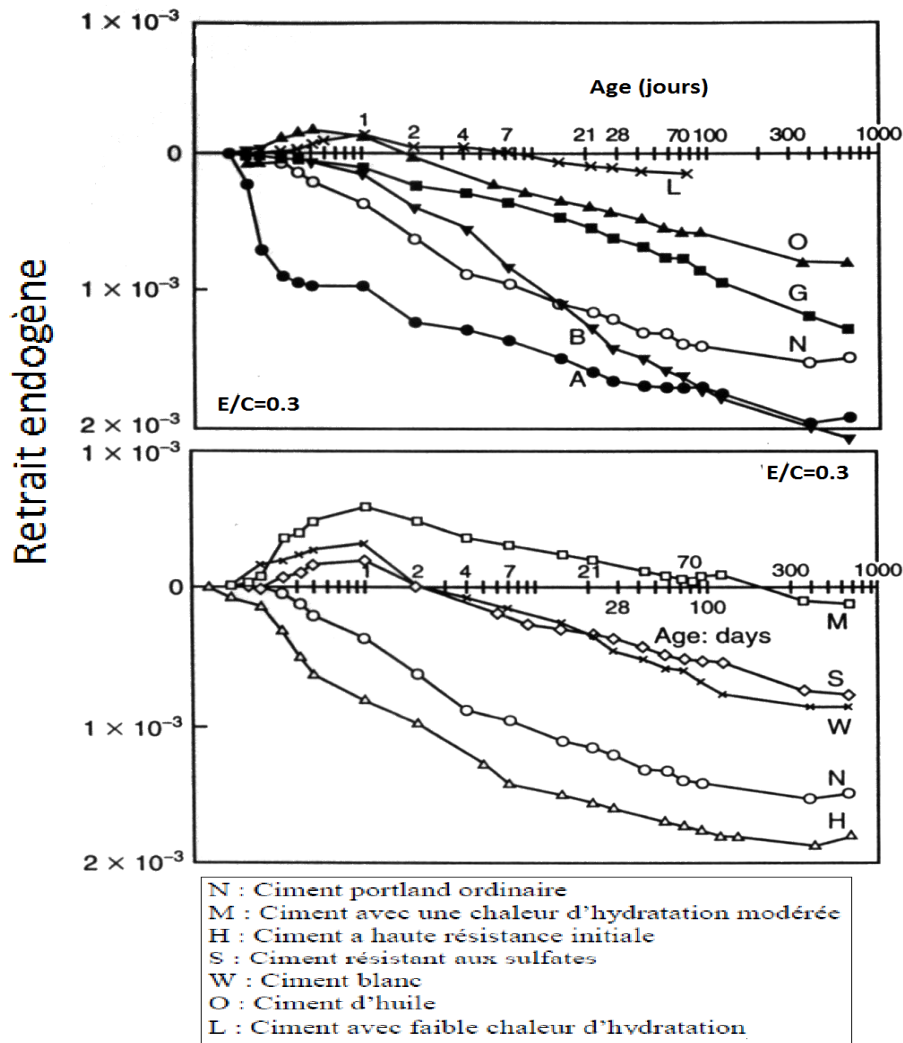


Figure 2.7. Influence du ciment sur le retrait endogène de pâtes de ciment (TAZAWA et col, 1995).

4. Influence des additions minérales sur le retrait

Les additions minérales tels que la pouzzolane ; fillers calcaires ; cendres volantes ; laitier de haut fourneau et les fumées de silice, sont souvent utilisés dans le béton pour augmenter la résistance et la durabilité et diminuer la perméabilité, et dans certains cas de réduire les coûts en remplaçant le ciment, en générale, ces fines présentent plusieurs avantages dans l'industrie et la formulation des bétons.

4.1. L'influence de la fumée de silice sur le retrait

C'est une poudre amorphe de silice extrêmement fine, récupérée dans les cheminées lors de condensation des gaz de réaction résultant de la fabrication du silicium ou d'alliages. Plusieurs études, montrent que la présence de fumée de silice accélère la réaction d'hydratation du ciment Portland. Cet effet accélérateur des fumées de silice est important lorsque celles-ci sont utilisées avec un fluidifiant, (HAYAKAWA, 1993).

Aussi plusieurs auteurs JENSEN (1996), BAROGHEL (2001), ZHANG (2003) ont trouvé que la fumée de silice augmente le retrait endogène, parce qu'elle conduit à un réseau poreux plus fin. Ceci est expliqué par le fait que la présence de la fumée de silice dans la matrice cimentaire donne un mélange anhydre très fin et très réactif.

La (figure 2.8 et 2.9) représente l'effet de la fumée de silice sur le taux du retrait endogène. L'intensité des dépressions capillaires engendrée par l'autodessiccation est alors plus grande ce qui mène à un retrait endogène plus important.

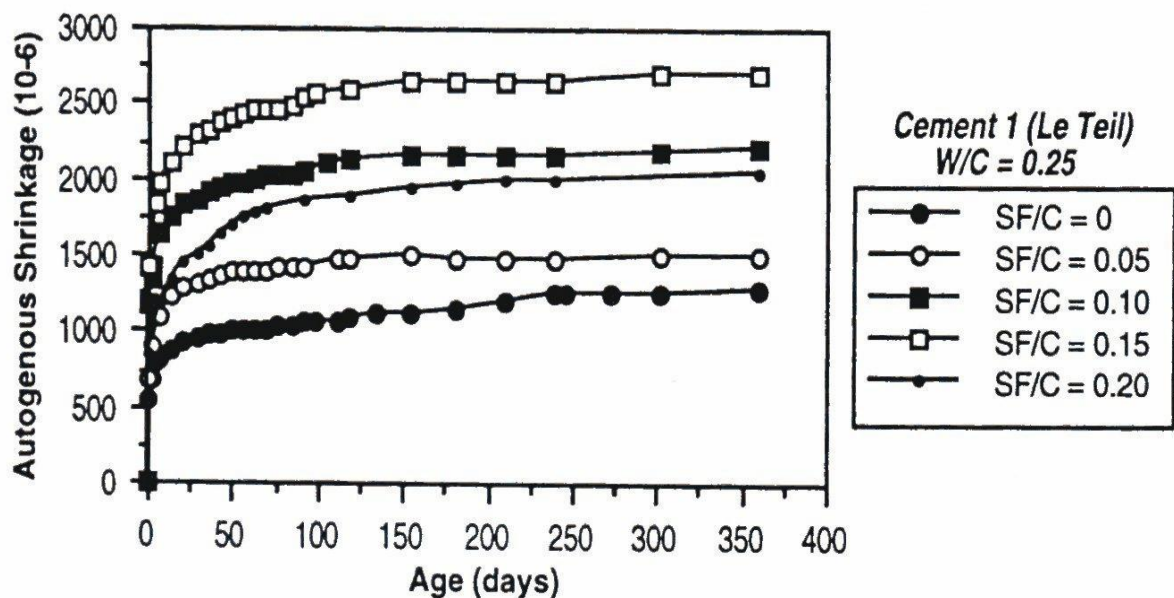


Figure 2.8. Relation entre la teneur en fumée de silice et la valeur du retrait endogène (BAROGHEL et col, 2000)

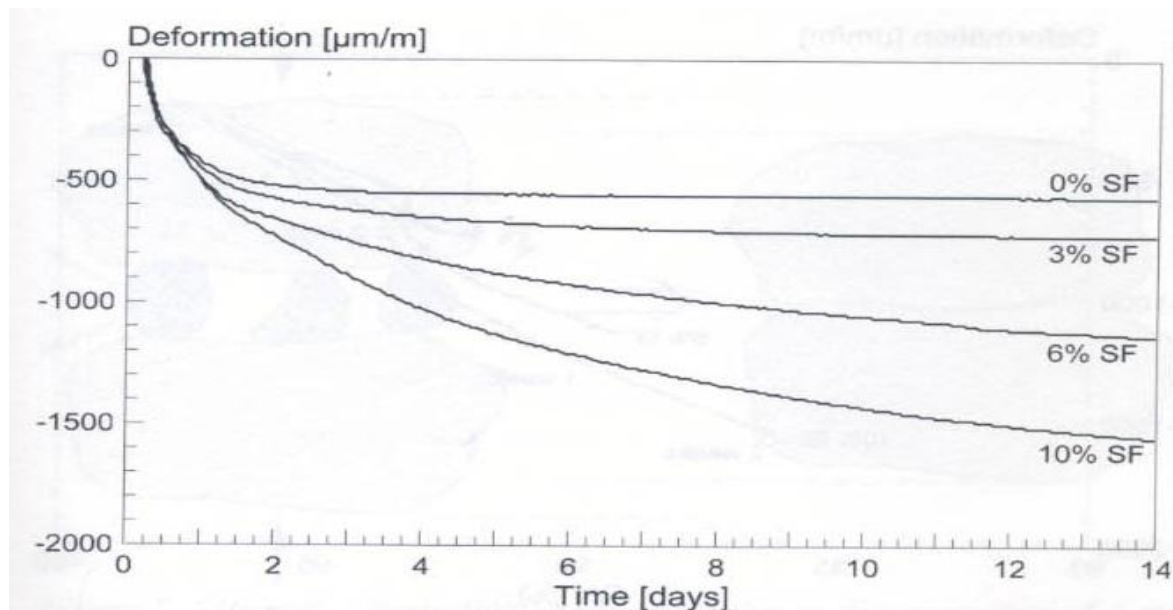


Figure 2.9. Le retrait endogène après la prise pour des pâtes de ciment à $E/C = 0.35$, (JENSEN, 1996).

4.2. L'influence de la cendre volante sur le retrait

La cendre volante est une Poudre fine constituée principalement de particules vitreuses de forme sphérique, dérivées de la combustion du charbon pulvérisé, ayant des propriétés pouzzolaniques. L'expression cendre volante désigne les cendres récupérés dans la cheminée par opposition aux cendres de foyer.

L'effet des cendres volantes sur le retrait a été souvent étudié. Les cendres volantes diminuent le retrait total, à cause de l'absence de chaux dans leur composition d'un côté et d'un autre côté parce que les cendres volantes sont moins réactives que la fumée de silice et le clinker, (SETTER et col ,1978 cité par MITANI, 2003).

KRISHNA (1996) observe une réduction du retrait, en cas de présence de la cendre volante qui diminue aussi l'adsorption des adjuvants. La dispersion des grains de ciment et de cendres volantes est alors réduite. Les forces électrostatiques (attractives) sont alors influencées par l'augmentation de potentiel zêta qui traduit le retrait par dispersion des particules, (figure 2.10).

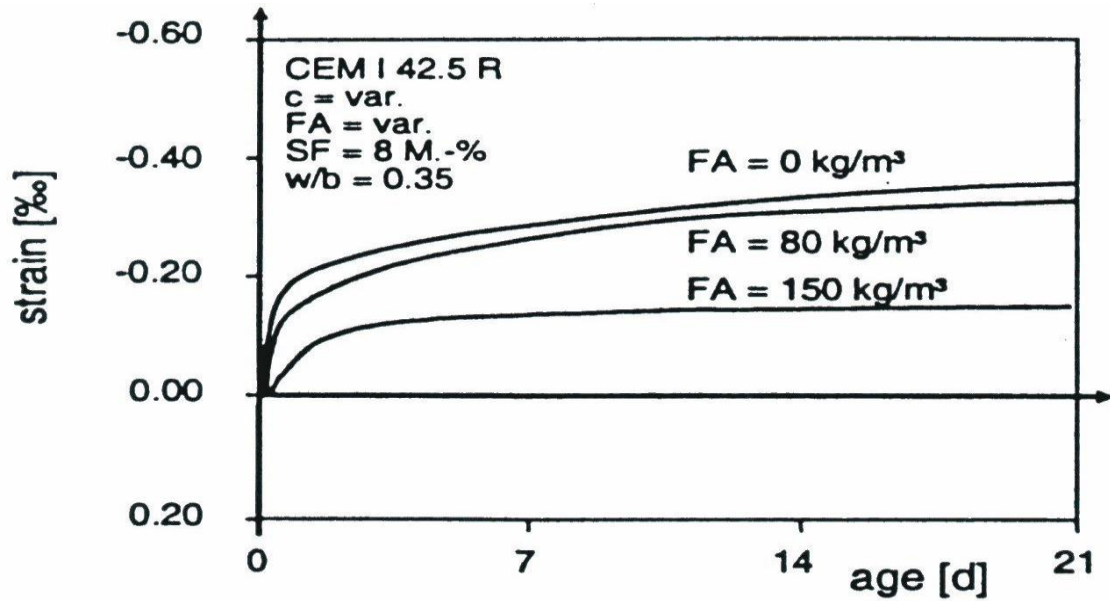


Figure 2.10. Effet des cendres volantes sur le retrait (SCHIEBL et col, 2000).

Une diminution significative du retrait total avec l'utilisation d'un pourcentage élevé de cendres volantes dans les BAP a été observée par (KHATIB, 2007), (figure 2.11), le même auteur a aussi constaté que le retrait des béton auto-plaçant est réduit de moitié après 56 jours pour une proportion de cendres volantes de 60% et que le retrait est réduit de 2/3 pour une proportion de 80% d'un béton sans ajout.

(KHATIB, 2007) a souligné donc qu'il existe une relation linéaire entre la teneur en cendre et le retrait total.

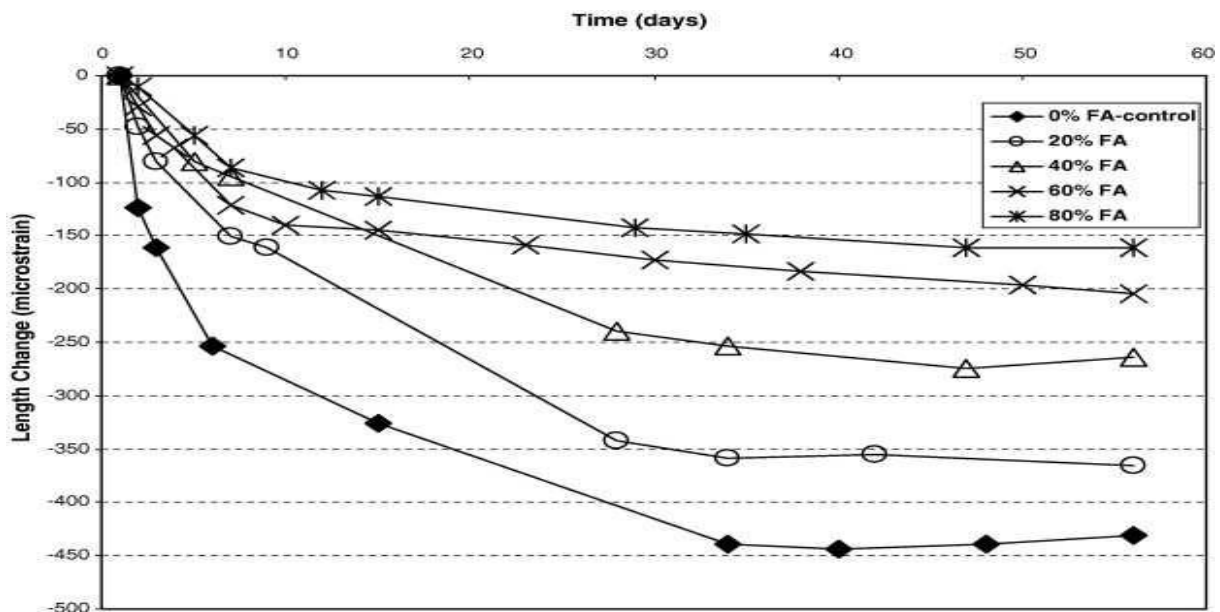


Figure 2.11. Influence de la cendre volante sur le retrait, (KHATIB, 2007).

4.3. L'influence de la pouzzolane sur le retrait

Pour une bonne protection de l'environnement, les pouzzolanes naturelles qui se compte parmi l'un des produits écologiques, amorphes et riches en silice et qui peuvent remplacer une partie non négligeable du ciment, par une combinaison à la chaux lors de l'hydratation du ciment, afin de donner des hydrates supplémentaires. Ce mélange permettra d'obtenir des bétons de très haute performance, Les pouzzolanes sont :

- Des substances d'origine volcanique ou des roches sédimentaires ayant une composition appropriée ;
- Des argiles et des schistes activés thermiquement.

MANSOUR et col (2010) ont trouvé que la pouzzolane diminue le pH et la conductivité de la suspension du ciment .et qu'elle ralentit la formation des hydrates et par la même occasion le début de la prise de la pâte cimentaire; ce qui favorise l'écoulement et la maniabilité du mortier ou du béton. Cependant la pouzzolane engendre un retrait total plus grand que celui du mortier de référence sans ajout. Les résistances mécaniques sont plus faibles aux courtes échéances mais après un mois de conservation, elles atteignent de bonne résistance.

Les résultats de cette étude confirment que l'utilisation de cette addition pouzzolanique est possible mais avec un risque de retrait total non négligeable.

Pour cela, une petite partie expérimentale a été réalisé à fin de mettre en valeur l'effet de la cendre volcanique sur le retrait des mortiers, testées à 2, 4, 8, 16 et 28 jours. L'effet sur le retrait du mortier est illustré sur la (figure 2.12), ces résultats montrent que les mortiers développent un retrait total qui augmente en fonction du temps, (Mansour et col, 2010).

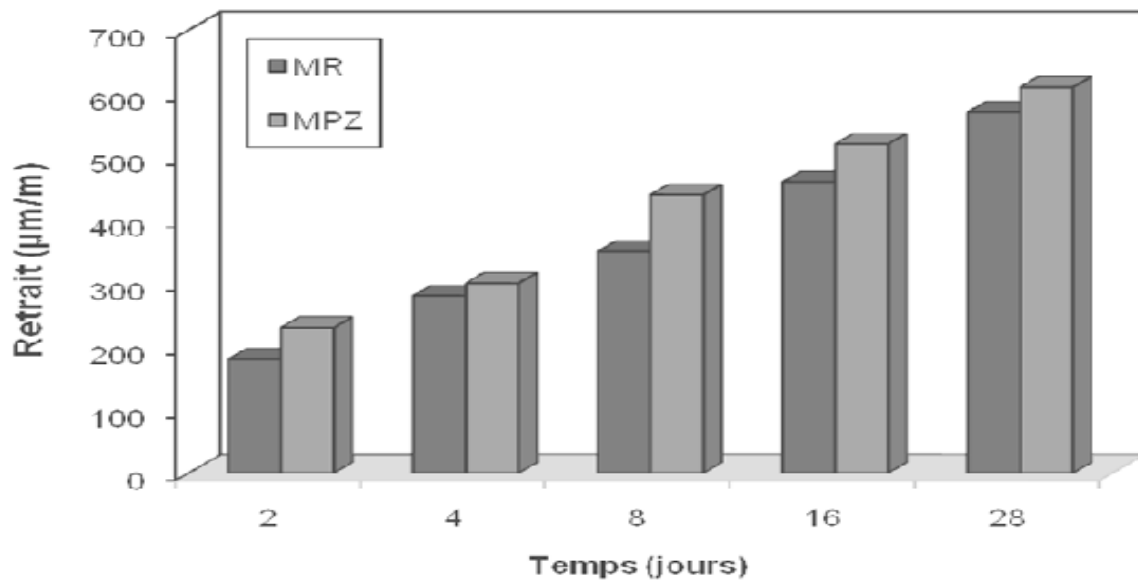


Figure 2.12. Evolution du retrait des éprouvettes de mortier (Mansour et col, 2010).

Les mêmes auteurs trouvent que Le retrait total est légèrement augmenté à la présence de la pouzzolane mais reste dans des domaines la plupart du temps acceptables.

D'autre part, (SIAD, 2010) a introduit dans ces essais : de la pouzzolane, des fillers calcaires et de la cendre volante comme ajouts minéraux dans la confection des BAP pour valoriser l'effet de ces ajouts sur le retrait. Il a observé que la pouzzolane influe sur le retrait total pour les classes de résistance de 30 MPa et 70 MPa par rapport à celui des fillers et cendre volante, Il est possible que cette petite différence de retrait soit associée à l'activité pouzzolanique de la cendre volante et de la pouzzolane naturelle, puisque la différence essentielle se produit à partir de 28 jours de conservation (la réaction pouzzolanique se manifeste à partir de cet âge. (figure 2.13 et 2.14).

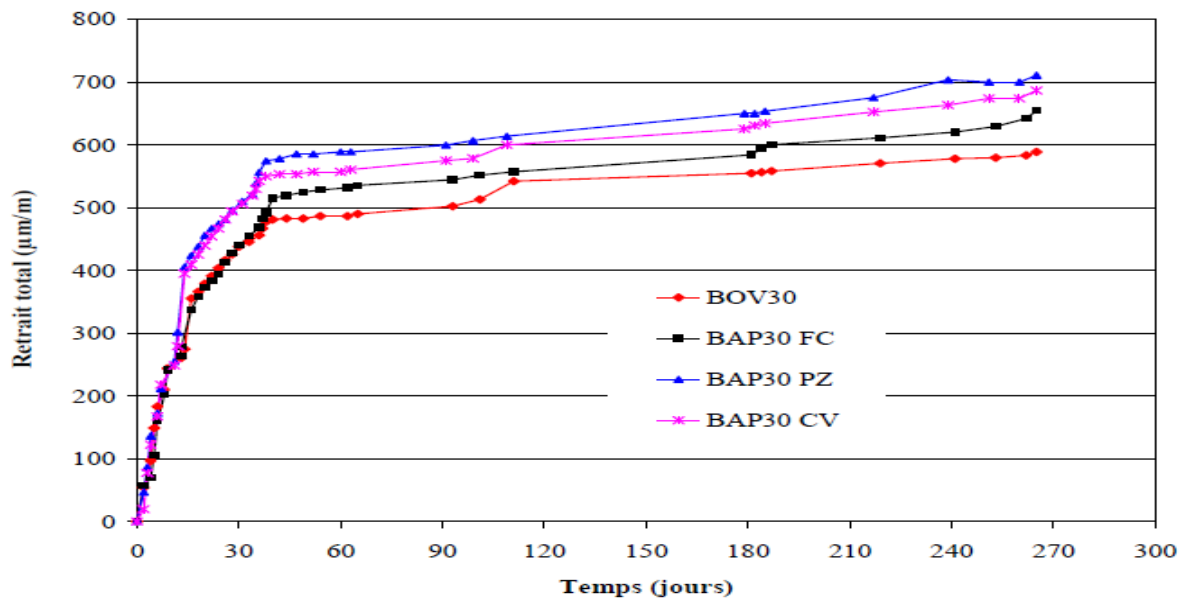


Figure 2.13. Evolution de retrait total des bétons de classe de résistance 30 MPa (SIAD, 2010).

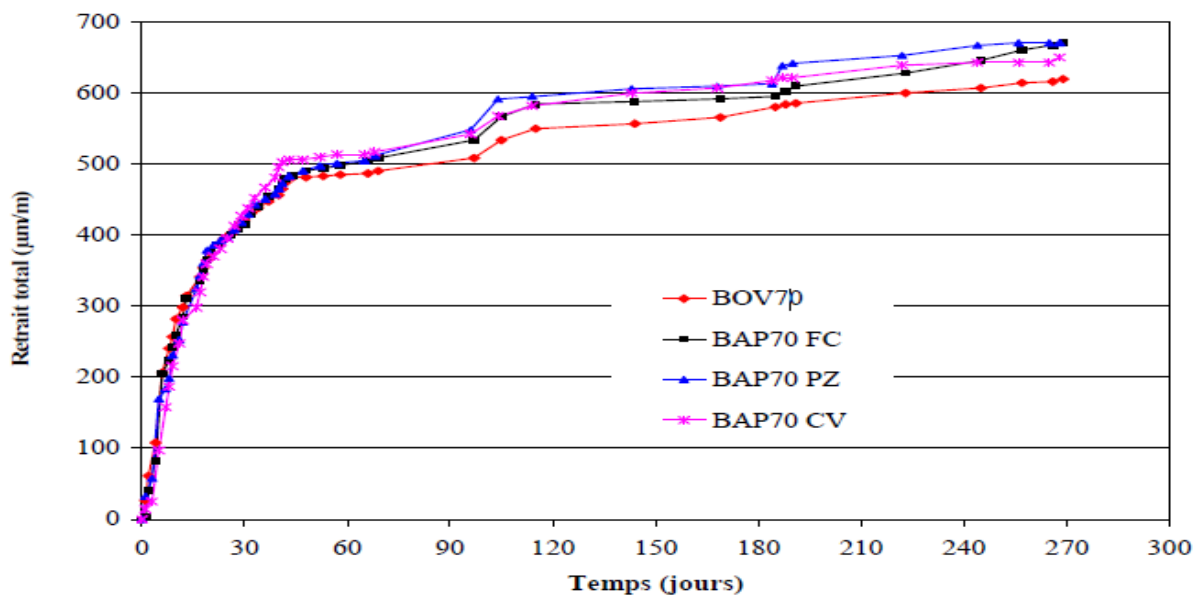


Figure 2.14. Evolution de retrait total des bétons de classe de résistance 70 MPa (SIAD, 2010).

En ce qui concerne le retrait endogène; GHRICI et col (2007) ont trouvé que ce type de retrait remarquée pour les formulations du BAP est peut être attribuée à la densification de la structure poreuse en présence de pouzzolane naturelle, observé à travers une confection des BAP avec les mêmes ajouts minéraux précédent pour des résistances de 30 et 50 Mpa, (figure 2.15 et 2.16).

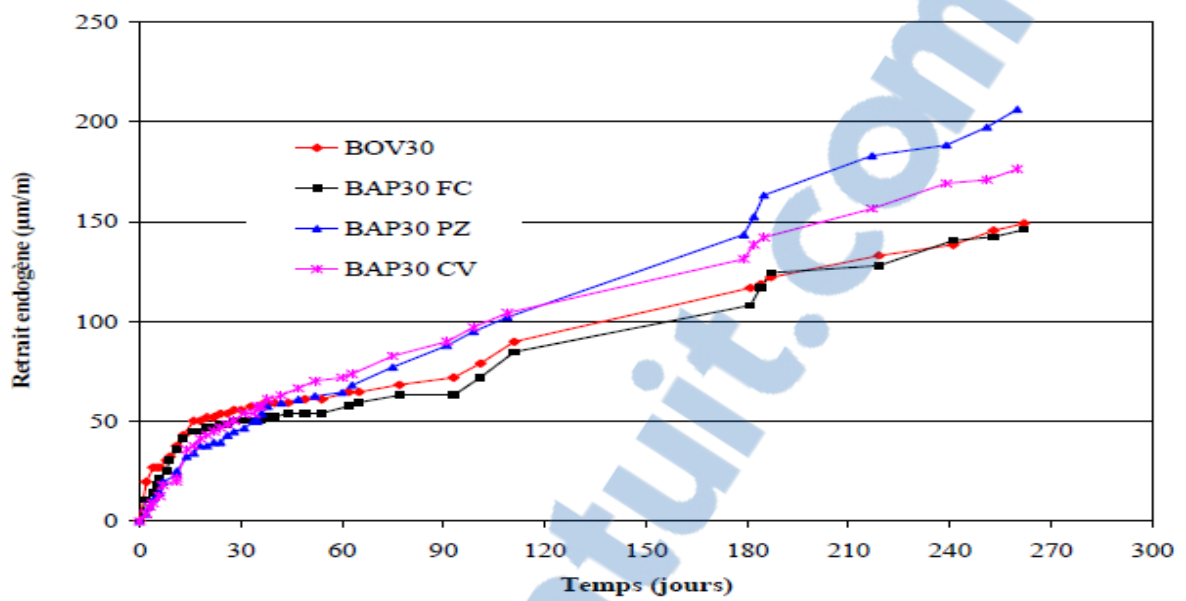


Figure 2.15. Evolution du retrait endogène des bétons de classe de résistance 30 MPa (SIAD, 2010).

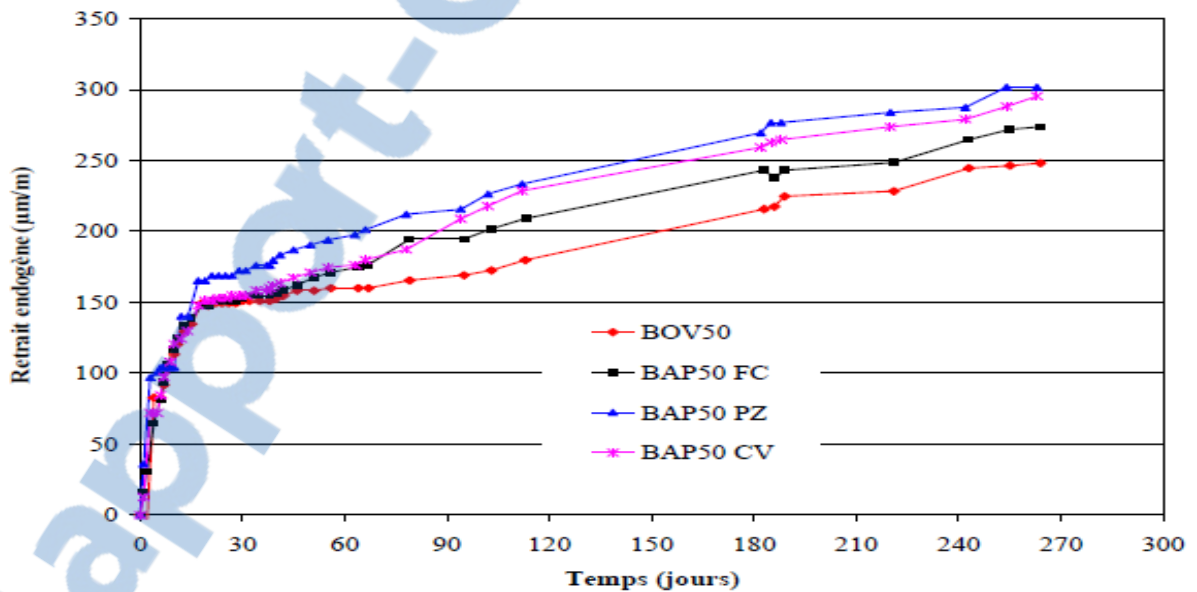


Figure 2.16. Evolution du retrait endogène des bétons de classe de résistance 50 MPa (SIAD, 2010).

4.4. L'influence du Laitier sur le retrait

Selon le Comité ACI (2003), [des résultats contradictoires sur la façon dont l'utilisation du laitier dans le béton affectent le retrait de séchage]. HOGAN et col, (1981) ont constaté que la substitution de 40, 50, et 65% de laitier (en poids) produit un retrait de 63% après 64 semaines. Aucune période de durcissement n'a cependant été signalée. Ils ont déclaré que le retrait peut être augmenté en raison de l'augmentation du volume de la pâte dans le béton quand le laitier est remplacé sur une base de masse égale.

Les mêmes auteurs ont supposé que le retrait pourrait être réduit par l'ajout de gypse avec le laitier. NEVILLE (1996) rapporte que, le laitier peut augmenter le retrait du béton jusqu'à 60%, en particulier lorsque le rapport eau-ciment est constant.

Li et col (2002) ont évalué des mélanges de béton avec un rapport E/C constant et égale à 0,30, pour déterminer l'effet du laitier sur le retrait du béton. Ils ont comparé le béton avec 65% en poids de laitier avec un mélange sans addition minérales. Ils ont constaté que le mélange avec le laitier avait un retrait légèrement supérieur au jeune âge que le mélange de référence. Cependant Après environ 60 jours, la différence de retrait pour les deux mélanges est devenue négligeable.

4.5. L'influence des fillers calcaires sur le retrait

Ils sont élaborés à partir de matériaux calcaires, de dolomites ou de calcites finement broyés. Ce sont de bons correcteurs de courbes granulométriques utilisés aussi pour augmenter la quantité de fines, et la compacité des diamètres inférieure à 0,125mm sera d'un très grand avantage.

ESPING, (2008) a étudié l'effet des fillers de calcaire avec différentes surfaces spécifiques sur la fissuration due au retrait plastique des BAP. Il a constaté que les fillers avec une grande surface spécifique diminuent le taux d'évaporation, la pression capillaire et la tendance à la fissuration plastique. Avec une quantité d'eau supplémentaire, la tendance à la fissuration due au retrait plastique est plutôt augmentée.

KATO et col, (2001) ont étudié l'influence de filler sur le retrait endogène des mortiers des substitutions de 0, 10, 20 et 30% en poids de de calcaire ont été étudié. Une légère diminution de la résistance à la compression a été remarquée avec une substitution de 10%. Ils ont aussi observé que le retrait endogène diminué avec l'augmentation des ajouts de calcaire.

5. Influence des Granulats sur le retrait

Les granulats (sable et gravier) constituent le squelette du béton qui se considère comme paramètre le plus important vis-à-vis du retrait. Ils limitent généralement la contraction de la pâte de ciment et donc affectent le retrait du béton. La rigidité des granulats à un effet important sur le retrait. Certaines études montrent que l'ampleur de retrait peut être trois fois supérieure lorsque des agrégats tendres sont utilisé, par ailleurs La taille maximale de l'ensemble n'a pas d'effet direct sur le retrait, mais l'utilisation de plus grands agrégats se traduit par un retrait (NEVILLE, 2000).

Le type de granulat influe également sur le retrait endogène car, à l'interface (pâte-granulat) le retrait est empêché par les granulats qui créent des zones de concentration de contraintes où vont se former les premières fissures (figure 2.17). D'un autre côté Un béton de granulats calcaires concassés donnera un plus fort retrait qu'un béton de granulats quartzeux ou de granulats roulés, (PANE et col, 2002), (SMADI et col, 1989).



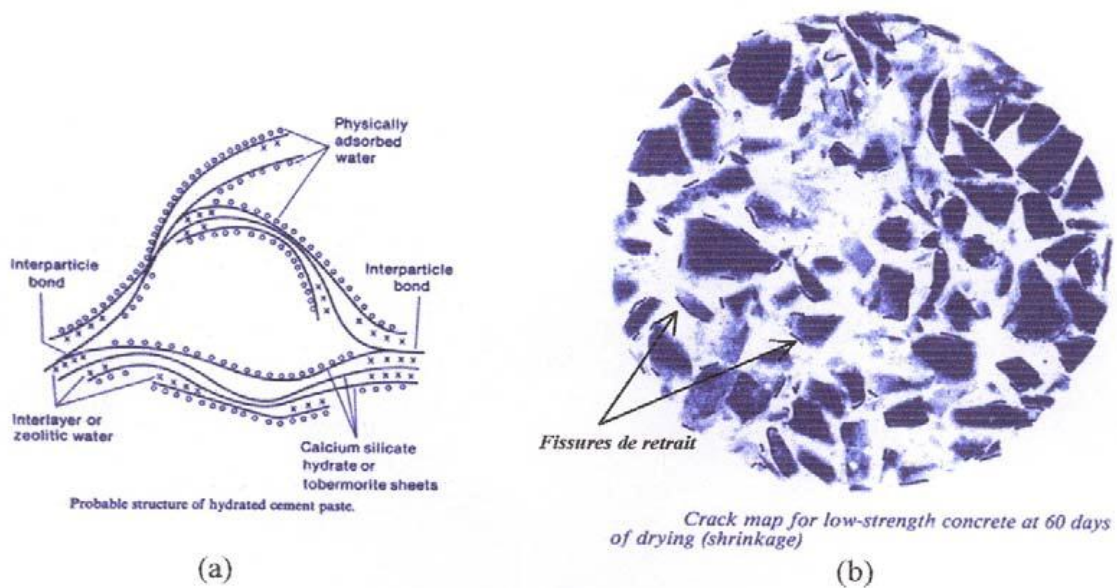


Figure 2.17. (a) Ponts cristallins lors de la prise (NEVILLE et col, 1983) ;

(b) : Localisation de fissure de retrait sur la coupe d'une éprouvette (SMADI et col, 1989).

Pour étudier l'effet des granulats sur le retrait, TAZAWA et col, (1997) ont considéré le béton comme un matériau biphasique (granulats et pâte de ciment). Les auteurs remarquent que l'augmentation de la rigidité des granulats provoque une diminution du retrait endogène. Pour expliquer ces observations, autre fois TAZAWA et col, (1998) ont supposé que la pâte de ciment exerce des contraintes de compression sur les granulats qui se contractent selon leur niveau de rigidité.

Dans le même ordre d'idée BARON, (1982), montre que le retrait d'un béton est de 6 à 10 fois plus petit que celui de sa pâte. La présence des granulats diminue le volume total de la pâte dans la même section.

La rigidité des granulats peut également être à l'origine d'un réseau de microfissures qui se forme dans la pâte environnant les granulats. En effet, les contraintes de compression exercées sur le granulat se traduisent par des efforts de traction à l'interface pâte de ciment-granulats. Lorsque ces contraintes dépassent la résistance en traction de la pâte, des microfissures se développent autour des granulats, généralement de direction normale à la surface des granulats (BOUASKER, 2007).

L'effet de l'état de saturation en eau des granulats a été aussi étudié par (TOMA, 1999). Pour deux types de béton dont l'un est fabriqué avec des granulats secs et le second avec des granulats saturés en eau, l'auteur montre que le retrait endogène du béton à base de granulats secs est plus élevé que celui qui contient des granulats saturés en eau (figure 2.18).

Depuis le coulage et jusqu'à 13 heures d'hydratation, les courbes de retrait des deux compositions sont superposées. Au-delà de cette échéance, la différence devient significative et atteint 27% d'écart sur le retrait mesuré à 24 heures. Selon une autre étude établie par (PIGEON et col, 2003) et menée sur des mélanges fabriqués à des rapports E/L de 0,35 et de 0,25, le retrait libre après 24 heures et après 7 jours est plus élevé lorsque des granulats secs ont été utilisés.

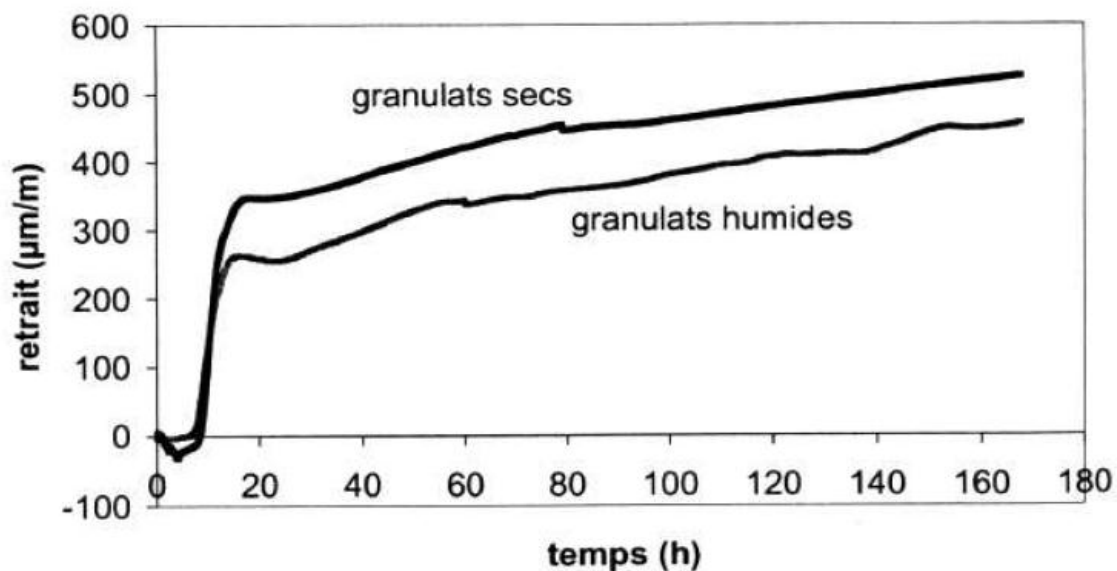


Figure 2.18. Effet de la saturation des granulats sur le retrait endogène (TOMA, 1999).

BREUGEL et col, (1998) ont étudié l'effet des granulats légers saturés avec un rapport E/C = 0.37, les mesures de retrait commencent 6 heures après le gâchage. La mesure indique qu'une substitution partielle de granulats denses par des granulats légers diminue le retrait.

Par ailleurs Le remplacement total des granulats non saturés par des granulats saturés à 100% manifeste une expansion jusqu'à 24 heures, puis un plafonnement de cette déformation jusqu'à 5 jours.

Le remplacement total des granulats non saturés par des granulats humidifiés à 70% manifeste un léger retrait jusqu'à 10 heures suivi d'un gonflement jusqu'à 20 heures puis un plafonnement jusqu'à 5 jours (figure 2.19).

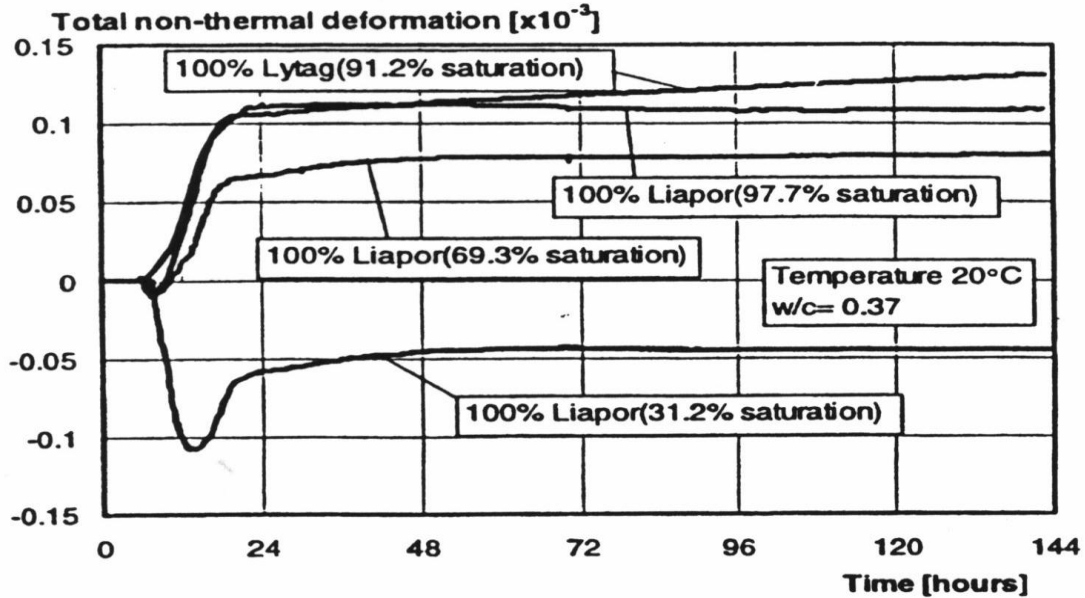


Figure 2.19. Effet de la saturation des granulats sur le retrait endogène (BREUGEL et col, 1998).

BREUGEL et al, (2000) ont aussi montré que le remplacement de 25% de granulats denses par des granulats légers et saturés diminue le retrait qui devient négligeable (figure 2.20).

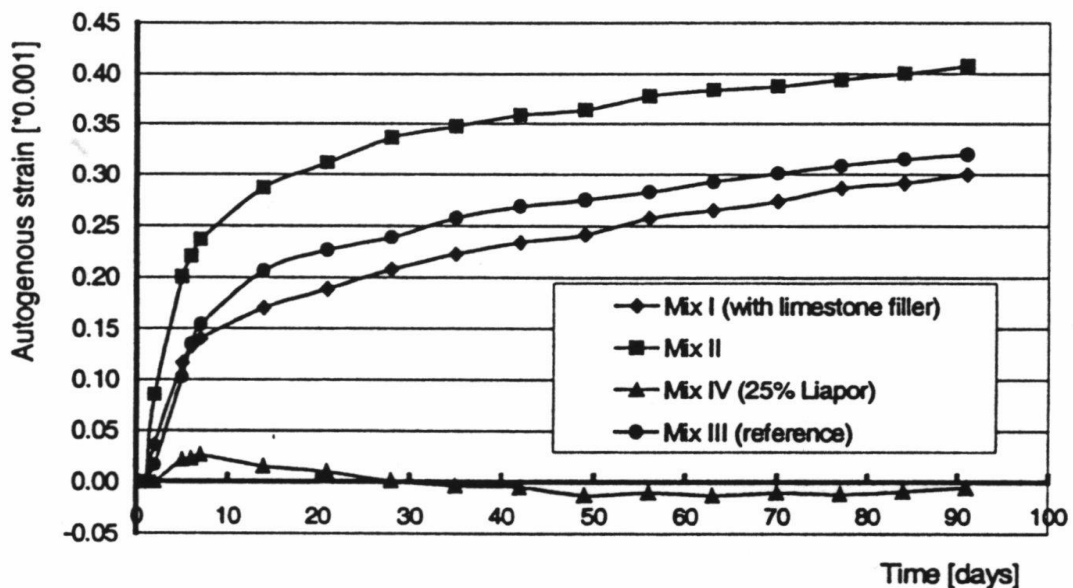


Figure 2.20. Influence du remplacement des granulats denses par des granulats légers sur le retrait un jour après le gâchage (BREUGEL et col, 2000).

6. Influence des adjuvants sur le retrait

Le superplastifiant est un élément essentiel du béton surtout auto-plaçant car il permet d'améliorer l'ouvrabilité. Selon TAZAWA et col, (1995), l'influence du dosage et du type d'adjuvant sur le retrait endogène est insignifiante, ils octroient ceci à son faible effet sur le taux d'hydratation. Cependant L'autodessiccation peut être affectée par l'ajout d'adjuvant si ce dernier contient des alcalis selon (BAROGHEL, 1994).

Tous les adjuvants qui retardent la prise (fluidifiants, retardateur, entraîneur d'air) augmentent le retrait plastique, parce qu'ils retardent la naissance du squelette solide s'opposant aux efforts capillaires. La capacité de déformation doit également dépendre des adjuvants modifiant le temps de prise ou la consistance (HANNANT et col, 1999) ; mais là aussi il y a encore, peu de données sur le lien entre rhéologie et capacité de déformation.

TAZAWA et col, (1997) ont effectué quelques mesures avec différents types d'adjuvants à un taux de 2% (en poudre) par rapport au poids de ciment. Le retrait est diminué par l'adjuvant à base d'alcool d'oxyde d'alcalin (D1), et par l'adjuvant à base de glycol éther (D2). L'utilisation de l'adjuvant D1 entraîne la diminution du retrait d'environ 50 % (figure 2.21).

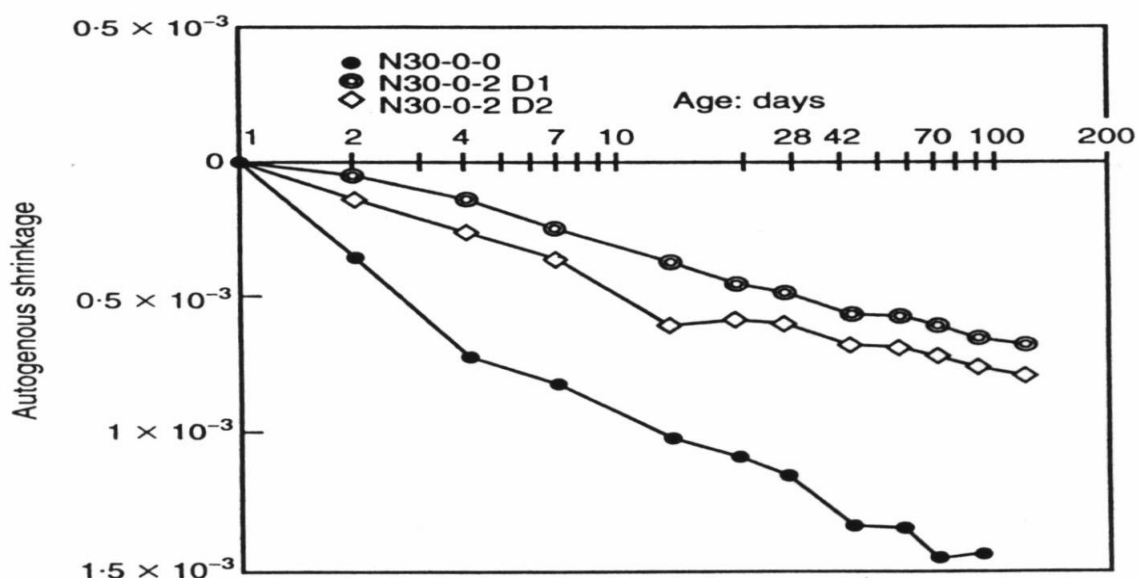


Figure 2.21. Effet des adjuvants sur la valeur du retrait endogène (TAZAWA et col, 1997).

« Paramètres d'influence externes »

7. L'influence de la température sur le retrait

Les plus récentes études montrent que la température influe sur le comportement au jeune âge du béton.

BJONTEGAARD, (1999) a effectué des essais de retrait libre sur des bétons avec un rapport (E/C=0.4 et 0.5 jusqu'à 15 % de FS) pour différents températures, Il a observé que le retrait endogène augmente en fonction de l'augmentation de la température comparativement aux résultats obtenus à 20 °C. Il a ainsi pu montrer que le concept de maturité ne peut être appliqué pour décrire les effets de la température sur le retrait endogène. Ceci a été confirmé par la suite par (CHARRON, 2003) pour des bétons de hautes résistances de rapport E/C variables (0.3 à 0.45).

Ceci avait déjà été mis en évidence par (RADOCEA, 1998) ; (CHARRON, 2003) qui expliquent que la cinétique du retrait endogène, la cure de température modifie le processus d'hydratation et donc l'évolution du processus d'autodessiccation, la distribution de la taille des pores des hydrates formés.

8. L'influence de L'Humidité sur le retrait

L'humidité est un paramètre fondamental. Elle influe sur les mouvements d'eau entre le matériau et le milieu ambiant lors d'un déséquilibre. Ces deux facteurs influent sur la vitesse d'évaporation de l'eau. L'abaque suivant (figure 2.22), développé par l'American Concrete Institute, (ACI) permet d'évaluer le taux d'évaporation d'une surface en béton recouverte d'eau. On constate qu'un air humide limite l'évaporation, et que la vitesse du vent l'augmente. Le béton devra idéalement être coulé à l'abri du vent et dans un environnement humide, pour limiter le retrait plastique.

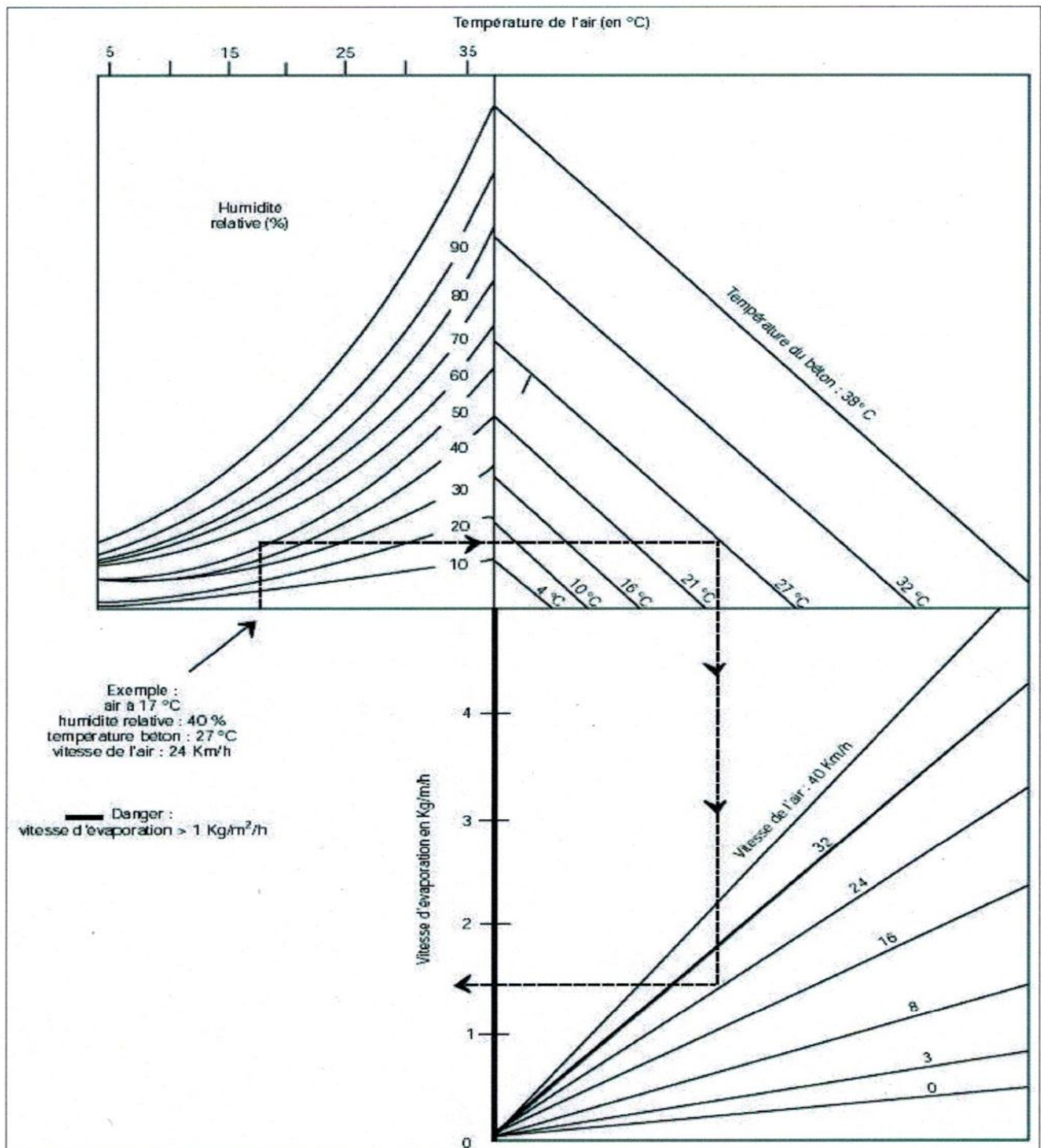


Figure 2.22. Abaque d'évaluation de taux d'évaporation d'une surface en béton recouverte d'eau (ACI).

L'humidité relative de l'environnement a donc une influence importante sur le retrait du béton. Le béton se rétracte lorsque l'humidité relative est inférieure à 94% et il se gonfle quand il est à 100% (NEVILLE, 2000).

Le volume de la pâte, le rapport eau / ciment, les agrégats et les adjuvants peuvent tous être contrôlés lorsque le béton est mélangé. De la même façon, un bon durcissement peut être effectué sur le site de construction. Malheureusement, l'humidité relative peut rarement être gérée dans une structure réelle. Pour cette raison, il est nécessairement un paramètre clé dans le processus de retrait (Carl Fortin, 2005).

9. Bilan :

Paramètre influents		Retrait total	Retrait endogène
Rapport E/C	↗	↓	↓ ↓ ↓
	↘	N'est pas affecté	↑ ↑ ↑ ↑
Volume de la pâte	↗	↑ ↑	↑
	↘	↓	↓
Ciment	↗	N'est pas affecté	↑ ↑
	↘		↓
Addition minérale	Fumée de silice		↑ ↑ ↑
	Cendre volante		↓ ↓ ↓
	Pouzzolane		↑ ↑ ↑
	Laitier		↑
	Fillers calcaire	↗	
↘		↑ ↑	
Granulat		N'est pas affecté	N'est pas affecté
Adjuvants		↑ ↑	↑ ↑
Température	↗	↑	↑ ↑ ↑
	↘		↓
Humidité		↓	

CHAPITRE

CARACTERISATION
DES
MATERIAUX

INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous procéderons à une caractérisation des différents constituants destinés à la confection de nos bétons (Ordinaires et Auto-plaçant), les matériaux utilisés ont été choisis en raison de leur disponibilité dans la région de Tlemcen.

SOMMAIRE DU CHAPITRE 3

1. LES GRANULATS.....	56
1.1. Le gravier	56
1.2. Le sable.....	57
1.3. Analyse granulométrique	58
2. LE CIMENT	62
3. LES FILLERS CALCAIRES	64
4. LA POUZZOLANE.....	64
5. EAU DE GACHAGE.....	66
6. LES ADJUVANTS	66
6.1. Essai au cône de Marsh	66
6.2. Essai au mini cône	67
• SUPERIOR RM 34	69
• GLENIUM 26	69
• GRANITEX « MEDAFLOW 30 ».....	70
• TEK–SUPERFLOW 2000 R :.....	70

1. LES GRANULATS

Trois classes granulaires (4/8 ,8/16 ,16/25), ont été étudiées pour être utilisées dans nos formulations.



1.1. Le gravier

Les granulats utilisés proviennent de la carrière de Sidi Abdelli, propriété de l'entreprise nationale des granulats (ENG).

Le squelette granulaire représente 75% des bétons vibrés et 60% des bétons autoplaçants. Sa qualité est donc un facteur déterminant pour le béton formulé. Les caractéristiques physiques des graviers sont représentées dans le tableau suivant:

Tableau 3.1: Caractérisation physique du gravier.

Désignation		Gravier (4/8)	Gravier (8/16)	Gravier (16/25)
M_v apparente (Kg/m ³) (NA 255)		1378.66	1333.3	1316.66
M_v absolue (Kg/m ³) (NA255)	La méthode du ballon	2650.17	2626.9	2669.03
	La méthode de l'éprouvette graduée	2500	2500	2500
Propreté (%) (NF P18-591)		2.04	0.33	0.2
Los Angles (%) (NF P 18-573)		32.4	24.8	30.3
Coefficient d'absorption (%) (NF P 18-554)		1.27	0.33	0.8

On remarque que le gravier utilisé a une capacité d'absorption d'eau acceptable $A_b < 2\%$ selon la norme Française P18-555.

Les trois classes ont des degrés de propreté inférieurs à 3% donc ces dernières sont propres et utilisables pour la formulation d'un béton. Selon la norme P 18-541, le pourcentage des éléments inférieurs à 0.5 mm doit être inférieur à 3 % dans le cas des granulats concassés.



Les masses volumiques (apparente et absolue) répondent aux spécifications de la norme NF EN 12620 qui impose une masse volumique apparente comprise entre 1300 kg/m^3 et 1600 kg/m^3 et une masse volumique absolue comprise entre 2500 kg/m^3 et 2700 kg/m^3 .

La valeur de los Angeles pour le gravier utilisé est inférieure à 40%, nous pouvons conclure que ces graviers peuvent être utilisés pour la confection du béton selon la norme P 18-541.

1.2. Le sable

Le sable utilisé, provient de la même carrière de Sidi Abdelli (ENG). Ses caractéristiques physiques sont représentées dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2: Caractéristiques physiques du sable.

$M_{v \text{ apparente}} \text{ (Kg/m}^3\text{)}$ (NA 255)	1583.46	
$M_{v \text{ absolue}} \text{ (Kg/m}^3\text{)}$ (NA 255)	La méthode de l'éprouvette graduée	2542.37
	La méthode du ballon	2648.6
équivalent de sable(%) (NFP 18-598)	ESV	93.73
	ESP	79.59
Module de finesse	2.82 (Sable grossier)	
Coefficient d'absorption (%) (NF P 18-555)	1.45	

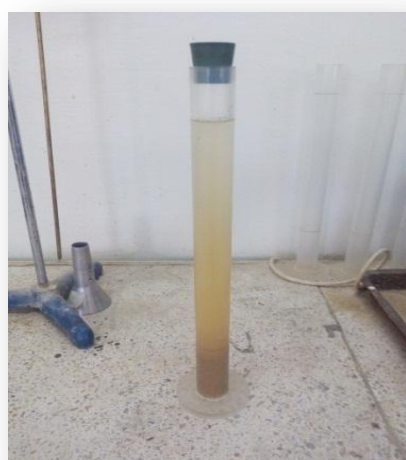


Figure 3.1. Essai équivalent de sable

D'après ces valeurs on constate que le sable est relativement propre selon la norme P 18-541 qui fixe les limites à $ESV \geq 65\%$ et à $ESP \geq 60\%$, pour les sables concassés ou broyés, $ESP > 80\%$ pour les sables très propres, absence de plasticité de béton.

1.3. Analyse granulométrique



Figure 3.2. Essai de l'analyse granulométrique

Pour caractériser ces granulats, nous avons fait l'essai de l'analyse granulométrique selon la norme (NF P18-540) et les résultats de cette analyse sont présentés dans les Tableaux 3.3, 3.4, 3.5 et 3.6, ainsi que sur la figure 3.3.

Tableau 3.3 : Analyse granulométrique du sable

Sable 0/4				
La masse de l'échantillon = 1 kg				
Ouverture de tamis (mm)	masse des refus (g)	Masse des refus cumulés (g)	Pourcentage des refus cumulés (%)	Pourcentage des tamisats cumulés(%)
6,3	0,6	0,6	0,06	99,94
5	0,6	1,2	0,12	99,88
4	31,2	32,4	3,24	96,76
3,15	50,2	82,6	8,26	91,74
2,5	96,2	178,8	17,88	82,12
2	86	264,8	26,48	73,52
1,6	112,8	377,6	37,76	62,24
1,25	61,4	439	43,9	56,1
1	64,4	503,4	50,34	49,66
0,8	45,6	549	54,9	45,1
0,63	52,2	601,2	60,12	39,88
0,5	71,2	672,4	67,24	32,76
0,4	39,2	711,6	71,16	28,84
0,315	62,8	774,4	77,44	22,56
0,250	4,2	778,6	77,86	22,14
0,2	17,6	796,2	79,62	20,38
0,16	37,2	833,4	83,34	16,66
0,125	15,8	849,2	84,92	15,08
0,08	16,8	866	86,6	13,4
Fond	134	1000	100	0

A partir des résultats trouvés, nous constatons que le sable est composé de 13.4% de particules inférieures à (80 μ m) ce qui peut être bénéfique pour la formulation des bétons autoplaçants car ces fines peuvent être incorporés au liant.

Tableau 3.4: Analyse granulométrique du gravier 4/8.

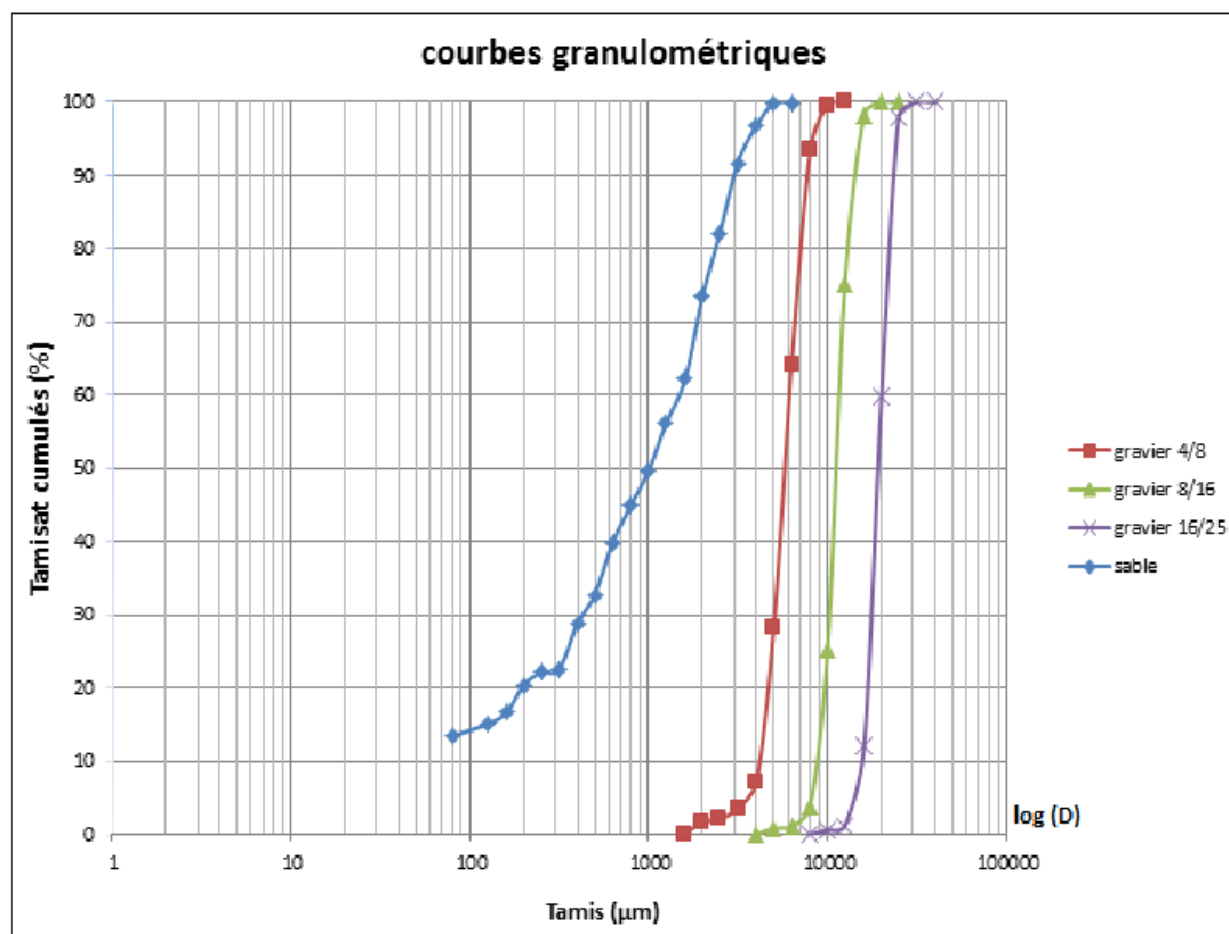
Gravier 4/8				
La masse de l'échantillon = 1.6 kg				
Ouverture de tamis (mm)	masse des refus (g)	Masse des refus cumulés (g)	Pourcentage des refus cumulés (%)	Pourcentage des tamisats cumulés(%)
12.5	0	0	0	100
10	6	6	0.375	99.625
8	98	104	6.5	93.5
6.3	468	572	35.75	64.25
5	576	1148	71.75	28.25
4	328	1476	92.25	7.75
3.15	66	1542	96.375	3.625
2.5	24	1566	97.875	2.125
2	6	1572	98.25	1.75
Fond	12	1584	99	1

Tableau 3.5: Analyse granulométrique du gravier 8/16.

Gravier 8/16				
La masse de l'échantillon = 3.2 kg				
Ouverture de tamis (mm)	masse des refus (g)	Masse des refus cumulés (g)	Pourcentage des refus cumulés (%)	Pourcentage des tamisats cumulés(%)
25	0	0	0	100
20	0	0	0	100
16	56	56	1.75	98.25
12.5	736	792	24.75	75.25
10	1600	2392	74.75	25.25
8	682	3074	96.06	3.94
6.3	90	3164	98.875	1.125
5	10	3174	99.19	0.8125
Fond	26	3194	99.81	0.19

Tableau 3.6: Analyse granulométrique du gravier 16/25.

Gravier 16/25				
La masse de l'échantillon = 5 kg				
Ouverture de tamis (mm)	masse des refus (g)	Masse des refus cumulés (g)	Pourcentage des refus cumulés (%)	Pourcentage des tamisats cumulés (%)
40	0	0	0	100
31.5	0	0	0	100
25	100	100	2	98
20	1912	2012	40.24	59.76
16	2386	4398	87.96	12.04
12.5	540	4938	98.76	1.24
10	32	4970	99.4	0.6
Fond	30	5000	100	0

**Figure 3.3:** Courbes granulométriques des granulats.

2. LE CIMENT

Le ciment utilisé est un ciment portland composé CPJ CEM II 42.5/A de la Société des Ciments de Béni-Saf appartenant à la wilaya d'Ain-Temouchent. Ce ciment est conforme à la norme (NF EN 196), Il est composé de 85% de clinker ; 3% de gypse, 10% de pouzzolane et de 2% de calcaire sableux.

Les détails des propriétés chimiques et physico-mécaniques sont présentés dans les Tableaux 3.6, 3.7 et 3.8.

Tableau 3.7: Composition chimique du ciment (%) (SCIBS, 2014).

	Valeur Mini	Valeur Maxi	Valeur Moy	Norme NA 442
Perte au feu	1.44	2.48	1.91	-
CaO Libre	0.63	1.47	0.90	-
SiO ₂	25.03	29.92	27.17	-
Al ₂ O ₃	5.15	5.77	5.47	-
Fe ₂ O ₃	3.05	3.27	3.17	-
CaO	53.63	59.70	57.20	-
MgO	0.96	1.07	1.01	≤ 5
SO ₃	2.02	2.62	2.27	≤ 3.5
Chlorures	0.005	0.008	0.006	≤ 0.1
Insolubles	6.25	8.39	7.66	-

Tableau 3.8: Composition minéralogique du ciment (%) (SCIBS,2014)

C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
52.63	23.68	8.66	10.71

Tableau 3.9: Propriétés physico – mécaniques du ciment (SCIBS).

Surface spécifique Blaine (cm ² /g)	3649
Consistance (%)	26.32
Expansion à chaud (mm)	0.36
Début de prise (mn)	140
Résistance à la flexion	
02 jours (bars)	4.11
07 jours (bars)	5.91
28 jours (bars)	7.24
Résistance à la compression	
02 jours (bars)	16.94
07 jours (bars)	31.67
28 jours (bars)	46.02

Les masses volumiques (apparente et absolue) ont été déterminées conformément à la norme NF P 18-558. Nous avons utilisé pour la détermination de la masse volumique absolue, la méthode de pycnomètre à liquide. Les résultats sont récapitulés dans le Tableau 3.9.

Tableau 3.10: La masse volumique apparente et absolue du ciment.

La masse volumique apparente (Kg/m ³)	La masse volumique absolue (Kg/m ³)
932	3032

Nous remarquons que ces masses volumiques répondent aux exigences imposés par la norme NA 231, comprises entre 900-1100 kg/m³ pour la masse volumique apparente et 2900-3150 kg/m³ pour la masse volumique absolue.

3. LES FILLERS CALCAIRES

Les fillers calcaires (Figure 3.4) proviennent de la carrière de Sidi Abdelli (ENG), elles présentent un $(D_{max} = 125\mu m)$. leur composition chimique est résumée dans le Tableau 3.10.



Figure 3.4. Échantillon de fillers (ENG).

Tableau 3.11: Propriétés chimiques des fillers calcaires (Taleb, 2009).

Eléments	S ₂ O ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	CO ₃	Anhydrite Carbonatée	Eau de combinaison	Perte au feu
Min %	4.73	33.81	18.59	0.49	93.64	41.2	0.49	41.69
Max %	5.64	34.09	20.06	0.54	96.97	42.67	0.56	43.23
Moy %	5,18	33,95	19.32	0.51	95.30	41.93	0.52	42.46

Les fillers calcaires présentent une masse volumique absolue égale 2700 kg/m^3 et une masse volumique apparente égale à 971 kg/m^3 . La surface spécifique de Blaine est égale $2416 \text{ cm}^2/\text{g}$, (ELBAHI et Boukli, 2014).

4. LA POUZZOLANE

La pouzzolane utilisée dans nos formulations est une pouzzolane naturelle finement broyée (Figure 3.5) présente une grosseur maximale de $125 \mu m$, originaire de la région de Béni Saf (l'ouest de l'Algérie). Sa composition chimique et minéralogique est résumée dans le Tableau 3.11 et 3.12.



Figure 3.5. Échantillon de pouzzolane (avant et après broyage).

Tableau 3.12: Analyse chimique de la pouzzolane.

Elément (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Perte au feu
	45.90	17.10	10.60	10.20	3.40	1.50	1.80	4.05	4.20

Tableau 3.13: Analyse minéralogique de la pouzzolane.

Minéraux	Pourcentages
Feldspath plagioclase (Anorthite : CaO.Al ₂ O ₃ .SiO ₂)	30
Pyroxène (Augite : (Mg, Fe) 2.2 Si O ₆)	16
Verre volcanique.	15
Analcine (Zéolithe)	13
Chlorite (6Mg ₅ Al Si O ₆) (OH) 8	5
Hématite : Fe ₂ O ₃ Magnétite : Fe ₂ O ₃ . Fe O. Biotite : 2K(Fe,Mg)3AlSi ₃ O ₁₀ (OH) ₂	7
Autre minéraux : basalte, calcite, dolomite, argile,etc.	6

La pouzzolane naturelle présente une masse volumique absolue égale 2775 kg/m³ et une surface spécifique de Blaine égale 2567 cm²/g, (ELBAHI et Boukli, 2014).

5. EAU DE GACHAGE

L'eau utilisée est distribuée par le réseau du service public de la Daira de Chetouane appartenant à la ville de Tlemcen. Sa composition chimique répond aux prescriptions de la norme XP P 18-303, cette composition est résumée dans le Tableau 3.13.

Tableau 3.14. Caractéristiques chimiques de l'eau (Boukli, 2010).

Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	CO ₃	NO ₃	PH	T (°C)
74.4	49	40	5	95	170	300	42.3	7.5	17.1

6. LES ADJUVANTS

Les adjuvants sont des produits chimiques incorporés au béton frais en petites quantités afin d'améliorer certaines de leur propriétés. Leur efficacité est liée à l'homogénéité de leur répartition dans la masse du béton, les adjuvants utilisés sont des superplastifiants de la famille des polycarboxylate. Le dosage de saturation de ces adjuvants est déterminé par deux essais :

6.1. Essai au cône de Marsh

Cet essai consiste à mesurer le temps nécessaire de l'écoulement d'un litre de coulis. Pour ce faire, nous utilisons le cône de Marsh (Figure 3.6), le rapport E/C est égale à 0.45 avec une masse de ciment égale 1.8 kg tout en faisant varier le pourcentage de superplastifiant en fonction de la masse de ciment et ceci pour les trois superplastifiants étudiés, les résultats sont présentés dans les figures 3.8, 3.10, 3.12.



Figure 3.6. Essai au cône de Marsh

6.2. Essai au mini cône

Le mini cône nous permet aussi d'évaluer la compatibilité du ciment avec le superplastifiant. L'intérêt de cette méthode consiste à évaluer le dosage de saturation des superplastifiants à travers un essai d'affaissement sur une très petite quantité de pâte de ciment en utilisant le cône présenté à la figure 3.7.

Cette quantité de ciment est de 200 g c'est-à-dire le dixième de la quantité nécessaire pour réaliser un essai au cône de Marsh, d'où l'intérêt économique de cet essai, on fait varier toujours le pourcentage de superplastifiant en fonction de la masse de ciment et ceci pour les trois superplastifiants étudiés, les résultats obtenus sont présentés dans les figures 3.9, 3.11, 3.13.



Figure 3.7. Essai Mini Cône.

Les deux essais consistent donc à déterminer le temps d'écoulement ou l'étalement en fonction du dosage des superplastifiants à différents temps. Les courbes obtenues présentent une cassure très nette lorsqu'on atteint un certain dosage en superplastifiant. Cette cassure est appelée le point de saturation.

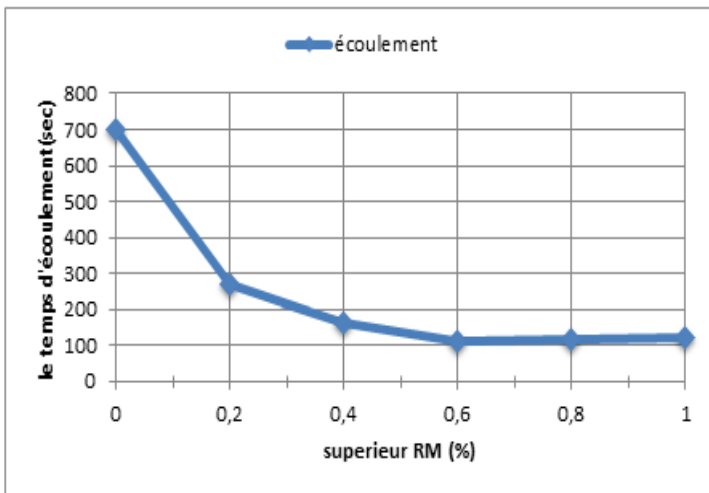


Figure 3.8 : courbe dosage de saturation (cône de marsh)

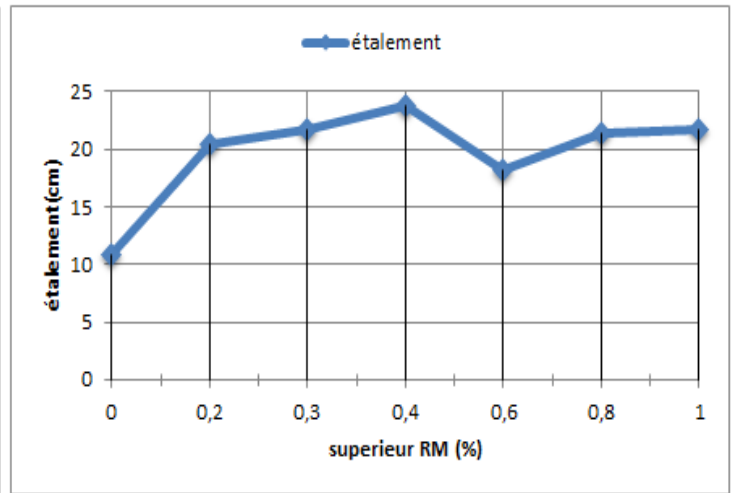


Figure 3.9 : courbe dosage de saturation (mini cône)

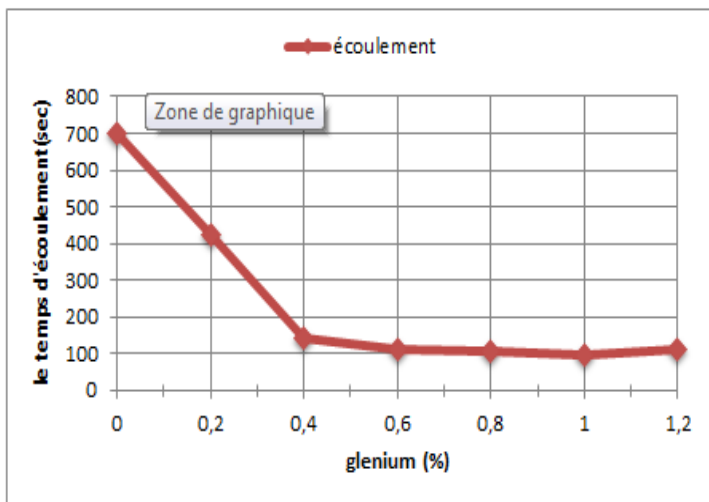


Figure 3.10: courbe dosage de saturation (cône de marsh)

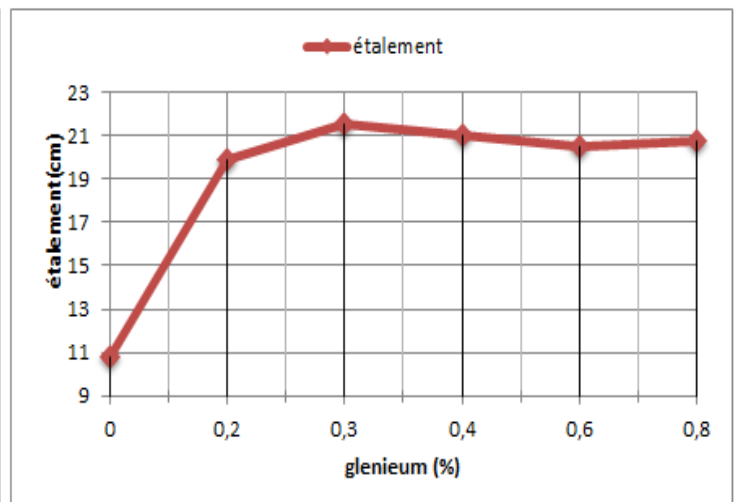


Figure 3.11: courbe dosage de saturation (mini cône)

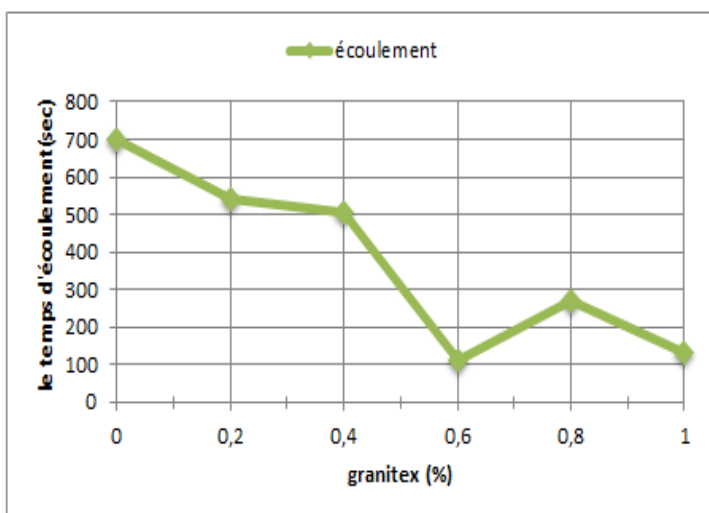


Figure 3.12: courbe dosage de saturation (cône de marsh)

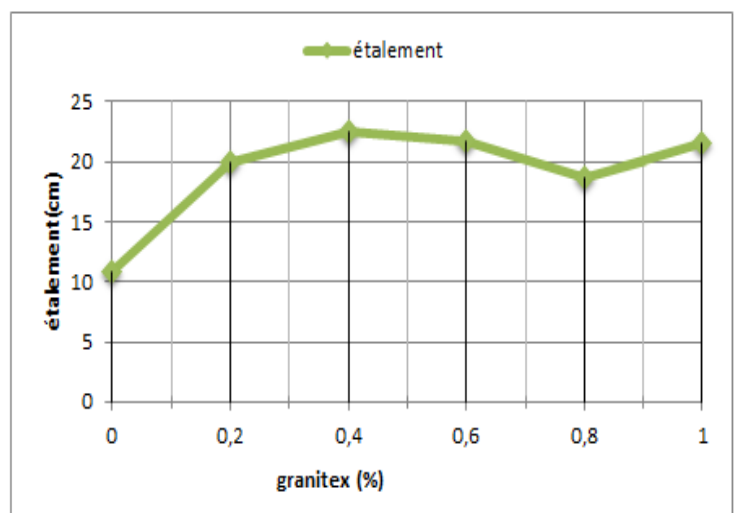


Figure 3.13 : courbe dosage de saturation (mini cône)

Les caractéristiques des superplastifiants utilisés dans nos formulations sont présentées dans les tableaux 3.14, 3.15, 3.16 et 3.17.

- **SUPERIOR RM 34**

Super fluidifiant-haut réducteur d'eau multifonctions pour bétons, avec maintien rhéologique, ce superplastifiant est fabriqué par les entreprises TEKNA (ITALIE) et commercialisé par les entreprises Hasnaoui (Sidi Bel Abbes).

Tableau 3.15: Caractéristiques du superplastifiant Superior RM 34.

Etat	Liquide
Couleur	claire
Densité à 20° C	1,05 ± 0,03
pH à 20°C	5 ± 0,5
Point de conglomération	- 5°C
Extrait sec	35% ±2%

- **GLENIUM 26**

Super plastifiant haut réducteur d'eau pour béton à faibles rapports E/C, hautes performances et long maintien d'ouvrabilité, cet adjuvant est fabriqué par les entreprises BASF.

Tableau 3.16: Caractéristiques du superplastifiant Glenium 26

Forme	Liquide visqueux
Couleur	Brun
Densité à 20° C	1,026 à 1,066
Plages de dosage recommandé	1 à 1.5%
Extrait sec	35%

- **GRANITEX « MEDAFLOW 30 »**

Cet adjuvant est fabriqué et commercialiser par les entreprise GRANITEX (Algérie).

Tableau 3.17: Caractéristiques du superplastifiant « MEDAFLOW 30»

Etat	Liquide
Couleur	jaunâtre
Densité à 20° C	1.07
pH à 20°C	6 à 6.5
Plages de dosage recommandé	0.5 à 2%
Extrait sec	30%

- **TEK–SUPERFLOW 2000 R :**

Cet adjuvant est de type superplastifiant haut réducteur d'eau avec effet retardateur spécialement conçue pour le béton prêt à l'emploi. Commercialisé par le groupe des sociétés HASNAOUI (Sidi Bel Abbes).

Tableau 3.18: Caractéristiques du superplastifiant «TEK–SUPERFLOW 2000 R »

Etat	Liquide
Couleur	Brune
Densité à 20° C	1,17 ± 3 %
pH à 20°C	9.5± 1
Plages de dosage recommandé	≤1%
Extrait sec	35% ± 2%

Le dosage de saturation utilisé de chaque superplastifiant correspond aux valeurs suivantes :

- SUPERIOR RM 34 : DS = 0.5%
- GLENIUM 26 : DS = 0.65%
- GRANITEX « MEDAFLOW » : DS = 0.5%
- TEK–SUPERFLOW 2000 R : DS = 1.7%

Remarque :

Une légère différence a été notée entre les résultats obtenus sur l'essai du mini-cône et sur celui du cône de Marsh, raison pour laquelle, nous avons considéré le dosage de saturation comme étant la moyenne entre ces deux essais (tableau 3.18).

Tableau 3.19: Dosage de saturation des adjuvants utilisé.

superplastifiant	Mini cône	Cône de Marsh	Moyenne
GRANITEX « MEDAFLOW »	0.4%	0.6%	0.5%
GLENIUM 26	0.3%	1%	0.65%
SUPERIOR RM 34	0.4%	0.6%	0.5%

CHAPITRE

4

ETUDE

EXPERIMENTALE

INTRODUCTION

Dans notre étude expérimentale, nous avons confectionné 12 formulations de Béton auto-plaçant par la méthode chinoise et 18 formulations de Béton ordinaire par la méthode Dreux Gorisse en variant le taux de substitution du ciment par des additions minérales entre 0% et 50% afin de mettre en évidence l'influence de ces ajouts sur les déformations des bétons .

SOMMAIRE DU CHAPITRE 4

1. Formulation :	74
1.1. Méthode de formulation chinoise :	74
1.2. Méthode de formulation des Bétons ordinaire :	77
2. Confection des Eprouvettes prismatiques :	79
3. ETUDE DES DEFORMATIONS INSTANTANÉES (retrait)	79
3.1. Procédure expérimentale :	79
3.2. Perte de masse :	82
3.3. Résistance à la Compression :	82
4. RESULTATS ET INTERPRETATIONS :	83
4.1. Retrait des Bétons Auto-plaçant :	83
4.2. Etude du retrait des bétons ordinaires :	86
4.3. Perte de masse :	89
4.4. Résistance a la compression.....	92

Formulation :

1.1. Méthode de formulation chinoise :

Cette méthode a été développée par Su N. et al (2001, 2003). Elle est basée sur la compacité des granulats (sable et gravier). La formulation du BAP selon cette méthode passe par 7 étapes établies comme suit :

1.1.1. ETAPE 1 : Calcul du dosage des granulats :

Le Packing Factor « **PF** » est le rapport entre les masses volumiques apparentes ou bien les compacités des agrégats compactés et non compactés.

$$PF = \frac{\rho_{\text{après}}}{\rho_{\text{avant}}}$$

Avec :

$\rho_{\text{après}}$: La masse volumique apparente de l'échantillon après compactage (kg/m^3).

ρ_{avant} : La masse volumique apparente de l'échantillon avant compactage (kg/m^3).

La valeur optimale du facteur de compacité « PF » est de 1,12. Elle a été obtenue pour les masses volumiques correspondantes au rapport G/S égal à 1 ($S/G+S = 50\%$), et le rapport $G(4/8)/G(8/16)$ égale à 0.5.

Dosage en granulats

Les compositions massiques du gravier (M_g) et du sable (M_s) sont déduites respectivement à partir des équations suivantes :

$$\begin{aligned} M_g &= PF \times \rho_g \times \left(1 - \frac{S}{S+G}\right) \\ &= 1.12 \times \rho_g \times (1-0.46) = 810 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_s &= PF \times \rho_s \times \left(\frac{S}{S+G}\right) \\ &= 1.12 \times \rho_s \times (0.46) = 810 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

ρ_g : la masse volumique apparente des gravillons exprimée en (Kg/m^3).

ρ_s : la masse volumique apparente du sable exprimée en (Kg/m^3).

$\frac{S}{S+G}$: Volume du sable sur le volume totale des granulats égale 0.46 avec (G/S=1).

1.1.2. ETAPE 2 : Détermination du dosage minimal en ciment et du rapport $E_{eff}/L_{équi}$:

Selon la norme NF EN206-1 le rapport $E_{eff}/L_{équi}$ maximal et le dosage minimal du liant équivalent ($L_{équi}$) sont en fonction de la classe d'exposition.

$$L_{équivalent} = C + k.A$$

Où

C : le dosage en ciment.

A : le dosage en additions.

k : Coefficient qui dépend de la nature de l'addition.

Dans notre étude, les formulations choisies pour les BAP sont pour une classe d'environnement d'agressivité modérée (voir la norme 206-1) et cela exige une teneur en liant élevée qui égale à 350 kg/m^3 et un rapport maximal $E_{eff}/L_{équi} = 0,50$ au moins.

Le ciment utilisé est de type CEM II/A, ce qui donne un coefficient ($k=0$), donc la valeur du liant équivalent est égale à la valeur du dosage en ciment (350 kg/m^3).

1.1.3. ETAPE 3 : Détermination du rapport E/F et E/P

Pour la détermination les rapports E/F et E/P, il suffit de trouver la même fluidité (le même étalement) de la pâte des fillers et de ciment ($E/C=0.5$) ainsi de la pâte de pouzzolane et de ciment, à travers l'étalement de l'essai mini cône.

Tableau 4.1 : Résultats d'étalement des pâtes pures de ciment, fillers et pouzzolane

		Etalement (mm)
E/C	0.5	115
E/FL	0.42	115
E/PZ	0.425	115

1.1.4. ETAPE 4 : Dosage de saturation

Selon la norme NF EN 1961, le dosage de saturation en superplastifiant est déterminé par la méthode du mini cône qui consiste à évaluer le dosage de saturation de superplastifiant à travers un essai d'étalement sur une très petite quantité de pâte (200 g) et fixer le rapport E/C ou E/F, E/P en utilisant le cône. Pour cela, on détermine les dosages de saturation suivant :

- Dosage de saturation pour une pâte de ciment.
- Dosage de saturation pour une pâte des fillers calcaires
- Dosage de saturation pour une pâte de pouzzolane

Nous avons trouvé qu'un pourcentage de 1.7 % a permis de donner les meilleurs étalements et ceci pour n'importe quel poudre utilisée.

1.1.5. ETAPE 5: Dosage en fillers calcaires

Il est important de mettre en évidence notre apport concernant le calcul de la masse de l'addition qui dans le cadre de notre travail, sont les fillers calcaires.

Cette masse a été calculée selon la démarche suivante :

$$V_{\text{pâte fillers}} = 1 - V_g - V_s - V_c - V_E$$

$$V_{\text{pâte fillers}} = 1 - \frac{M_g}{1000 \times G_g} - \frac{M_s}{1000 \times G_s} - \frac{M_c}{1000 \times G_c} - \frac{M_{EC}}{1000 \times G_E}$$

En outre :

$$V_{\text{pâte fillers}} = V_F + V_{EF}$$

$$V_{\text{pâte fillers}} = \frac{M_F}{1000 \times G_F} + \frac{E_F}{1000}$$

$$V_{\text{pâte fillers}} = \frac{M_F}{1000 \times G_F} \left(1 + \frac{E}{F} \times G_F \right)$$

G : densité

- Dosage en pouzzolane

$$V_{\text{pâte pouzzolane}} = \frac{M_{pz}}{1000 \times G_{pz}} \left(1 + \frac{E}{pz} \times G_p \right)$$

1.1.6. Etape 6 : Dosage en eau

La quantité d'eau de gâchage du BAP étudié est la quantité d'eau nécessaire pour le ciment et les fillers moins la quantité d'eau apportée par le SP.

$$E_T = E_C + E_F - E_{SP}$$

Rapport-gratuit.com



$$E_T = 210 \text{ l}$$

$$\text{Pour la pouzzolane } E_T = E_C + E_p - E_{SP}$$

$$E_T = 210 \text{ l}$$

Tableau 4.2 : Formulations des bétons auto-plaçant

Formulation de BAP									
Filler									
N° de formulation	% des substitutions	Sable	Gravier 4/8	Gravier 8/16	ciment	Filler	Eau	Adjuvant (TEK-SUP)	
1	0% F	810	270	540	460	0	210	7.81	
2	10% F	810	270	540	414	46	210	7.81	
3	20% F	810	270	540	368	92	210	7.81	
4	30% F	810	270	540	322	138	210	7.81	
5	40% F	810	270	540	276	184	210	7.81	
6	50% F	810	270	540	230	230	210	7.81	
Pouzzolane									
7	0% P	810	270	540	451.5	0	210	7.67	
8	10% P	810	270	540	406.35	45.15	210	7.67	
9	20% P	810	270	540	361.2	90.3	210	7.67	
10	30% P	810	270	540	316.05	135.45	210	7.67	
11	40% P	810	270	540	270.9	180.6	210	7.67	
12	50% P	810	270	540	225.75	225.75	210	7.67	

1.2. Méthode de formulation des Bétons ordinaires :

La formulation a été définie par la méthode Dreux gorisse. Nous avons considéré la formulation développée au sein du laboratoire EOLE (Boukli, 2009). Nous avons substitué le ciment par des quantités d'addition (de 0% à 30% pour les fillers et de 0% à 20% pour la pouzzolane), la formule de référence ainsi que les autres formulations sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 4.3 : Formulations des bétons ordinaires

Formulation De base	Sable	G (4/8)	G (8/16)	G (16/20)	Ciment	Filler et pouzzolane	Adjuvant	Eau
	660	144	432	533	350	0	0	175
0% FILLER	S	4/8	8/16	16/20	Ciment	Filler	ADJ	Eau
GL	660	144	432	533	350	0	2.25	175
GX	660	144	432	533	350	0	1.75	175
SUP	660	144	432	533	350	0	1.75	173.5
10% FILLER	Sable	4/8	8/16	16/20	Ciment	Filler	Adjuvant	Eau
GL	660	144	432	533	315	35	2.25	173.5
GX	660	144	432	533	315	35	1.75	173.5
SUP	660	144	432	533	315	35	1.75	173.5
20% FILLER	Sable	4/8	8/16	16/20	Ciment	Filler	Adjuvant	Eau
GL	660	144	432	533	280	70	2.25	173.5
GX	660	144	432	533	280	70	1.75	173.5
SUP	660	144	432	533	280	70	1.75	173.5
30% FILLER	Sable	4/8	8/16	16/20	Ciment	Filler	Adjuvant	Eau
GL	660	144	432	533	245	105	2.25	173.5
GX	660	144	432	533	245	105	1.75	173.5
SUP	660	144	432	533	245	105	1.75	173.5
10% pouzzolane	Sable	4/8	8/16	16/20	Ciment	Pouzzolane	Adjuvant	Eau
GL	660	144	432	533	315	35	2.25	173.5
GX	660	144	432	533	315	35	1.75	173.5
SUP	660	144	432	533	315	35	1.75	173.5
20% pouzzolane	Sable	4/8	8/16	16/20	Ciment	Pouzzolane	Adjuvant	Eau
GL	660	144	432	533	280	70	2.25	173.5
GX	660	144	432	533	280	70	1.75	173.5
SUP	660	144	432	533	280	70	1.75	173.5

2. Confection des Eprouvettes prismatiques :

Des épreuves 7x7x28 cm, munies de plots, sont confectionnées pour les essais du retrait endogène et total ainsi que pour des essais mécaniques.



Figure 4.1. Moule 7x7x28 cm.

3. ETUDE DES DEFORMATIONS INSTANTANÉES

3.1. Procédure expérimentale :

Pour toutes les compositions de béton, un nombre important d'éprouvette a été réalisé pour l'essai de retrait. Pour ce faire, des éprouvettes ont été enveloppées instantanément après leurs démoulages à l'aide d'un papier d'aluminium afin d'étudier le retrait endogène. Ce papier empêche les échanges d'humidité entre le béton et l'air ambiant (figure 4.2). D'autre part, des éprouvettes ont été laissées libres de tout échange hydrique avec l'extérieur pour mesurer le retrait total (figure 4.3).

Rappelons que le rayon de séchage R_0 est définie par :

$$R_0 = \sqrt{2V/S}$$

R_0 : rayon de séchage

V: Volume de l'éprouvette.

S : Surface de l'éprouvette exposée au séchage.



Figure 4.2. Epreuve enveloppée



Figure 4.3. Epreuve non enveloppée



Figure 4.4. L'ensemble des éprouvettes confectionnées de différentes formulations.

Pour les mesures linéiques, un rétractomètre équipé d'un comparateur de longueur adaptée à la taille des éprouvettes et d'une barre d'étalonnage, sont nécessaires pour effectuer nos essais (figure 4.5).

Avant chaque mesure, on procède toujours au nettoyage des orifices sur les deux extrémités de l'éprouvette. La mesure linéique de tous les prismes a été effectuée régulièrement afin d'évaluer le degré des retraits endogène et total.



A : Eprouvette avec plot

B : Rétractomètre

C : Barre d'étalonnage (28 cm)

Figure 4.5. Banc d'essai pour la mesure du retrait

Le rétractomètre utilisé dans nos mesures de retrait a une précision de l'ordre de (10^{-3} mm = $1\mu\text{m}$) figure 4.6.



Figure 4.6. Rétractomètre

3.2. Perte de masse :

Pendant la mesure du retrait endogène et total, nous avons suivi en parallèle l'évolution de la masse des échantillons à l'aide d'une balance électrique (figure 4.7).



Figure 4.7. Balance électrique avec précision de l'ordre de 0.1g

3.3. Résistance à la Compression :

Après 28 jours de maturation de nos éprouvettes (11/22) nous avons effectué l'essai d'écrasement pour des déterminer le comportement mécanique a l'état durci.



Figure 4.8. Surfaçage des éprouvettes



Figure 4.9. Presse universelle

La (figure4.9) montre l'essai de compression selon la norme N A 427 sur l'une de nos éprouvettes (11×22) cm après avoir été surfacée par le soufre (figure 4.8) La valeur de la contrainte de compression est obtenue directement par la machine d'essai.

4. RESULTATS ET INTERPRETATIONS :

4.1. Retrait des Bétons Auto-plaçant :

4.1.1. Influence des fillers calcaires :

Nous avons dans un premier temps étudié l'influence de la teneur en fillers sur le retrait endogène, total et de dessiccation. Les résultats obtenus sont représentés sur les figures (4.10, 4.11)

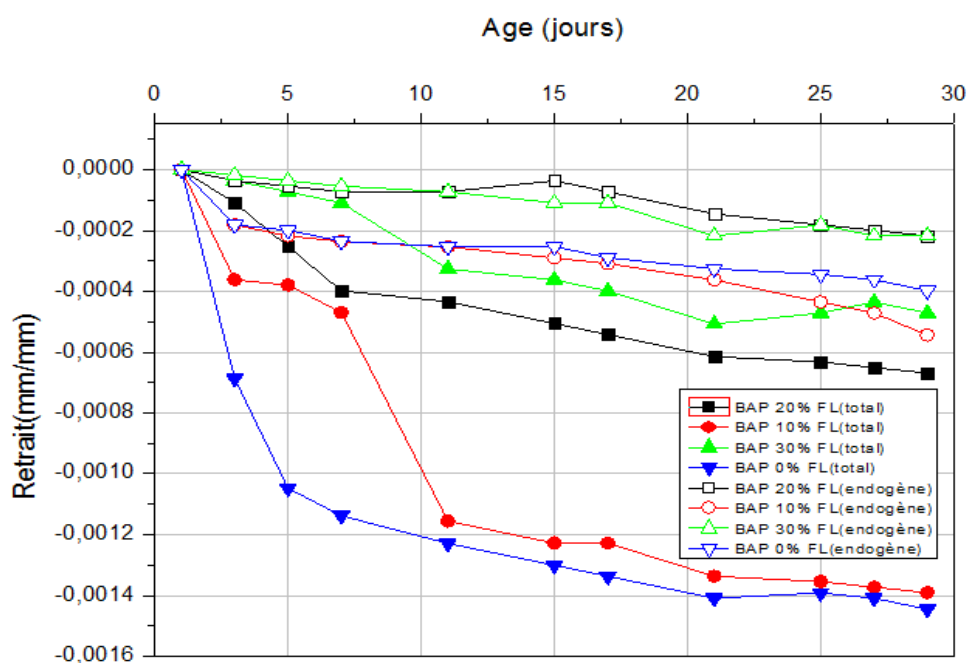


Figure 4.10. Le retrait endogène et total des Bétons Auto-plaçant (% Filler)

L'interprétation des courbes du retrait n'est pas toujours une chose facile car plusieurs facteurs ainsi que l'interaction entre eux peuvent avoir une influence sur le phénomène.

Nous constatons que le phénomène du retrait est toujours en évolution pendant la période d'étude.

Tout béton qui n'est pas conservé à l'eau développe un certain retrait endogène conséquence des contractions chimiques développées durant l'hydratation de ciment. Le volume absolu des hydrates qui se forment est inférieur à la somme absolue du volume du ciment et de l'eau initiale.

D'après les résultats obtenues, on peut constater que le retrait est directement proportionnelle à la quantité de ciment, car le retrait endogène est dû à la réaction d'hydratation du ciment c'est à dire plus on ajoute les additions comme substitution plus la quantité de ciment diminue, ce qui pour conséquence de réduire d'un côté les hydrates formé et de diminué d'un autre côté la chaleur dégager lors de l'hydratation qui a tendance à accentuée le phénomène du retrait comme nous l'avons souligné dans le littérature.

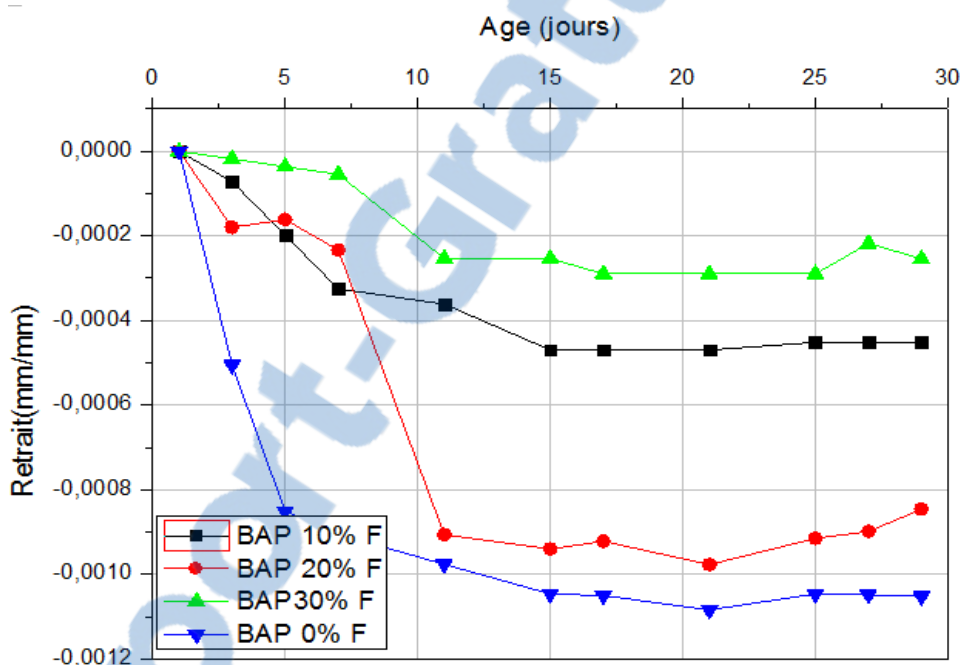


Figure 4.11. Le retrait de dessiccation des Bétons Auto-plaçant (% Filler)

Le retrait de dessiccation est dû à la perte d'une partie de l'eau de gâchage dans le cas où le béton est conservé dans une atmosphère à humidité relative plus faible que celle de la matrice cimentaire. La cause principale du retrait de séchage est l'assèchement progressif de la pâte de ciment. Le retrait de dessiccation est calculé par la différence entre le retrait total et le retrait endogène, il est présenté en fonction du temps.

La (figure 4.10) montre que le retrait est plus prononcé lorsque le béton est fortement dosé en ciment, en effet le comportement différé est essentiellement dû à la migration de l'eau à travers la matrice cimentaire comme l'hydratation ou encore la différence du gradient thermique.

4.1.2. L'influence de pouzzolane :

Nous avons aussi étudié l'influence de la teneur en pouzzolane sur le retrait endogène, total et de dessiccation. Les résultats obtenus sont représentés sur les figures (4.12, 4.13)

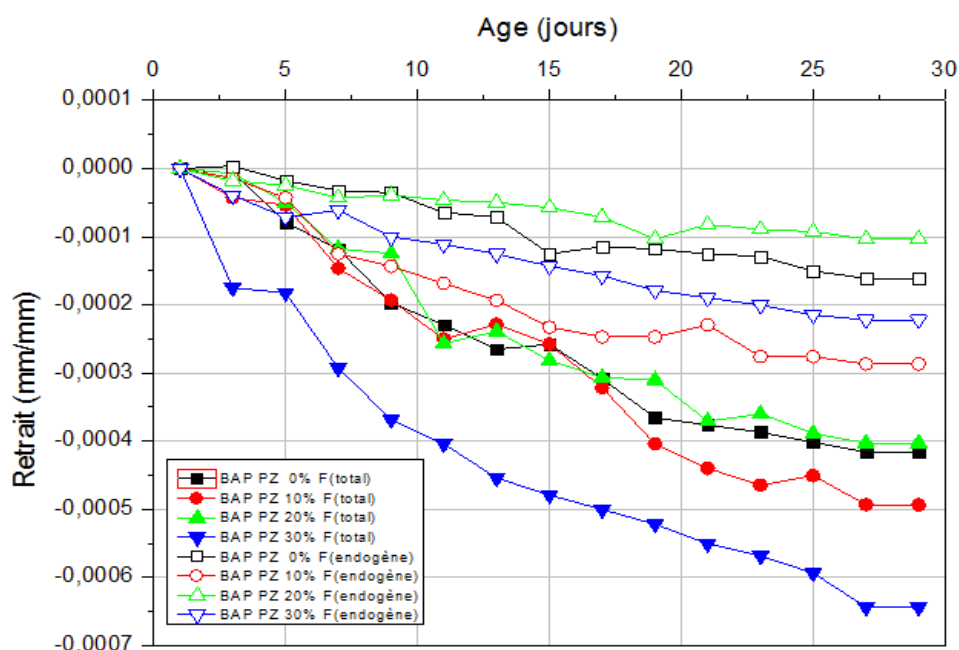


Figure 4.12. Le retrait endogène et total des Bétons Auto-plaçant (% pouzzolane)

Lorsque la teneur en eau est élevée, l'hydratation est plus importante, les capillaires fins commencent très vite à se dessécher en créant des contraintes de tension élevées. Le retrait est due par variation de la dépression capillaire. L'utilisation des fillers calcaire à un effet bénéfique sur la réduction du retrait endogène et de dessiccation.

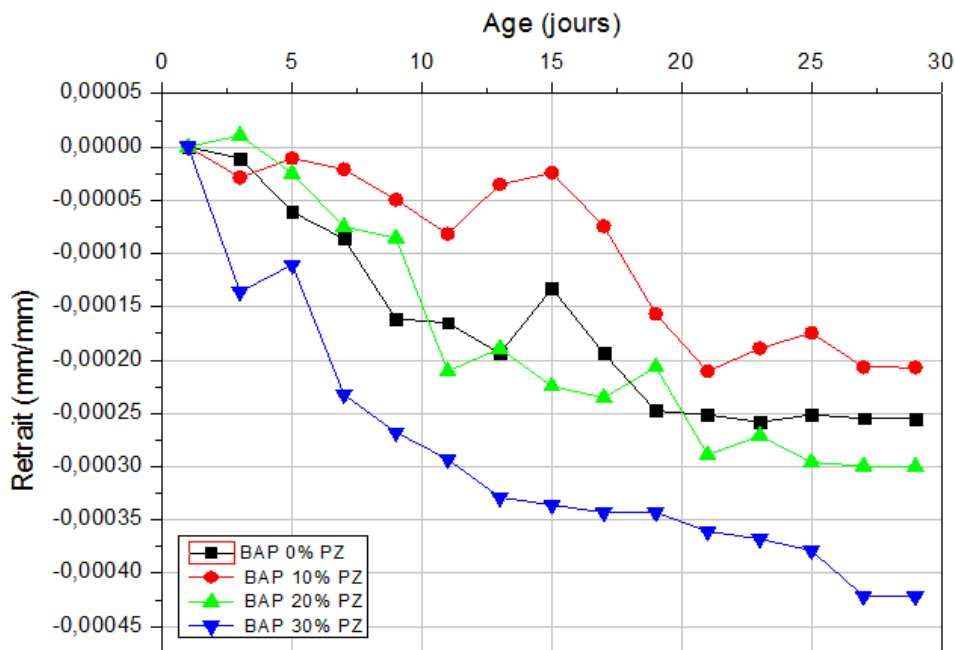


Figure 4.13. Le retrait de dessiccation des Bétons Auto-plaçant (% pouzzolane).

Les résultats obtenus sur l'influence de la pouzzolane sont moins claires. Nous avons remarqué que la pouzzolane n'améliore guère la résistance au retrait des bétons.

Nous pensons que cela est dû à la réaction de la pouzzolane. Ce résultat est contradictoire avec ceux obtenus par Brixi et al (2014) sur différents mortiers ou de ceux de Siad (2010) sur des bétons. Plus d'investigations sont nécessaires sur ce point.

4.2. Etude du retrait des bétons ordinaires :

Dans cette partie nous avons étudié le comportement des bétons ordinaires vis-à-vis le retrait endogène, total et de dessiccation. Les bétons étudiés varient par leur teneur en additifs minéraux (fillers ou pouzzolane) ou par les adjuvants utilisés.



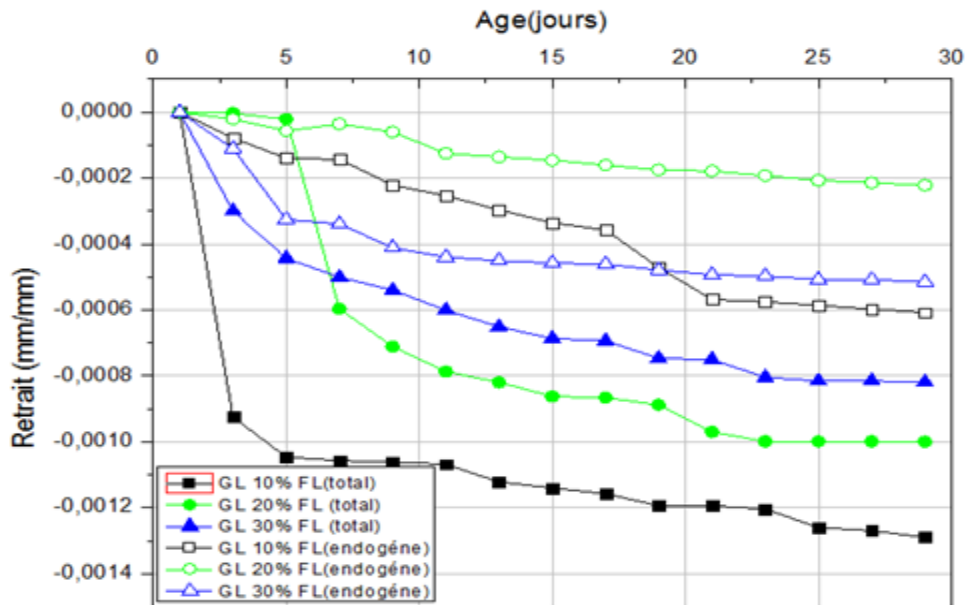


Figure 4.14. Le retrait endogène et total des Bétons ordinaire avec adjuvant GLENIUM (% Filler)

Les résultats obtenus sur les bétons ordinaires confirment les résultats trouvés sur les bétons auto-plaçants. La substitution du ciment par des fillers est bénéfique pour diminuer le retrait. Cependant, nous avons aussi constaté que le retrait endogène et de dessiccation sont plus prononcés chez les bétons auto-plaçant. Ce résultat peut être expliqué par la présence d'une plus grande quantité de pâte dans les bétons auto-plaçants.

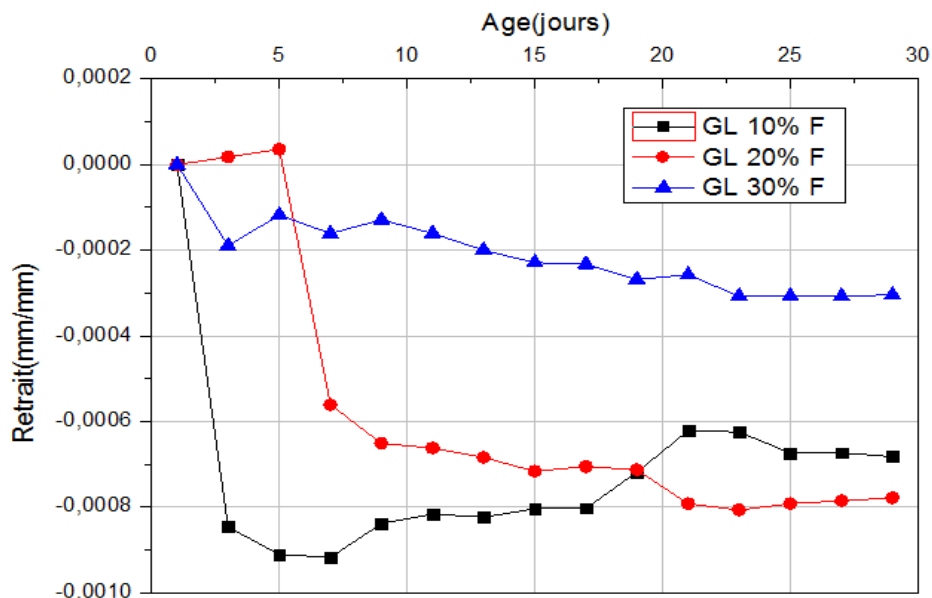


Figure 4.15. Le retrait de dessiccation des Bétons ordinaire avec adjuvant glenium (% Filler)

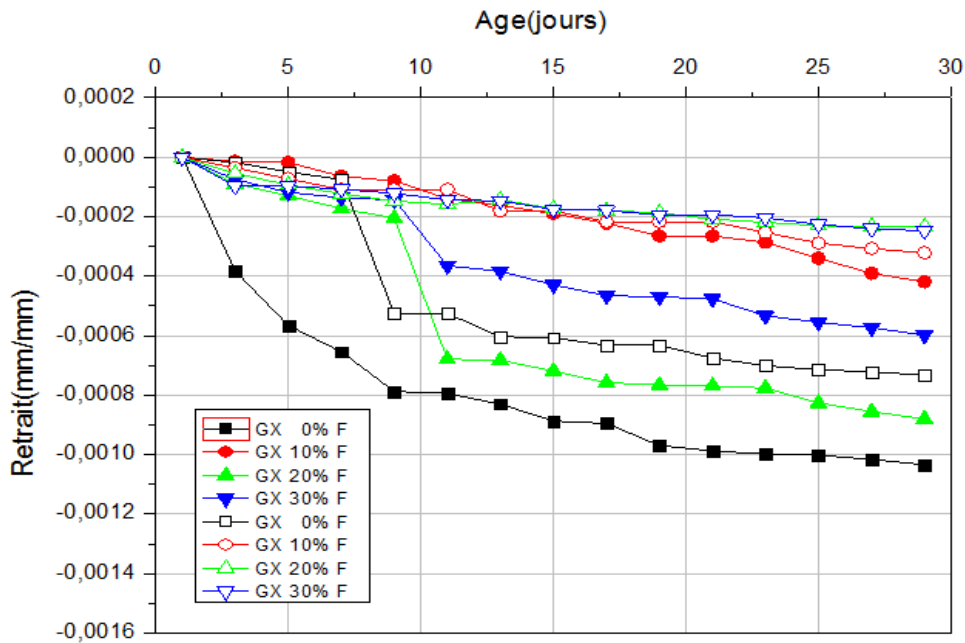


Figure 4.16. Le retrait endogène et total des Bétons ordinaire avec adjuvant granitex (% Filler)

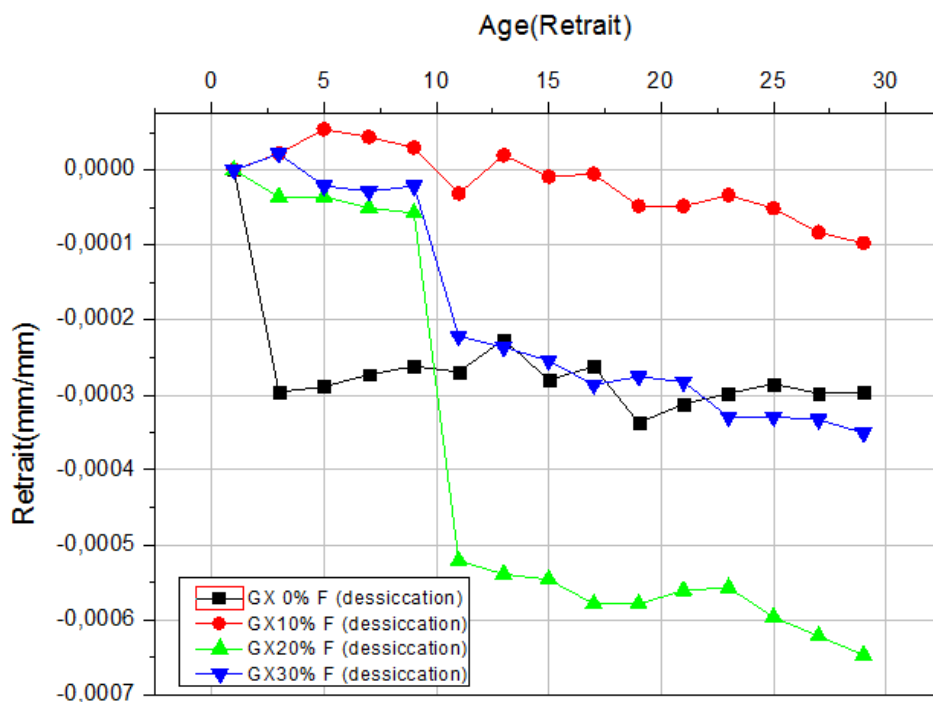


Figure 4.17. Le retrait de dessiccation des Bétons ordinaire avec adjuvant granitex (% Filler)

A partir des figures 4.14, 4.15, 4.16, 4.17. Nous constatons que le béton formulés avec l'adjuvant glenium26 (BASF) présentent des retraits plus importants par rapport aux bétons à base des adjuvants de GRANITEX(Medaflo).

Ce phénomène peut être expliqué par l'effet plus bénéfiques de l'adjuvant GLENIUM qui a tendance à mieux défloculer les grains de ciment engendrent ainsi une meilleur hydratation. Et puisque le processus d'hydratation en lui-même est consommateur de l'eau introduite lors de la confection du matériau, le retrait sera donc plus important.

4.3. Perte de masse :

A partir des figures 4.18, 4.19, 4.20, la perte de masse est plus significative dans cas du le retrait total par rapport au retrait endogène car la perte de masse est due au retrait de dessiccation. On constate que l'augmentation des additions augmente la perte de masse et cela peut être expliqué par le fait que si on augmente le taux des additions dans nos formulations, l'absorption d'eau sera plus importante ensuite cette quantité d'eau piégé sera dissipé par dessiccation.

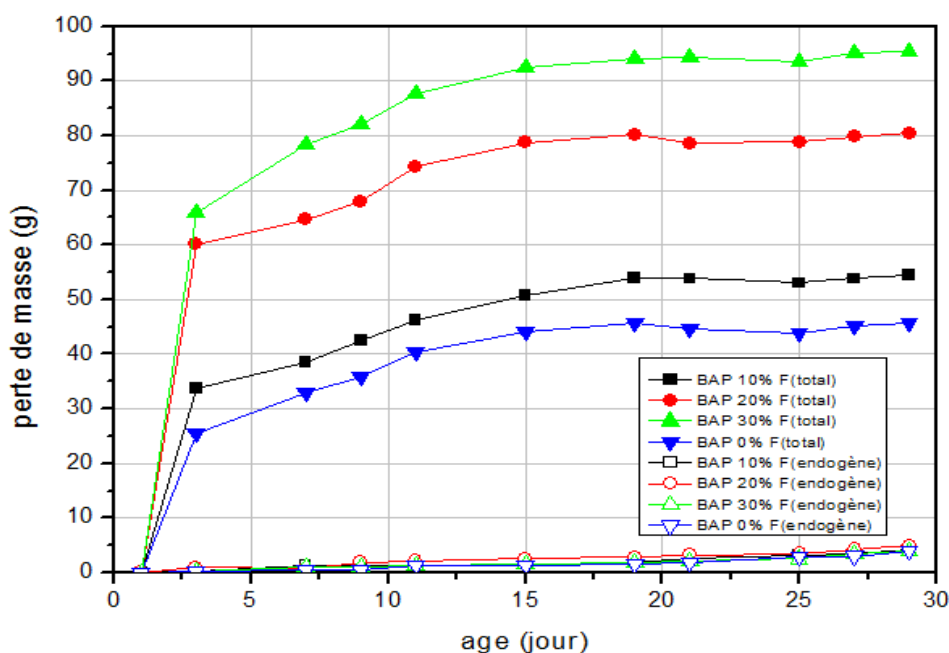


Figure 4.18. Perte de masse Béton auto-plaçant (filler%).

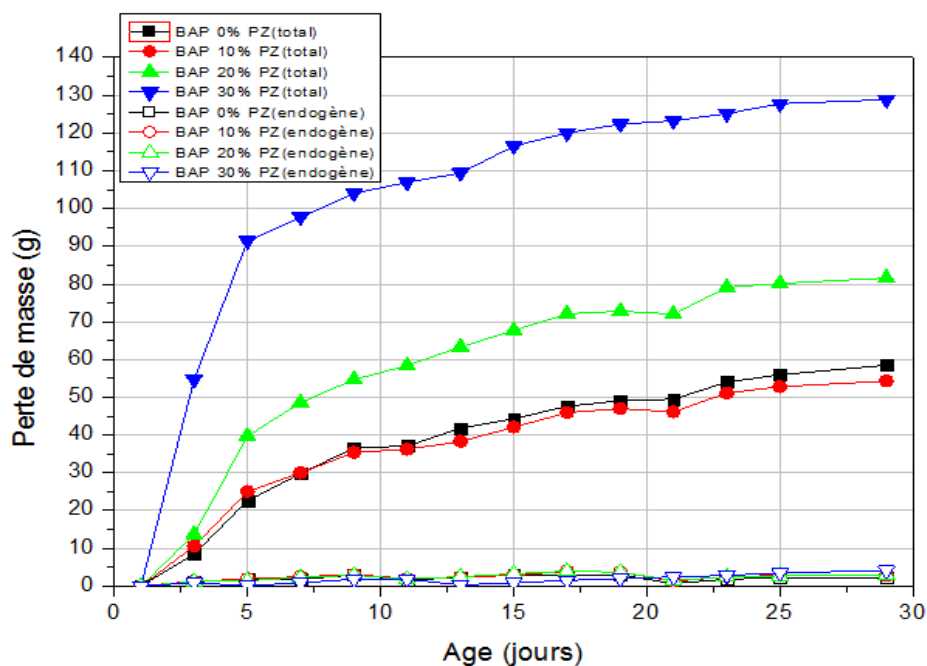


Figure 4.19. Perte de masse Béton auto-plaçant (pouzzolane%).

Par ailleurs les figures 4.18, 4.19 montrent que la perte de masse pour les bétons auto-plaçants à base de pouzzolane est légèrement supérieure par rapport aux bétons auto-plaçants à base de fillers calcaires.

On peut aussi remarquer à travers les mêmes figures que cette perte de masse est plus accentuée au cours des 15 premiers jours du béton pour se stabiliser légèrement après cette période.

Il est donc nécessaire de protéger nos ouvrages au cours de la première semaine par un arrosage afin d'éviter tout départ d'eau qui sera utile pour la suite de l'hydratation et l'amélioration de la résistance mécanique.

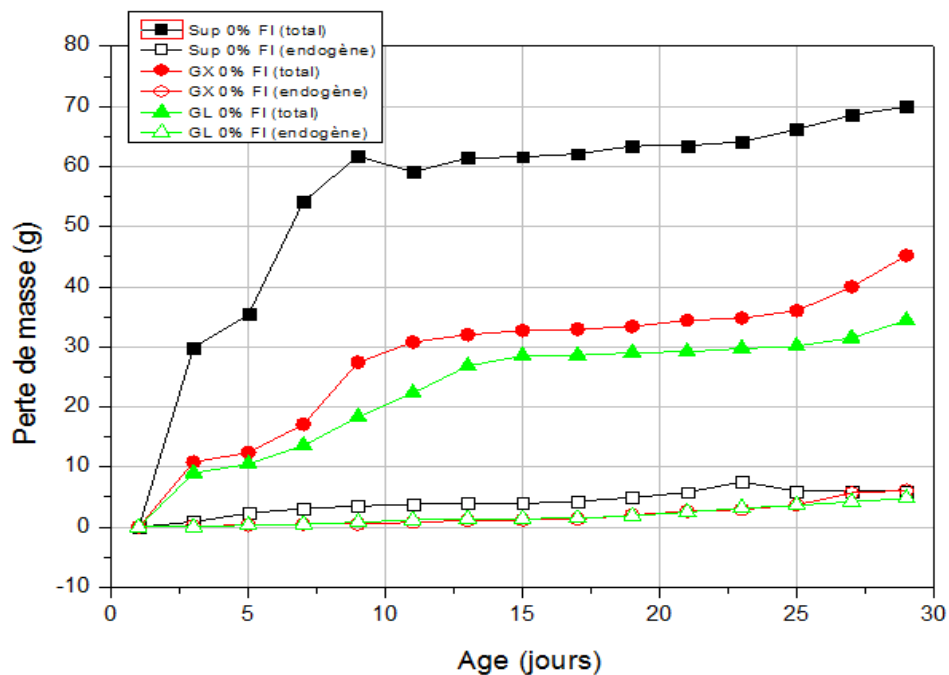


Figure 4.20. Perte de masse des bétons ordinaire avec 03 types d'adjuvants et (0% filler)

Si on compare le béton de référence (filler=0%) en fonction des adjuvants utilisés, on remarque que le glinium26 a permis de réduire considérablement le retrait.

En effet cet adjuvant avec son effet bénéfique sur le plan de la défloculation et la dispersion des grains de ciment, a permis de consommer l'eau du mélange pour former plus d'hydrate, réduisant ainsi la dessiccation des bétons.

4.4. Résistance a la compression

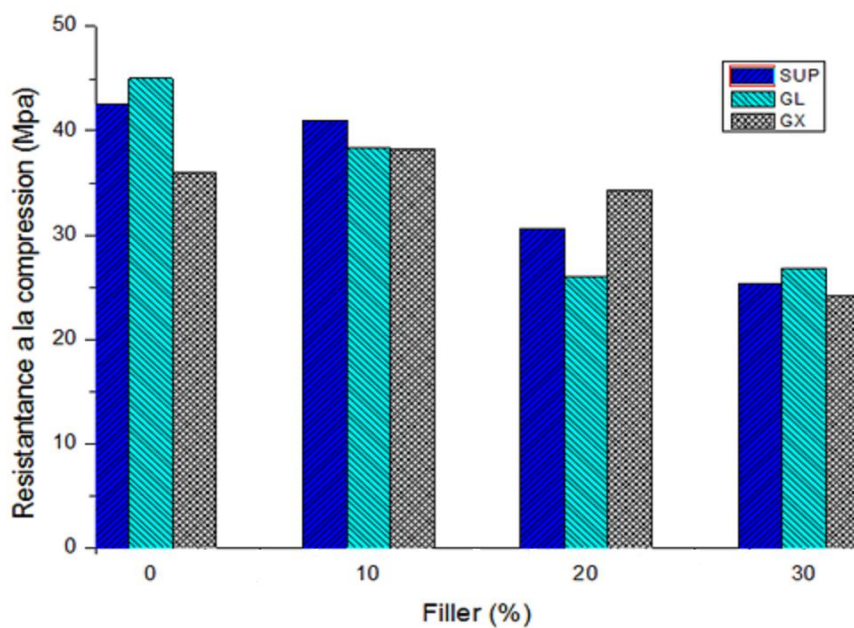


Figure 4.21. Résistance à la compression des bétons étudiés avec variation d'adjuvant en fonction du taux de substitution (filler).

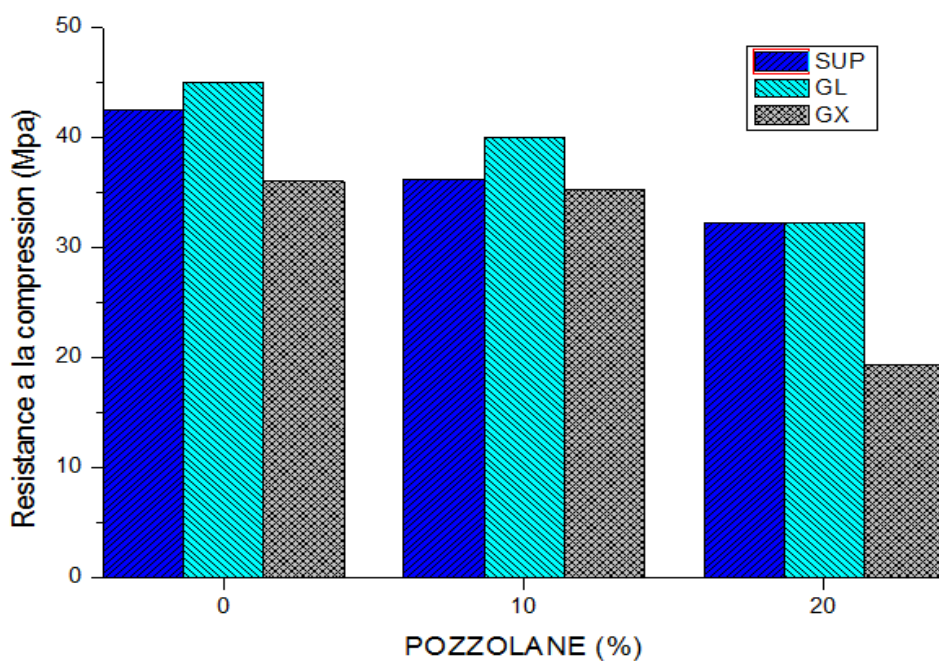


Figure 4.22. Résistance à la compression des bétons étudiés avec variation d'adjuvant en fonction du taux de substitution (pouzzolane).

Les figures 4.21 et 4.22 montrent que la substitution du ciment par n'importe quelles additions utilisées (pouzzolane ou fillers) ne sera pas sans conséquence sur la résistance.

Néanmoins, on constate que le Glenium ou le superior offrent toujours les meilleures résistances par rapport à l'adjuvant de granitex.

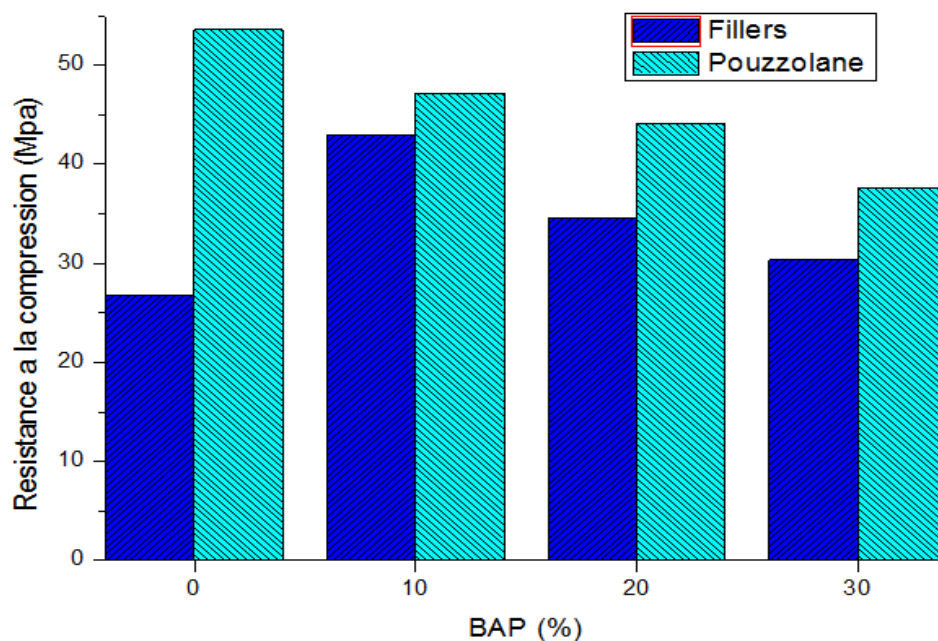


Figure 4.23. . Résistance à la compression des bétons auto plaçants avec variation de taux des substitutions (fillers, pouzzolane).

Les résultats obtenus sont similaires à ceux qui correspondent aux résultats des bétons ordinaires et qui confirme l'influence des additions sur la résistance.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de notre travail consistait à évaluer l'effet des fillers calcaires, pouzzolane et des adjuvants sur la performance des bétons autoplaçants et des bétons ordinaires vis-à-vis des déformations instantanées et des propriétés mécaniques.

Pour ce faire, dix-huit gâchées de béton ordinaire et douze gâchées de béton autoplaçant confectionnés avec différents taux de substitution du ciment par des fillers calcaires ou de la pouzzolane ont été étudiés. Cette étude a nécessité l'utilisation de plusieurs dispositifs expérimentaux avec des protocoles d'essais adaptés aux compositions des mélanges.

Nous avons adapté pour la confection des (BAP) une approche de formulation connue sous l'appellation de « la méthode chinoise ». Par ailleurs la méthode de Dreux gorisse a été utilisée pour la formulation des bétons ordinaires.

La synthèse bibliographique comprenait peu de données relatives à ce sujet sur des formations à base de matériaux locaux, ce qui suscite un réel besoin de recherche dans ce domaine.

Le retrait des formulations étudiées été observé pendant toute la période de l'étude avec une amplitude plus importante pendant les premier jours. Le phénomène est très influencé par le taux de substitution du ciment par des additions, qui permettent d'atténuer le phénomène.

Sur la base des résultats exposés précédemment, nous pouvons d'abord conclure que le Béton auto-plaçant risque d'avoir un retrait plus prononcé que les bétons ordinaires à cause de la quantité de pâte qui est plus importante dans les BAP.

Nous avons remarqué que l'augmentation du taux de substitution de fillers diminue le retrait endogène et total, toutefois le retrait de dessiccation était plus significatif lorsque le béton était fortement dosé en ciment. Par contre les résultats obtenus sur l'influence de la pouzzolane sont moins claire, Nous avons constaté que la pouzzolane n'améliore pas la résistance du béton vis-à-vis du retrait.

En ce qui concerne les adjuvants nous avons trouvé que les bétons formulés avec l'adjuvant Glenium26 (BASF) présente des retraits plus importants que ceux formulés avec le super plastifiant Medaflow (granitex).

En étudiant la corrélation entre le retrait et la perte de masse, nos résultats s'accordent avec ceux trouvés dans la littérature qui indique qu'il semble que la perte en masse au cours de cette période ne dépend pas de la nature du béton mais plutôt de la résistance, et que le retrait endogène et la perte de masse reste en relation c-à-dire l'augmentation de la perte de masse correspond à l'évolution progressive du retrait .

Notre étude peut fournir une base de données relative aux déformations instantanées et aux comportements mécaniques des bétons auto-plaçants a teneur en liant constante.

Ce mémoire ouvre la voie à des sujets intéressants dans le domaine du retrait notamment sur l'investigation sur l'influence des autres additions tel que les marbres ou les laitiers de haut fourneau.

Des études sur le retrait à très jeune âge nous paraît indispensable.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A, GOVIN., 2004: « Aspects Physico -Chimique de l'interaction bois-ciment- modification de l'hydratation du ciment par le bois » thèse de Doctorat de l'université de Limoges.

ACI COMMITTEE 233., 2003: « Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete (ACI 233R-03) », Manual of Concrete Practice, Part 2, American Concrete Institute.

AÏTCIN P. C., NEVILLE A., ACKER P., 1998: « Les différents types de retrait du béton. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées », 215, page 41- 51.

AÏTCIN P.C., NEVILLE A.M., ACKER P., 1997: « Integrated View of Shrinkage Déformation. Concrete International », volume 19, n°9, page 35-41.

ASSIÉ S., 2004: « Durabilité des Bétons Auto-plaçant », Thèse de Doctorat, INSA de Toulouse, France.

BARAGHEL-BOUNY V. and KHEIBERK A., 2001: « Effect of mix-parameters on autogenous deformations of cement pastes–microstructural interpretations ». Concrete Science and engineering, Vol.3, p.23-38.

BARCELO L., BOIVIN S., RIGAUT S., ACKER P., 1999: « Linear versus volumetric autogenous shrinkage measurement: Material behaviour or experimental artifact ». Proc, 2nd Int, Res. Sem. On self-desiccation and its importance in concrete technology, Sweden, page 109-125.

BAROGHEL-BOUNY V., 1994: « Caractérisation des pâtes de ciments et des bétons, méthodes, analyse, interprétations », Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

BAROGHEL-BOUNY V., and KHEIBEK A., 2000: « Effect of mix parameters on autogeneous deformations of cement pastes-microstructures on autogenous deformations », proceeding of the international RILEM work shop “shrinkage 2000” Paris, France.

Rapport-gratuit.com



BARON J., 1982 : « Les retraits de la pâte de ciment, le béton hydraulique »: connaissance et pratique, Presses de l'école Nationale des Pont et Chaussées, Chapitre 27 « Les retraits de la pâte de ciment », Pages 485-501.

BENKECHKACHE G., 2012 : « contribution à l'étude des mécanismes liés au retrait et fluage (déformations différées) des bétons ». Thèse de Magister, Université de Montouri, Constantine.

BISSONNETTE B., PIGEON M., 2000 : « Le comportement viscoélastique du béton en traction et la compatibilité déformationnelle des réparations, Matériau et Constructions », Volume 33, pages 108-118.

BJONTEGAARD O., 1999: «Thermal dilatation and autogenous deformation as driving forces to self-induced stresses in high performance concrete», PhD thesis, Trondheim, Norway.

BJONTEGAARD O., Sellevold E., 2000: «Interaction between thermal dilatation and autogenous deformation in high performance concrete», Proceedings of the International RILEM Workshop, Edited by Baroghel Bouny and P-C.Aïtcin, pp. 43-55.

BOIVIN S., 2001 : « Retrait au jeune âge du béton Développement d'une méthode expérimentale et contribution à l'analyse physique du retrait endogène ». Thèse de Doctorat, LCPC, Paris, France.

BOUASKER M., 2007 : « étude numérique et expérimentale du retrait endogène au très jeune âge des pâtes de ciment avec et sans inclusions » Thèse de Doctorat, Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique, Nantes, France.

Boukli Hacene S.M., 2010 : « Contribution à l'étude de la résistance caractéristique des bétons de la région de Tlemcen », thèse de doctorat de l'université de Tlemcen, Algérie.

BRIXI N. K., 2014 : « ETUDE DU RETRAIT DES BETONS AUTOPLAÇANTS ».

CARL FORTIN., 2005: « Curling and strain monitoring of slabs strips in a laboratory environment», Université Laval, Influence of basic parameters upon shrinkage.

CHARRON J-P., 2003 : «Contribution à l'étude du comportement au jeune âge des matériaux cimentaires en conditions des déformations libre et restreinte», thèse de doctorat, CRIB, Université Laval, Québec, Canada.

COQUILLAT G., 1987 : « Mesures fondamentales sur éprouvettes. Définitions et méthodes expérimentales », Annales de l'ITBTP, n° 455.

DINH Thi Thanh Xuan., 2012 : « Etude expérimentale et numérique de l'approche physico-chimique pour le matériau hétérogène: Application au matériau cimentaire soumis au dioxyde de carbone (CO₂) » THÈSE Docteur de l'Université d'Evry Val d'Essonne, page 49.

DIVET L., 2001 : « Étude des Réactions Sulfatiques Internes au Béton ». Thèse de doctorat, CNAM Paris, Paris, France.

Elbachir Elbahi, Sidi Mohammed El Amine Boukli Hacene. 2014: « Influence of the supplementary cementations' materials on the dynamic properties of concrete », *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 660, pp. 162-167,

ERIC BEDARD., 2009 : « INFLUENCE DE LA TEMPERATURE SUR LE COMPORTEMENT AU JEUNE AGE DU BETON » UNIVERSITE LAVAL QUEBEC.

ESPING O., 2008: «Effect of limestone filler BET (H₂O)-area on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete». *Cem Concr Res*; 38(7):938–44.

Flore BRUE., 2009 : « ROLES DE LA TEMPERATURE ET DE LA COMPOSITION SUR LE COUPLAGE THERMO-HYDRO-MECANIQUE DES BETONS », THESE DOCTORAT DELIVRE PAR L'ECOLE CENTRALE DE LILLE. Page 32-33.

GARTENER E.M., YOUNG J.F., DAMIDOT D.A., JAWED I., 2002: «Hydration of Portland cement», *Structure and performance of cements*, Bensted and Barnes (eds.), Spon press.

GHRICI M., KENAI S., SAID-MANSOUR M., 2007: «Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements», *Cement & Concrete Composites* 29,542–549.

HAMMER T., 2002: «The relationship between settlement and plastic shrinkage of high strength concrete». In Proceedings of the Full ACI Convention, Phenix USA. ACI.

HAMMER T.A., 2003: « Cracking susceptibility due to volume changes of self-compacting concrete”. In Proceedings of the third international RILEM Symposium of self-compacting concrete. RILEM.

HANNANT D. J., J. BRANCH, and M. MULHERON., 1999: « Equipment for tensile testing of fresh concrete ». Magazine of Concrete Research, 51(4): 263-267.

HAOUAS A., 2007 : « Comportement au jeune âge des Matériaux cimentaires-caractérisation et modélisation Chimio-Hydro- Mécanique du retrait ». Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure De Cachan, France.

HAYAKAWA; MASTOUKA; SHINDOH, 1993: «Development and application of super workable concrete», Rilem workshop special concrete: workability and mixing; P.Bartos Ed; P25-51.

HEDLUND H., 2000: «Hardening concrete measurement and evaluation of non-elastic deformation and associated restraint stresses », PhD thesis, Lulea, Suède.

HOCINE SIAD., 2010 : « Influence du type d’addition minérale sur le comportement physico mécanique et sur la durabilité des bétons auto-plaçant », thèse de DOCTORAT.

HOGAN F J., and MEUSEL J W., 1981: «Evaluation for Durability and Strength Development of a Ground Granulated Blas Furnace Slag» Cement, Concrete, and Aggregates, Vol. 3, No.1, summer, pp. 40-52.

Houst Yves Freddy, 1993 : « Diffusion de gaz, carbonatation et retrait de la pâte de ciment durcie », Thèse Ecole polytechnique fédérale de Lausanne EPFL, page 86.

HUA C., ACKER P., EHRLACHER A., 1995 : « Retrait d'auto-dessiccation du ciment, Bulletin de liaison des Laboratoire des Ponts et Chaussées », N° 196, page 79-89.

Ingrid APAYA., 2011 : « retrait endogène et de séchage des BAP à air entraîné contenant divers composés organiques comme anti retrait » Mémoire de maîtrise, Sherbrooke (Québec) Canada.

JAOUADI I., 2008: «Etude numérique et expérimentale du retrait endogène de la pâte de ciment au jeune âge» (en français), thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Suisse.

JENSEN O.M., 2000 : «Influence of cement composition on autogenous deformation and change of the relative humidity», Actes du congrès RILEM Shrinkage 2000. Ed. Par: Baroghel-Bouny, V. et Aïtcin, P.-C., Paris : RILEM, p. 143-153.

JENSEN O.M., HANSEN P. 1996: «Autogenous deformation and change of the relative humidity in silica fume-modified cement paste». ACI Materials Journal, vol. 93, n°6, p. 539-543.

KHATIB J.M.,2007:«Performance of self-compacting concrete containing fly ash», Construction and Building Materials 22, Pages 1963–1971

KOSMATKA S.H., KERKHOFF B., 2003 : « Dosage et contrôle des mélange de béton », 7^{ème} édition, Association Canadienne du Ciment, Ottawa, Ontario, Canada, 368 pages.

KOSMATKA S.H., PANARESE W.C., GISSING K.D., MACLEOD N.F., 1995 : « Contrôle et dosage des mélanges de béton », 6e Edition, Association Canadienne du ciment Portland, Ottawa, pages 228.

Kosmatka, Steven H., Kerkhoff, B., 2003 : « *Dosage et contrôle des mélanges de béton* », EB101, 7e édition, Association Canadienne du Ciment, Ottawa, Ontario, Canada, 368 p.

KRISHNA R N., 1996: «Dispersing action of superplasticizer with different grades of cement and fly ash». ACI material journal N° 93 M 39, pp. 351 – 355, 1996.

LI H., WEE T. H. and WONG S. F. 2002: «Early-age Creep and Shrinkage of Blended Cement Concrete», ACI Materials Journal, Vol. 99, No. 1, Jan-Feb., pp. 3- 10.

Loukili A., 1996 : «Etude du retrait et du fluage des Bétons à Ultra-Hautes Performances» (en français), Thèse de doctorat, Université de Nantes, France.

LOUKILI A., 2011: «Les bétons auto-plaçant in Mécanique et Ingénierie des Matériaux», édition Hermes Science Lavoisier, Paris, France.

LOUKILI A., CHOPIN D., KHELIDJ A., LE TOUZO J-Y., 2000: « A new approach to determine autogenous shrinkage of mortar at an early age considering temperature history», Cement and Concrete Research, Vol. 30, pp 915-922.

LURA P., BREUGEL K. V., MARUMAYA I., 2000: « Effect of curing temperature and type of cement on early age shrinkage of high performance concrete», Cement and Concrete Research, 31, pp 1867-1872, Tokyo, Japan.

M. J. Ghazali, C.H.Azhari, S. Abdullah & M. Z. Omar., 2008: «Characterization of natural fibers (Sugarcane Bagasse) in Cement Composites» Proceedings of the World Congress on Engineering, London, Vol II.

M. PIGEON, G. TOMA, J. MARCHAND, B. BISSONNETTE 2003 : « Étude expérimentale du retrait endogène restreint au jeune âge » centre de recherche sur les infrastructures en béton (CRIB), Université Laval, Canada.

MANSOUR M. S., ABADLIA M. T., JAUBERTHIE R., MOLEZ L., MESSAOUDENE I., RANGEARD D., 2010 : « Pouzzolanité de la cendre volcanique de Béni Saf », Congrès International sur les Matériaux de l'Environnement, sidi Fredj, Alger, Algeria.

MARWEN BOUASKER 2007 : « Etude numérique et expérimentale du retrait endogène au très jeune âge des pâtes de ciment avec et sans inclusions », Thèse de Doctorat.

MITANI Husam., 2003 : « Variations volumiques des matrices cimentaires aux très jeunes âges : approche expérimentale des aspects physiques et microstructuraux », Mechanics. Ecole des Ponts Paris Tech, French.

MOUNANGA P., 2003 : « Comportement des matrices cimentaires au jeune âge : relation entre évolution chimique et déformations chimique et endogènes ». XXIème Rencontres Universitaires De Génie Civil.

MOUNANGA, P., 2003 : «Etude expérimentale du comportement de pâtes de ciment au très jeune âge : hydratation, retraits, propriétés thermophysiques. » Thèse de doctorat, Université de Nantes, Nantes, France.

NEVILLE A. M., 2000 : «Propriétés des Bétons», traduction CRIB, Sherbrooke, Canada, éd. Paris Eyrolles.

NEVILLE A.M., DILGER W.H and BROOKS J.J., 1983: «Creep of plain and structural concrete» London: Construction Press., page 361.

NEVILLE, A. M. 1996: «Properties of Concrete», 4th ed., John Wiley and Sons, Inc., New York, NY, 844 pp.

PANE I. and HANSEN W 2002 : «Early age creep and stress relaxation of concrete containing blended cements» *Materiaux ET Constructions, Materials and Structures*, Vol .35, p92-96.

RADOCEA A., 1998: « Autogenous volume change of concrete at very early age », *Magazine of Concrete Research*, 50, pp 107-113, Gothenburg.

RIXOM, R. ET MAILVAGANAM, N., 1999 : «*Chemical admixtures for concrete*».

SCHIEBL P., PLANNERER M., BRANDES C., 2000: «Influence of binders and admixtures on autogenous shrinkage of high performance concrete», proceeding of the international RILEM work shop « shrinkage 2000 » Paris, France.

SIAD H., 2010 :«Influence du type d'addition minérale sur le comportement physicomécanique et sur la durabilité des bétons autoplaçants ». Thèse de Doctorat, Institut National des sciences appliquées de Rennes, France.

SMADI M., SLATE F O., & NILSON A., 1989: «Shrinkage and creep of high medium and low strength concretes, including overlods», *ACI Materials Journal*. Volume n°84, pages 224 -234.

SOROKA I., 1979: « *Portland cement paste and concrete* », Macmillan, Londres.

SULE M., VAN BREUGEL K., 2001: « Possibilities of reinforcement to control cracking caused by autogenous shrinkage in view of designing durable concrete structures », Concreep 6, Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and other Quasi-Brittle Materials, Ed. by F. J. Ulm, Z. P. Bazant and F. H. Wittmann, pp 639-644, Netherlands.

SWENSON E.G., SEREDA P.J., 1968: «Mechanism of the carbonation shrinkage of lime and hydrated cement, *Journal of Applied Chemistry*», Volume 18, N° 4, page 111-117.

TALEB O., 2009 : « Optimisation de la formulation des bétons autoplaçants à base de matériaux locaux », mémoire de magister de l'université de Tlemcen, Algérie.

TAZAWA E., And MIYAZAWA S., 1997: «Influence of constituents and compositions on autogenous shrinkage of cementitious materials», magazine of concrete research.

TAZAWA E., MIYAZAWA S., 1998: «Effect of constituents and curing conditions on autogenous shrinkage of concrete», proceeding of the international workshop on autogenous shrinkage of concrete, Hiroshima, Japan, pp. 257–268.

TOMA G., 1999 : « Comportement des bétons au jeune âge », thèse de doctorat ès science, université de Laval, Canada, 264 pages.

TURCRY .P, LOUKILI A., CASABONNE J.M., 2002: « Can the maturity concept be used to separate the autogenous shrinkage and thermal deformation of a cement paste at early age », Cement and Concrete Research, 32, pp 1143-1450, Nantes, France.

TURCRY PH., 2004 : « Retrait et Fissuration des Bétons Autoplaçants – Influence de la Formulation ». Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes et Université de Nantes.

UNO P.J., 1998: «Plastic shrinkage cracking and evaporation formulas». ACI Materials Journal 95(4), Pages 365-375.

VAN BREUGEL K. and DE VRIES J., 1998: «Mixture optimization of low water/cement ration high strength concrete in view in reduction of autogenous shrinkage», magazine of concrete research, pp. 365 –382.

VAN BREUGEL K., OUWERKERK H., and DE VRIES J., 2000: «Effect of mixture composition and size effect on shrinkage of high strength concrete». Proceeding of the international RILEM work shop « shrinkage 2000 » Paris, France.

WESTMAN G., 1999: « Concrete creep and thermal stresses new creep models and their effects on stress development », PhD thesis, Lulea, Suède.

WITTMANN F. H., 1976: «On the action of capillary pressure in fresh concrete, Cement and Concrete Research», Volume 6, N°1, page 49-56.

ZHANG M.H., TAM C.T., and LEOW M.P., 2003: «Effect of water-to-cementitious materials ratio and silica fume on the autogenous shrinkage of concrete». Cement and Concrete Research, vol. 33, n°10, p. 1687-1694.