

*République Algérienne Démocratique et Populaire*  
*Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique*

Université Mouloud MAMMERRI Tizi-Ouzou  
Faculté du Génie de la Construction  
Département de génie civil



## MÉMOIRE DE MAGISTÈRE

Spécialité : Génie Civil  
Option : Structures et Matériaux

### Thème

# RETRAIT PLASTIQUE DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS

Présenté par :

**BOUCHENEB Yacine**

Devant le jury d'examen composé de :

M <sup>r</sup> AIT TAHAR Kamal	<i>Professeur</i>	<i>UMMTO</i>	Président
M <sup>r</sup> AIT AIDER Hacène	<i>Maître de Conférences (A)</i>	<i>UMMTO</i>	Rapporteur
M <sup>r</sup> MEDDAHI Amer	<i>Maître de Conférences (A)</i>	<i>UMBB</i>	Examineur
M <sup>r</sup> KACHI Md Saïd	<i>Maître de Conférences (A)</i>	<i>UMMTO</i>	Examineur

Soutenue le : 08/12/2011

## ***Dédicace***

***Je dédie ce modeste travail :***

***À mes très chers parents,***

***à mes chers frères et sœurs,***

***à ma cher grande famille,***

***à toute mes amis proches ou loins,***

***à tous ceux qui sont chers, et qu'ils trouvent leur place dans mon cœur.***

***BOUCHENEB Yacine.***

## ***Remerciement***

***De prime d'abord, je tiens à remercier le Dieu clément et miséricordieux de m'avoir donné la force, le courage et la patience durant m'étude pour arriver à ce jour là.***

***Comme, c'est un plaisir de remercier tous ce qui a contribué à la réalisation de ce mémoire :***

***En premier lieu, je voudrais exprimer mes sincères remerciements à mes parents pour leur contribution pour chaque travail effectué.***

***Je voudrais remercier aussi mon promoteur Mr. AIT AIDER Hacène, Maitre de conférences à l'UMMTO, pour son aide, ces nombreux conseils et surtout sa disponibilité le long du travail.***

***Mes vifs remerciements iront aussi aux membres de jury qui nous ferons l'honneur de traiter notre travail.***

***BOUCHENEYB Yacine.***

## Résumé

Ce travail a pour but de montrer l'amplitude énorme du retrait plastique des bétons autoplacants en présence du séchage, ce qui laisse les éléments horizontaux de la structure, comme les dalles, s'exposent à une grande fissuration, après quelques heures du coulage du béton, donc on s'intéresse à prévoir certaines modifications pour limiter ce potentiel. Le retrait plastique des bétons autoplacants à l'état frais en présence du séchage est nocif à la construction puisque les fissures vont apparaître d'une manière forte, surtout en présence du vent. La recherche bibliographique et les essais sur mortiers ont montré que les dosages en fines et en superplastifiant importants sont susceptibles d'augmenter le retrait plastique à l'état frais. En ALGERIE où la température ne diminue pas de 37°C en été, il est impossible d'utiliser les bétons autoplacants dans les conditions là, surtout s'il intervient le vent chaud qui est le plus influent que la température élevée. Pour éviter le risque de fissuration croissante du béton à l'état frais, certaines propositions ont été préconisées, exemple qu'il doit être protégé par un produit de cure, qui compensera son absence de ressuage ou bien il est préférable de formuler le béton en limitant le dosage en superplastifiant.

## **Abstract**

This work aims to show the huge range of plastic shrinkage of concrete compacting in the presence of drying, leaving the horizontal elements of the structure, like slabs, exposed to a large crack after some hours from casting concrete, we strive to provide some of the amendments to limit this potential. Plastic shrinkage of concrete compacting in fresh state with the presence of drying is harmful to the building since the cracks will appear a strong way, especially in the presence of wind. Bibliographic research and tests on mortars have shown that important assays in fine and superplasticizer are likely to increase the plastic shrinkage in the fresh state. In Algeria, where the temperature does not decrease for 37 °C in summer, it is impossible to use the concrete compacting in the conditions there, especially if it intervene the hot wind which is more influential than the high temperature. In order to avoid the risk of growing cracking concrete in fresh state, some proposals have been recommended, example that it should be protected by a curing agent, who will compensate its absence of chilling or it is preferable to formulate the concrete by limiting assay of superplasticizer.

## LISTE DES FIGURES

Désignation	Titre	Page
Figure 1.1	Aspect d'un béton autoplaçant à l'état frais.	3
Figure 1.2	Composition d'un béton ordinaire et d'un béton autoplaçant. Aspect à l'état frais d'un béton ordinaire plastique et d'un béton autoplaçant.	4
Figure 1.3	Schéma de la boîte en L.	5
Figure 1.4	Réduction du volume de gravillon à la moitié de sa compacité.	8
Figure 1.5	Essais d'optimisation des dosages en eau et en superplastifiant sur mortiers.	9
Figure 1.6	Volume limite de blocage $V_{bi}$ en fonction du rapport de l'espacement des armatures $e$ et le diamètre $d_i$ du granulat.	15
Figure 1.7	Volumes de pâtes respectant le critère de non-blocage et le critère de fluidité en fonction du rapport gravillon/sable pour la formule 0/10.	16
Figure 2.1	Définition du retrait plastique.	24
Figure 2.2	Schématisation des mécanismes du retrait plastique d'une pâte de ciment.	25
Figure 2.3	Evolution théorique de la pression de l'eau dans une pâte de ciment.	26
Figure 2.4	Position du ménisque sans retrait.	27
Figure 2.5	Position du ménisque avec retrait.	27
Figure 2.6	Relation entre pression capillaire et perte de masse, en fonction du retrait de la pâte sous la couche consolidée (modélisation de RADOCEA [17]).	28
Figure 2.7	Schématisation de la fissuration à l'état frais, en termes de retrait et capacité de déformation (d'après [33]).	32
Figure 2.8	Exemple de dispositif de mesure de la capacité de déformation du béton frais [38].	33
Figure 2.9	Dalle de retrait empêché [40].	34

Figure 2.10	Anneau de retrait empêché.	34
Figure 2.11	Poutre de retrait empêché [36].	35
Figure 3.1	Dispositif de mesure des déformations plastiques : moule 7x7x28cm(A), enveloppe (B+C), capteurs laser (D et E).	38
Figure 3.2	Schéma du dispositif de mesure des déformations plastiques.	39
Figure 3.3	Mesure du tassement.	40
Figure 3.4	Reproductibilité de la mesure du retrait plastique.	40
Figure 3.5	Mesure de l'évaporation.	41
Figure 3.6	Schéma du dispositif de mesure de la pression capillaire.	41
Figure 3.7	Mesure de la pression capillaire.	42
Figure 3.8	Céramique poreuse	42
Figure 3.9	Mesure du retrait plastique avec ventilation.	43
Figure 3.10	Vue en coupe du dispositif de fissuration des mortiers.	44
Figure 3.11	Dispositif de fissuration pour mortier.	44
Figure 3.12	Vue en coupe du dispositif de fissuration des bétons.	45
Figure 3.13	Dispositif de fissuration pour bétons	45
Figure 3.14	Dimensions du cône MBE par rapport au cône d'Abrams.	53
Figure 4.1	Echantillonneur [50].	55
Figure 4.2	Etalement d'un béton autoplaçant.	61
Figure 4.3	Essai d'étalement.	61
Figure 4.4	L'essai à la boîte en L.	62
Figure 4.5	Essai de stabilité au tamis.	63
Figure 4.6	Essai de compression.	64
Figure 4.7	Essai de traction par flexion.	65

Figure 4.8	Dispositif de fissuration pour mortier.	70
Figure 4.9	Dispositif de fissuration menu d'un mortier.	71
Figure 4.10	Aspect agrandi d'une fissure à la fin d'essai.	72
Figure 4.11	Insertion du dispositif menu du mortier dans l'étuve.	72
Figure 4.12	Exposition du mortier à température élevée et air chaud.	73
Figure 5.1	Déformation (fissuration) du mortier dans les conditions naturelles du laboratoire (Température : 15°C, Humidité : 70% et Vent : 0).	96
Figure 5.2	Déformation (fissuration) du mortier dans le cas du séchage à température élevée.	99
Figure 5.3	Etat des fissures du mortier à un degré de température du 15°C après 8 heures du temps.	101
Figure 5.4	Etat des fissures du mortier à un degré de température du 30°C après 4 heures du temps.	101
Figure 5.5	Etat des fissures du mortier à un degré de température du 50°C après 3 heures du temps.	101
Figure 5.6	Etat des fissures du mortier à un degré de température du 70°C après 3 heures du temps.	101
Figure 5.7	Déformation (fissuration) du mortier dans le cas du séchage à température élevée et à air chaud.	102
Figure 5.8	Perte de masse du mortier par unité de surface, à température élevée.	103
Figure 5.9	Perte de masse du mortier par unité de surface, au vent chaud.	103
Figure 5.10	Application immédiate du produit de cure après le coulage.	106

## LISTE DES TABLEAUX

Désignation	Titre	Page
Tableau 1.1	Valeurs préconisées pour les essais de l'AFGC.	6
Tableau 1.2	Optimisation de l'empilement gravillon/sable à l'aide du logiciel RENÉ -LCPC.	16
Tableau 1.3	Comparaison du cahier des charges d'un béton autoplaçant et de simulation des propriétés rhéologiques d'une formule 0/10.	19
Tableau 1.4	Exemple de formulations d'un béton autoplaçant 0/10.	20
Tableau 1.5	Résultats des essais de caractérisation d'un béton autoplaçant 0/10.	20
Tableau 3.1	Caractéristiques des gravillons du béton.	48
Tableau 3.2	Composition du béton.	51
Tableau 3.3	Composition du MBE corrigé par les sables du béton.	51
Tableau 3.4	Composition du MBE suivant le type de correction.	52
Tableau 4.1	La résistance du ciment à 2 et 28 jours.	56
Tableau 4.2	Composition chimique du ciment.	57
Tableau 4.3	Composition minéralogique du ciment.	58
Tableau 4.4	Composition chimique du filler calcaire.	59
Tableau 4.5	Plages des paramètres d'une formule du mortier.	66
Tableau 4.6	Caractéristiques des gravillons du béton.	66
Tableau 4.7	Caractéristiques du sable du béton.	68
Tableau 4.8	Composition du MBE corrigé par le sable du béton.	70
Tableau 5.1	Analyse granulométrique du gravier 8/15.	74
Tableau 5.2	Analyse granulométrique du gravier 3/8.	74

Tableau 5.3	Analyse granulométrique du sable 0/3.	75
Tableau 5.4	Analyse granulométrique du gravier 8/15.	75
Tableau 5.5	Analyse granulométrique du gravier 3/8.	76
Tableau 5.6	Analyse granulométrique du sable 0/3.	76
Tableau 5.7	Densités apparente et absolue des granulats.	76
Tableau 5.8	Module de finesse du sable.	77
Tableau 5.9	Valeur de l'équivalent du sable.	77
Tableau 5.10	La composition du béton autoplaçant.	77
Tableau 5.11	Résultat d'essai au cône d'Abrams.	78
Tableau 5.12	Résultats de l'essai à la boîte en L.	78
Tableau 5.13	Résultat d'essai de stabilité au tamis.	78
Tableau 5.14	Résistance à la compression du béton autoplaçant.	79
Tableau 5.15	Résistance à la traction du béton autoplaçant.	79
Tableau 5.16	Récapitulatif des résultats d'essais effectués sur le béton autoplaçant.	80
Tableau 5.17	Granulométrie du mélange.	80
Tableau 5.18	Masse des tranches granulaires.	81
Tableau 5.19	Diamètre, volume et surface de la particule moyenne dans chaque tranche granulaire.	81
Tableau 5.20	Volumes, nombres et surfaces développés de l'ensemble des particules dans chaque tranche granulaire.	82
Tableau 5.21	Granulométrie du sable du béton.	83
Tableau 5.22	Masses des tranches du sable.	83
Tableau 5.23	Diamètre, volume et surface de la particule moyenne dans chaque tranche du sable.	84

Tableau 5.24	Volumes, nombres et surfaces développées de l'ensemble des particules moyennes dans chaque tranche.	84
Tableau 5.25	Composition du mortier de béton équivalent.	85
Tableau 5.26	Composition du mortier occupant le dispositif de fissuration.	85
Tableau 5.27	Résultats du premier essai.	86
Tableau 5.28	Résultats du deuxième essai.	87
Tableau 5.29	Résultats du troisième essai.	88
Tableau 5.30	Résultats du premier essai.	89
Tableau 5.31	Résultats du deuxième essai.	90
Tableau 5.32	Résultats du troisième essai.	91
Tableau 5.33	Résultats du premier essai.	92
Tableau 5.34	Résultats du deuxième essai.	92
Tableau 5.35	Résultats du troisième essai.	92
Tableau 5.36	Résultats du quatrième essai.	93
Tableau 5.37	Résultats du cinquième essai.	93
Tableau 5.38	Résultats du sixième essai.	94
Tableau 5.39	Résultats du septième essai.	94
Tableau 5.40	Résultats du huitième essai.	95
Tableau 5.41	Résultats du neuvième essai.	95

# SOMMAIRE

<b>INTRUDUCTION</b> .....	1
<b>CHAPITRE I : Le béton autoplaçants ; Concept et formulation</b>	
I.1 - Introduction .....	3
I.2 - Concept du béton autoplaçant .....	3
I.3 - Caractérisation des bétons autoplaçants à l'état frais .....	5
I.3.1 - Essai d'étalement .....	5
I.3.2 - Essai à la boîte en L .....	5
I.3.3 - Essai de stabilité au tamis .....	6
I.4 - Diverses appellations .....	6
I.5 - La formulation des bétons autoplaçants .....	7
I.5.1 - Formuler un béton .....	7
I.5.2 - Principes de formulation .....	7
I.5.3 - Différentes approches pour la formulation des bétons autoplaçants .....	8
I.5.3.1 - Approche Japonaise (méthode d'OKAMURA) .....	8
I.5.3.2 - Approche suédoise par PETERSSON et AL en 1996 .....	10
I.5.3.3 - Approche JSCE (Japanese society of civil engineers) .....	10
I.5.3.4 - Approche du laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC) .....	12
I.5.3.5 - Approche basée sur la minimisation du volume de pâte .....	13
I.5.3.6 - Approche basée sur l'optimisation du squelette granulaire .....	16
I.5.3.7 - Approche basée sur un plan d'expérience .....	19
I.5.4 - Exemples d'application de quelques approches .....	20
I.5.5 - Analyse de quelques approches .....	20
I.6 - Conclusion du chapitre .....	22
<b>CHAPITRE II : Le retrait et la fissuration des bétons - Revue bibliographique -</b>	
II.1 - Introduction .....	23
II.2 - Approches découplées de la fissuration à l'état frais .....	23
II.2.1 - Une définition du retrait plastique .....	23
II.2.2 - Mécanismes à l'origine du retrait plastique .....	24

II.2.2.1 - Le tassement .....	24
II.2.2.2 - Le retrait de séchage .....	24
II.2.2.3 - Le retrait endogène .....	29
II.2.2.4 - Paramètres affectant le retrait plastique .....	30
II.2.3 - Mesures du retrait plastique .....	30
II.2.3.1 - Mesure linéaire .....	31
II.2.3.2 - Mesure volumique .....	31
II.2.4 - Lien entre retrait plastique et fissuration .....	31
II.3 - Approches couplées de la fissuration à l'état frais .....	33
II.4 - Influence de la formulation sur la fissuration à l'état frais .....	35
II.4.1 - Approches découplées .....	35
II.4.2 - Approches couplées .....	36
II.5 - Conclusion du chapitre .....	37

### **CHAPITRE III : Dispositifs expérimentaux pour l'étude du retrait plastique**

III.1 - Introduction .....	38
III.2 - Etude du retrait plastique .....	38
III.2.1 - Dispositif de mesure des déformations plastiques .....	38
III.2.2 - Mesure de l'évaporation .....	41
III.2.3 - Mesure de la pression capillaire .....	41
III.2.4 - Conditions et procédures des essais .....	42
III.2.4.1 - Essai en conditions endogènes .....	42
III.2.4.2 - Essai sans vent (ou avec un séchage modéré) .....	43
III.2.4.3 - Essai avec vent .....	43
III.3 - Etude de la fissuration à l'état frais .....	43
III.3.1 - Dispositif de fissuration pour mortier .....	43
III.3.2 - Dispositif de fissuration pour béton .....	44
III.4 - La technique du mortier du béton équivalent «MBE» .....	46
III.4.1 - But de la technique .....	46
III.4.2 - Principe de la technique .....	46
III.4.3 - Calcul des surfaces développées par les granulats .....	47
III.4.3.1 - Cas des gravillons de masses volumiques voisines .....	47
III.4.3.2 - Cas des gravillons de masses volumiques différentes .....	50
III.4.3.3 - Cas des sables du béton .....	50

III.4.4 - Calcul de la composition du mortier du béton équivalent .....	50
III.4.4.1 - Méthode de calcul .....	50
III.4.4.2 - Bilan des compositions du mortier MBE .....	52
III.4.5 - Essais réalisables sur le mortier du béton équivalent .....	52
III.4.5.1 - Essais d'évaluation du comportement rhéologique .....	53
III.4.5.1.1 - Essais d'affaissement au mini-cône .....	53
III.4.5.1.2 - Essais d'étalement au mini-cône .....	53
III.5 - Conclusion du chapitre .....	54

## **CHAPITRE IV : Étude expérimentale du retrait plastique des bétons autoplacants**

IV.1 - Introduction .....	55
IV.2 - Le béton autoplacant ; formulation et expérimentation .....	55
IV.2.1 - Identification des matériaux .....	55
IV.2.1.1 - Identification des granulats .....	55
IV.2.1.2 - Identification du ciment .....	56
IV.2.1.3 - Identification du superplastifiant .....	58
IV.2.1.4 - Identification du filler calcaire (poudre du marbre blanc) .....	58
IV.2.2 - Formulation du béton autoplacant par tâtonnement .....	59
IV.2.3 - Préparation de gâchée .....	60
IV.2.4 - Les essais effectués .....	60
IV.2.4.1 - Essais sur le béton frais .....	61
IV.2.4.1.1 - Essai au cône d'Abrams .....	61
IV.2.4.1.2 - Essai à la boîte en L .....	62
IV.2.4.1.3 - Essai de la stabilité au tamis .....	63
IV.2.4.2 - Essais sur le béton durci .....	64
IV.2.4.2.1 - Essais de compression .....	64
IV.2.4.2.2 - Essai de traction par flexion .....	64
IV.3 - Formulation du mortier de béton équivalent .....	65
IV.3.1 - Détermination de la quantité du sable nécessaire S' par la technique du mortier de béton équivalent «MBE» .....	66
IV.4 - Étude du retrait plastique du mortier de béton équivalent .....	70
IV.4.1 - Dispositif de fissuration utilisé pour la réalisation des essais .....	70
IV.4.2 - Procédure de malaxage .....	71
IV.4.3 - Conditions et procédures des essais .....	71

IV.4.3.1 - Étude du retrait plastique dans les conditions naturelles du laboratoire (Température : 15°C, Humidité : 70% et Vent : 0) .....	71
IV.4.3.1.1 - Description des essais .....	71
IV.4.3.2 - Étude du retrait plastique dans le cas du séchage à température élevée .....	72
IV.4.3.2.1 - Description des essais .....	72
IV.4.3.3 - Étude du retrait plastique dans le cas du séchage à température élevée suivi du vent chaud .....	72
IV.4.3.3.1 - Description des essais .....	72

## **CHAPITRE V : Résultats et interprétations**

V.1 - Résultats .....	74
V.1.1 - Résultats d'essais sur granulats .....	74
V.1.2 - Résultat de formulation du béton autoplaçant .....	77
V.1.3 - Résultats d'essais sur le béton frais .....	78
V.1.3.1 - Essai au cône d'Abrams .....	78
V.1.3.2 - Essai à la boîte en L .....	78
V.1.3.3 - Essai de la stabilité au tamis .....	78
V.1.4 - Résultats d'essais sur le béton durci .....	79
V.1.4.1 - Essais de compression .....	79
V.1.4.2 - Essais de traction par flexion .....	79
V.1.5 - Résultats d'application de la technique du mortier de béton équivalent «MBE» ....	80
V.1.5.1 - Les surfaces développées par les gravillons .....	80
V.1.5.2 - Les surfaces développées par les grains du sable .....	82
V.1.5.3 - La quantité de sable nécessaire (S') dans le mortier .....	85
V.1.6 - Composition du mortier de béton équivalent «MBE» .....	85
V.1.6.1 - Composition du mortier occupant le dispositif .....	85
V.1.7 - Résultats d'essais du retrait plastique du MBE .....	86
V.1.7.1 - Le retrait plastique dans les conditions naturelles du laboratoire (Température : 15°C, Humidité : 70% et Vent : 0) .....	86
V.1.7.2 - Le retrait plastique dans le cas du séchage à température élevée .....	89
V.1.7.3 - Le retrait plastique dans le cas du séchage à température élevée suivi du vent chaud .....	92
V.2 - Interprétations .....	96
V.2.1 - Interprétations des résultats d'essais du retrait plastique du MBE .....	96

V.2.1.1 - Le retrait plastique dans les conditions naturelles du laboratoire (Température : 15°C, Humidité : 70% et Vent : 0) .....	96
V.2.1.1.1 - La mise en graphe des résultats obtenus .....	96
V.2.1.1.2 - Description de graphe .....	96
V.2.1.1.3 - Interprétation et conclusion .....	97
V.2.1.2 - Le retrait plastique dans le cas du séchage à température élevée .....	99
V.2.1.2.1 - La mise en graphe des résultats obtenus .....	99
V.2.1.2.2 - Description de graphe .....	99
V.2.1.2.3 - Interprétation et conclusion .....	100
V.2.1.2.4 - Effet de la température dans le retrait plastique .....	100
V.2.1.3 - Le retrait plastique dans le cas du séchage à température élevée suivi du vent chaud .....	102
V.2.1.3.1 - La mise en graphe des résultats obtenus .....	102
V.2.1.3.2 - Description de graphe .....	102
V.2.1.3.3 - Interprétation et conclusion .....	103
V.3 - Évaluation les résultats des essais .....	104
V.3.1 - Évaluation les résultats des essais sur la formulation des bétons .....	104
V.3.2 - Évaluation les résultats des essais sur le retrait plastique des bétons autoplaçant	104
V.3 - Certaines précautions pour minimiser l'amplitude du retrait plastique .....	105
V.3.1 - L'augmentation de la quantité d'eau .....	105
V.3.2 - L'utilisation du filler calcaire .....	105
V.3.3 - formuler en limitant le dosage en superplastifiant .....	105
V.3.4 - L'ajout du produit de cure .....	106
V.4 - Conclusion du chapitre .....	107
<b>CONCLUSION GÉNÉÉRALE</b> .....	<b>108</b>

# **INTRUCTION**

## INTRODUCTION

Depuis sa création au Japon à la fin des années 1980, la technologie nouvelle des bétons autoplaçants s'est progressivement développée en Europe et s'affirme désormais comme une technique porteuse qui remplacera à terme la technique classique des bétons vibrés dans bon nombre d'applications.

À la différence des bétons à hauts performances, qui demeurent des bétons destinés aux chantiers exceptionnels, les bétons autoplaçants se démocratisent petit à petit en séduisant le monde du bâtiment. La production reste certes minime - de 1 à 4% du volume total -, mais les bétons autoplaçants ont les atouts nécessaires à la consolidation de leur développement actuel. En témoignent les gains de productivité et l'élimination des problèmes liés à la vibration, souvent évoqués à leur propos. À cela s'ajoute aussi un contexte social favorable. Les métiers du génie civil ont du mal à recruter une nouvelle génération, indispensable au remplacement d'une main d'œuvre vieillissante. Les bétons autoplaçants figurent parmi les progrès techniques qui rendent plus attractifs ces métiers, par ce qu'améliorant les conditions sur chantier. Plus globalement, les bétons autoplaçants ont une place à prendre dans le souci, voire l'obligation légale, de l'industrie de respecter l'environnement.

Même en absence de chargement extérieur, le volume d'un élément en béton diminue au cours du temps. Cette contraction, plus connue sous le nom de retrait, a notamment pour causes le séchage et l'hydratation du ciment. Dans une structure, le volume du béton ne peut pas changer librement. En conséquence, lorsque son retrait est gêné, le béton est soumis à des efforts de traction, qui le place dans une situation de fissuration potentielle. Le béton est donc un matériau qui a une tendance naturelle à la fissuration.

Les bétons autoplaçants sont formulés différemment des bétons ordinaires : ils contiennent moins de gravillons, plus d'éléments fins et de fluidifiants. C'est bien sûr ce qui leur donne un caractère autocompactant. Mais il est probable aussi que cela entraîne un comportement mécanique différent par rapport aux bétons ordinaires.

L'amplitude du retrait plastique des bétons autoplaçants est largement supérieure à celle des bétons ordinaires, donc, l'objectif de ce mémoire est de tenter à mieux comprendre les mécanismes du retrait plastique des bétons autoplaçants, et à prévoir certaines modifications pour limiter ce potentiel.

Cette étude est constituée de cinq principaux chapitres :

- Ø **Premier chapitre** Il n'existe pas encore de méthode de formulation généralisée des bétons autoplaçants. Dans ce chapitre, nous montrons qu'aujourd'hui l'approche de la formulation est, dans la pratique, principalement empirique. Des méthodes scientifiques ont pourtant été publiées.
- Ø **Deuxième chapitre** La revue bibliographique montre que le retrait, et donc le risque de fissuration qui l'accompagne, commence dès la mise en place du béton. Les connaissances en la matière sur les bétons autoplaçants sont quasiment inexistantes.
- Ø **Troisième chapitre** Pour étudier les déformations et la fissuration, des outils expérimentaux ont été mis au point.
- Ø **Quatrième chapitre** Nous cherchons à décrire le mécanisme du retrait plastique, pour cela, une étude expérimentale du retrait plastique des bétons autoplaçants a été mise au point.
- Ø **Cinquième chapitre** Des résultats expérimentaux suivis de leurs interprétations sont bien détaillés et expliquent l'amplitude énorme du retrait plastique en présence du séchage, par suite certaines procédures sont préconisées pour minimiser cette amplitude.

Une conclusion générale et des perspectives terminent notre travail.

# **CHAPITRE I**

## **Le béton autoplaçant ; Concept et formulation**

## I.1 - Introduction

Dans ce chapitre sont présentées les grandes familles de méthodes de formulation des bétons autoplaçants, des plus empiriques aux plus sophistiquées. Avant d'aborder la formulation, nous rappelons le principe du béton autoplaçant et les différents essais utilisés pour sa caractérisation à l'état frais.

## I.2 - Concept du béton autoplaçant

Par bétons autoplaçants, on désigne des bétons très fluides, homogènes et stables, mis en œuvre sans vibration (la compaction des bétons s'effectuant par le seul effet gravitaire) et conférant à la structure une qualité au moins équivalente à celle correspondante aux bétons classiques mis en œuvre par vibration (figure 1.1).

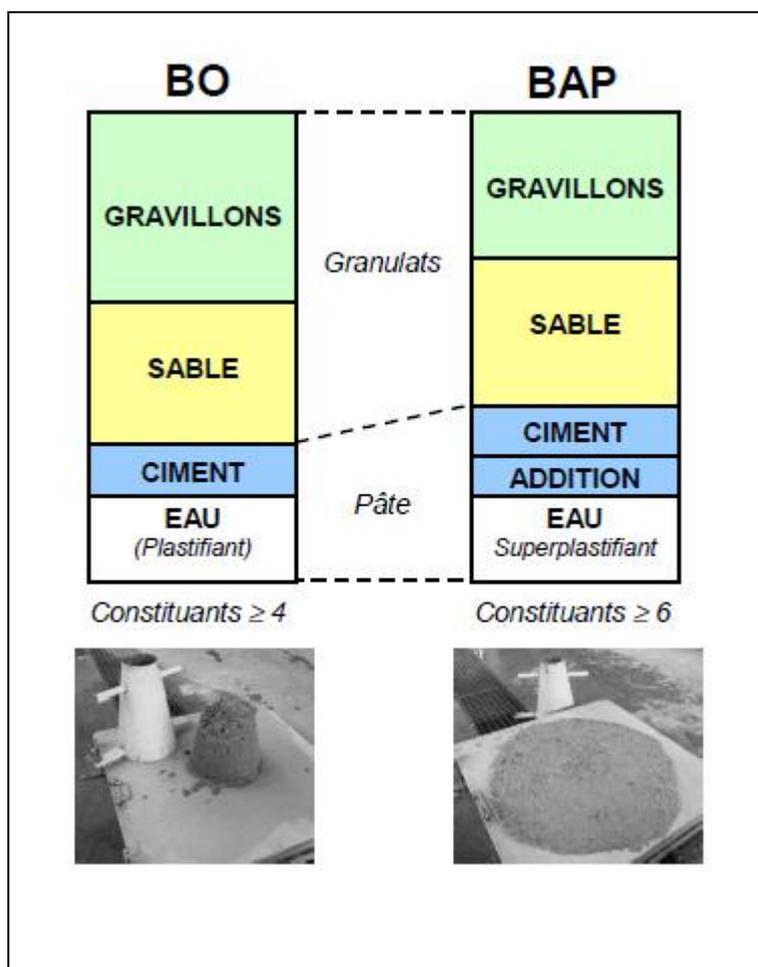


**Figure 1.1** : Aspect d'un béton autoplaçant à l'état frais.

L'utilisation de bétons très fluides, ne nécessitant pas d'apport d'énergie extérieure pour le serrage, est apparue comme une solution possible à ce problème [1]. C'est ainsi qu'est né le concept des bétons autocompactants ("self-compacting concrete", traduit par béton autoplaçant ou béton autonivellant). Outre leur facilité de mise en œuvre, de tels bétons présentent aussi l'intérêt de réduire le temps de travail sur chantier.

Les bétons autoplaçants se distinguent donc des bétons dits ordinaires, ou bétons à vibrer, par leurs propriétés à l'état frais [2] [3]. Ils sont capables de s'écouler sous leur propre poids, quel que soit le confinement du milieu, et restent homogènes au cours de l'écoulement (absence de ségrégation dynamique) et une fois en place (absence de ségrégation statique).

Pour parvenir à ce cahier des charges, les bétons autoplaçants sont formulés différemment des bétons ordinaires. Dans leur cas, la pâte, définie comme le mélange du ciment, de l'eau et d'une addition, est privilégiée au détriment des gravillons (figure 1.2). En général, les bétons autoplaçants possèdent un même dosage en ciment et en eau que les bétons ordinaires, ainsi qu'un volume de sable assez proche. C'est donc principalement l'ajout d'une addition qui sert de substitut aux gravillons. Les proportions exactes de chaque constituant dépendent bien sûr de la méthode de formulation choisie.



**Figure 1.2 :** Composition d'un béton ordinaire et d'un béton autoplaçant.

Aspect à l'état frais d'un béton ordinaire plastique et d'un béton autoplaçant.

Le rôle de la pâte est de séparer les gravillons pour limiter les contacts, en particulier dans les milieux ferrailés, et ainsi prévenir la formation de voûtes susceptibles de bloquer l'écoulement.

Le volume important d'éléments fins permet aussi de garantir le compromis entre stabilité et maniabilité. Mais il n'est pas suffisant pour atteindre la fluidité. Il est nécessaire d'ajouter aux bétons un défloculant (un défloculant est un produit chimique permettant d'éviter l'agglomération des particules solides en amas, c'est-à-dire la formation de "flocons"), sans lequel la demande en eau du mélange serait trop élevée. Le début du développement des bétons autoplaçants coïncide à l'apparition

des superplastifiants de type polycarboxylate, à fort pouvoir défloculant. Ces adjuvants ont un double effet, électrique et stérique, qui leur permet de disperser au mieux les particules.

La quantité de fines n'est pas non plus toujours suffisante pour empêcher la ségrégation. On a recours alors aux agents de viscosité. Ces adjuvants sont souvent des polymères, composés de longues molécules organiques, qui augmentent la viscosité de l'eau de gâchage. Ils assurent une meilleure stabilité du béton et le rendent moins sensible aux variations de teneur en eau des granulats, courantes en centrale à béton [4] [5]. Cela étant, en pratique leur utilisation est au contraire peu répandue, car ils entraînent un surcoût, qui s'ajoute aux surcoûts dus au superplastifiant et aux additions.

Evidemment, un béton est qualifié d'autoplaçant, non pas par rapport à sa composition, mais parce qu'il possède certaines propriétés à l'état frais. Il existe de part le monde divers essais pour caractériser l'ouvrabilité des bétons autoplaçants.

### I.3 - Caractérisation des bétons autoplaçants à l'état frais

Selon l'Association Française de Génie Civil en l'an 2000 (L'AFGC), trois essais de caractérisation ont été préconisés [2]. Avec le temps, ces recommandations sont devenues sur site les essais de référence pour valider une formule du béton autoplaçant.

#### I.3.1 - Essai d'étalement

L'essai classique au cône d'Abrams est utilisé pour mesurer un étalement (figure 1.2), dont le diamètre est proportionnel au seuil de cisaillement du béton. Il donne donc une indication sur sa capacité à s'auto-compacter en milieu non confiné.

#### I.3.2 - Essai à la boîte en L

Lors de l'essai, on remplit d'abord la partie verticale d'une boîte en forme de L (figure 1.3). Après une minute, la trappe est levée permettant l'écoulement à travers trois armatures de diamètre 14mm et distantes de 39mm. Le taux de remplissage final  $H_2/H_1$  renseigne sur la mobilité du béton en milieu confiné.

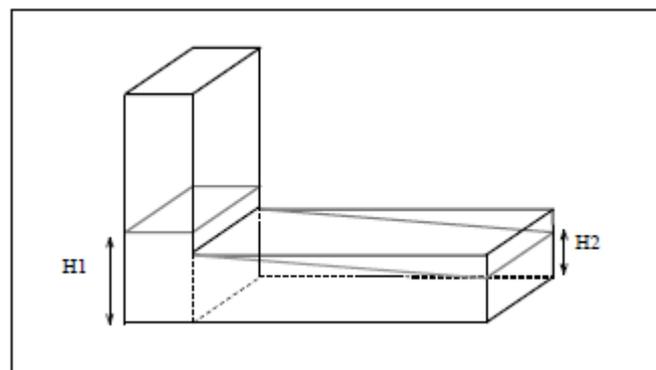


Figure 1.3 : Schéma de la boîte en L.

### I.3.3 - Essai de stabilité au tamis

À la fin du malaxage, dix litres de béton sont versés dans un seau. Après une attente de quinze minutes, une masse 4,8kg du béton est versée du seau sur un tamis de maille 5mm. Deux minutes plus tard, on pèse la quantité de pâte (laitance) ayant traversé le tamis. Un pourcentage élevé de laitance par rapport à la masse initiale est un indicateur d'une faible résistance à la ségrégation.

Le tableau 1.1 donne les valeurs préconisées pour l'obtention d'un béton autoplaçant.

<b>Étalement</b>	de 60cm à 75cm
<b>H<sub>2</sub>/H<sub>1</sub></b>	≥0,8
<b>Laitance</b>	≤15%

**Tableau 1.1 :** Valeurs préconisées pour les essais de l'AFGC.

### I.4 - Diverses appellations

L'habitude a été prise de décliner les bétons autoplaçants en deux familles d'applications. La première emploie le terme "béton autoplaçant", pour désigner les bétons destinés aux applications verticales et éléments massifs (voiles, poutres, etc...). La seconde prend l'appellation "béton autonivellant", pour désigner les bétons destinés aux applications horizontales (dalles). Dans cette catégorie, il faut ajouter les mortiers autonivellants, qui connaissent un succès important pour les chapes.

Chaque famille de béton autoplaçant est formulée suivant un même principe, mais possède néanmoins certaines particularités. La formulation des bétons auto-nivellants comporte à priori moins de contraintes que celle des bétons autoplaçants. Dans leur cas, seul l'essai d'étalement est couramment effectué. L'essai à la boîte en L n'a pas de réelle utilité, puisque les dalles sont des milieux peu confinés. Il est à noter que les bétons autonivellants doivent être peu visqueux pour avoir une grande capacité d'auto-nivellement. La mesure du temps pour obtenir l'étalement final, ou encore un étalement de 50cm (souvent noté  $t_{50}$ ), est à ce titre une donnée utile pour évaluer la viscosité. Il est regrettable que la stabilité des bétons autonivellants ne soit que rarement contrôlée avec l'essai au tamis.

Nous employons dans la suite l'appellation "béton autoplaçant", sans distinguer les applications, pour désigner tous bétons répondant au moins aux critères de l'AFGC sur l'étalement et la stabilité au tamis.

## **I.5 - La formulation des bétons autoplaçants**

Depuis son apparition, le béton autoplaçant a fait l'objet de plusieurs recherches. Des chercheurs du monde entier sont penchés sur le problème de formulation des bétons autoplaçants, et plusieurs méthodes ont été développées.

### **I.5.1 - Formuler un béton**

Formuler un béton, c'est trouver un arrangement des divers constituants répondant à un cahier des charges donné. Dans les cas courants, le cahier des charges concerne la résistance à la compression à 28 jours et la consistance, c'est-à-dire l'affaissement au cône d'Abrams. Pour des chantiers plus spécifiques, d'autres propriétés peuvent être demandées, comme, par exemple, une prise retardée, une résistance élevée au jeune âge, ou un dégagement de chaleur minimal.

Pour formuler les bétons ordinaires, la méthode la plus utilisée dans l'industrie est celle de DREUX Gorisse. Elle propose différents abaques pour estimer les dosages en eau et en ciment permettant d'obtenir la résistance et l'affaissement souhaités. Elle se distingue également par une méthode originale pour proportionner les granulats, qui consiste à caler la courbe granulométrique du mélange sables/gravillons sur une courbe de référence.

La mise au point d'une formule de béton autoplaçant est beaucoup plus complexe, parce que, d'abord, les constituants sont au nombre minimal de six, contre quatre dans le cas des bétons ordinaires. Ensuite, le cahier des charges d'un béton autoplaçant comporte plus de clauses, en particulier à l'état frais; il faut réaliser, en plus de l'essai au cône, l'essai à la boîte en L et l'essai de stabilité au tamis. Enfin, et surtout, les propriétés des bétons autoplaçants sont contradictoires; un béton riche d'une pâte fluide est très sensible à la ségrégation.

### **I.5.2 - Principes de formulation**

Les deux principales propriétés recherchées des bétons autoplaçants sont ; une fluidité importante et une grande résistance à la ségrégation. Ces deux propriétés sont à priori contradictoires pour un béton ordinaire, l'obtention de l'une entraîne la perte de l'autre.

La formulation d'un béton autoplaçant mérite une étude précise notamment dans le choix des constituants, l'optimisation de la teneur en ajout chimique et de la quantité d'eau.

Les caractéristiques des bétons autoplaçants doivent assurer :

- § La mobilité du béton en milieu non confiné (déterminée par l'essai d'étalement).
- § La mobilité du béton en milieu confiné (déterminée par l'essai à la boîte en L).
- § La stabilité, qui veut dire une bonne résistance à la ségrégation et au ressuage (déterminée par l'essai de la stabilité au tamis).

L'étape de formulation consiste à choisir une proportion optimale et bien précise des différents constituants dans le but d'obtenir les meilleures caractéristiques rhéologiques du béton.

Le facteur le plus important dans la formulation d'un béton autoplaçant est l'eau, en effet le principe de ce type de béton est de diminuer la quantité d'eau utilisée, tout en assurant une bonne maniabilité à l'état frais. La diminution de la teneur en eau conduit à des bonnes caractéristiques mécaniques tel que: une résistance plus élevée à la ségrégation, un fluage et un retrait plus faibles et une durabilité accrue.

Beaucoup de recherches ont été faites sur l'optimisation et le développement des formulations du béton autoplaçants, l'objectif principal de ces recherches est l'amélioration des performances du béton à l'état frais et durci [6].

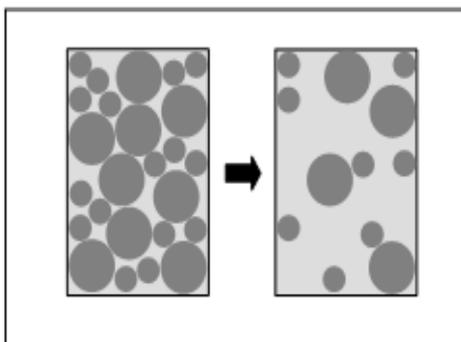
### I.5.3 - Différentes approches pour la formulation des bétons autoplaçants

Depuis l'invention du béton autoplaçant, aucune méthodologie pratique de formulation n'a été établie. Les différentes propriétés recherchées rendent la formulation du béton autoplaçant relativement compliquée. On citera donc quelques formulations rapportées de la littérature ainsi que des exemples de formulations réalisées [7].

#### a) - Approche Japonaise (méthode d'OKAMURA)

La formulation des bétons autoplaçants par l'approche japonaise développée à l'université de KOCHI se fait en privilégiant le volume de la pâte au détriment des granulats.

§ Les chercheurs japonais ont montré que le risque de blocage est minimisé si le volume des gravillons (dans  $1\text{m}^3$ ) est limité à la moitié de sa compacité (figure 1.4).



**Figure 1.4 :** Réduction du volume de gravillon à la moitié de sa compacité.

Par définition la compacité d'un mélange de grains est le rapport du volume de grains et du volume total du système grains+vides. La compacité des gravillons est en générale égale à 0,57.

§ Le volume du sable est posé à 40% du volume du mortier, lorsque les frictions granulaires sont réduites la fluidité du béton est assurée.

§ Les dosages en liant et en superplastifiant ne sont pas précisés par cette méthode, ils sont choisis sur des critères de résistance.

§ Les dosages d'eau et du superplastifiant sont déterminés en effectuant des essais sur un mortier dosé à 40% en sable [7] [8].

#### Ø Essais sur mortier

Les essais réalisés sur mortier sont : l'essai d'étalement au cône à mortier, et l'essai d'écoulement à l'entonnoir (figure 1.5).



(a) Cône à mortier



(b) Entonnoir à mortier

**Figure 1.5 :** Essais d'optimisation des dosages en eau et en superplastifiant sur mortiers.

Deux grandeurs sont alors calculées : L'étalement normalisé  $D$ , et le temps d'écoulement relatif  $T$ .

$$D = [(d^2 - d_0^2)/d_0^2] \quad \text{et} \quad T = (10/t) \quad (1.1)$$

Sachant que :

$d$  : diamètre d'étalement,

$d_0$  : diamètre inférieur du cône,

$t$  : temps d'écoulement en secondes,

$D$  : représente L'étalement, plus  $D$  est grand plus le mortier est fluide,

$T$  : représente la viscosité, plus  $T$  est faible, plus la viscosité est élevée.

Les chercheurs Japonais ont montré qu'il existe une relation entre l'étalement et l'écoulement, cette relation est linéaire lorsque le dosage en eau varie à quantité de superplastifiant constante. Il est alors possible de déterminer un couple adjuvant/eau optimal permettant de fluidifier le mortier. Pour un béton autoplaçant admis les chercheurs ont fixés  $D=5$  et  $T= 1$ .

### Ø Risque de blocage

Les chercheurs japonais ont proposés une approche de l'évaluation du risque de blocage du béton en utilisant l'essai de la boîte en L, et ont fait l'hypothèse que le phénomène était indépendant de la nature de la pâte, si elle est suffisamment fluide.

L'expression du risque de blocage  $R_b$  s'écrit :

$$R_b = (1 - V_p) \sum (Y_i / V_{cr,i}) \quad (1.2)$$

Avec:

$V_p$  : proportion volumique de la pâte dans le béton.

$Y_i$  : proportion volumique de grains de tailles  $d_i$  rapportée au volume de granulats.

$V_{cr,i}$  : fraction en volume de grain de taille  $i$  induisant un blocage.

En écrivant  $R_b=1$ , pour chaque rapport gravions/sables, on peut déduire la teneur en pâte minimale pour éviter le blocage. (Le risque de blocage a lieu si  $R_b \leq 1$ ).

### b) - Approche suédoise par PETERSSON et AL en 1996

Cette méthode est basée sur la méthode japonaise citée ci-dessus, le principe est d'intégrer l'approche de l'évaluation du risque de blocage dans le processus de formulation.

Pour chaque rapport gravillon/sable, on estime le volume de pâte critique pour le blocage, on retiendra ensuite le rapport gravillon/sable qui vérifie les propriétés rhéologiques recherchées. Les dosages des fines, de l'eau et du superplastifiant sont ajustés pour avoir une viscosité suffisante, un faible seuil de cisaillement, et une résistance souhaitée.

Cette approche permet une meilleure optimisation du squelette granulaire. Cependant, on ne peut pas appliquer le critère de blocage à n'importe quel type de granulats [9].

### c) - Approche JSCE (Japanese society of civil engineers)

Cette méthode a été proposée par «the japanese society of civil engineers en 1998», après plusieurs recherches et applications pratiques. Pour cette méthode la quantité d'eau, le rapport eau/poudre, et la teneur en poudre, varient en fonction de l'emploi ou non d'un agent de viscosité [10].

Les quantités de différents constituants sont déterminées comme suit :

### Ø Quantité de gros granulats

Cette quantité varie selon l'autocompactibilité recherchée. Elle situe entre 0,30 à 0,32 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> et la valeur du diamètre maximum est entre de 20mm à 25mm.

### Ø Quantité d'eau

Lors de l'utilisation d'un agent de viscosité, la quantité d'eau se situe sous les  $180 \text{ kg/m}^3$  dans les conditions d'exposition normales. Cas particulier, lorsque la durabilité du béton n'est pas une contrainte majeure, on peut aller jusqu'à  $190 \text{ kg/m}^3$ .

En l'absence d'agent de viscosité, la quantité d'eau est réduite de 155 jusqu'à  $175 \text{ kg/m}^3$ .

### Ø Rapport eau/poudre

Ce rapport est basé sur les performances du béton à l'état durci. Lorsque la fluidité n'est pas atteinte, on peut augmenter la quantité du liant. Le rapport massique eau/poudre doit être entre 28 et 37%.

### Ø Quantité de poudre et de liant

La quantité de poudre se déduit du rapport eau/poudre. Dans le cas d'un agent de viscosité de type polysaccharide, la quantité de poudre est de  $0,13 \text{ m}^3/\text{m}^3$ . Dans les autres cas, la valeur prise doit être entre  $0,16 \text{ m}^3/\text{m}^3$  et  $0,19 \text{ m}^3/\text{m}^3$ .

### Ø Quantité d'air

Cette valeur dépend du diamètre maximum des gros granulats, de la résistance souhaitée et des conditions d'exposition du béton. La valeur type s'élève à 4,5% d'air.

### Ø Quantité de fins agrégats

Cette quantité est déduite des quantités précédentes.

### Ø Dosage en adjuvants

Le dosage en adjuvant est évalué expérimentalement. Pour le superplastifiant, son dosage dépend du rapport eau/poudre ainsi que de la nature des poudres. Il est généralement de 1 à 2 kg d'extrait sec par  $\text{m}^3$ , pour une solution aqueuse de 35% c'est l'équivalent de 3 à 6 litres. En ce qui concerne l'agent de viscosité, son dosage varie selon sa nature, aussi selon le type de béton (avec ou sans ajouts de fines) :

§ de 0,15 à 0,30% de la quantité d'eau pour les agents cellulosesiques,

§ de 3 à 5% pour les acryliques,

§ de 2 à 3% pour les glycols,

§ 0,05% pour les polysaccharides solubles.

**d) - Approche du laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC)**

Cette approche consiste à développer un modèle mathématique à partir d'un modèle de suspension solide. Ce modèle est basé sur les interactions granulaires entre différents constituants du mélange [7].

Il permet de prévoir la compacité d'un mélange granulaire et de prendre en compte l'effet de confinement des armatures sur la compacité du béton et donc sur son ouvrabilité. La compacité du mélange est déterminée avec une précision inférieure à 1% à partir des caractéristiques des constituants suivants :

- § Les distributions granulaires,
- § les proportions du mélange,
- § la compacité propre,
- § la densité apparente.

Ce modèle est utilisé pour prévoir l'évolution de l'ouvrabilité des bétons en fonction de leur composition, il sert aussi à :

- § comprendre et évaluer l'influence des différents constituants sur les propriétés du béton.
- § choisir les matériaux qui permettent d'assurer un béton de bonnes caractéristiques, soit à l'état frais (l'ouvrabilité et la stabilité) ou à l'état durci (la résistance, le retrait et le fluage).
- § prendre en compte la spécificité et la nature d'un projet lors de la formulation du béton (béton pompé par exemple).

**Ø Exigences du cahier des charges**

La formulation d'un béton se fait à partir d'un cahier de charges, dans ce cas, les critères exigés sont les suivants :

- 1- étalement : 60 à 70cm,
- 2- viscosité plastique : supérieure à 100Pa.s pour éviter la ségrégation et inférieure à 200 Pa.s pour un coulage rapide,

Il faut aussi connaître :

- 3- la résistance à la compression souhaitée à 28 jours.

Après le choix des matériaux, il est nécessaire de déterminer les caractéristiques suivantes :

- 4- la compatibilité ciment - superplastifiant,
- 5- la compatibilité superplastifiant - agent de viscosité,
- 6- la nature des additions minérales (fumées de silices, laitiers ou fillers calcaire).

### Ø Détermination des proportions des constituants

- 7- fixer la proportion du liant à priori,
- 8- détermination du dosage en saturation du superplastifiant,
- 9- détermination du besoin en eau du mélange en présence du superplastifiant, cette valeur donne une mesure indirecte de la compacité, valeur nécessaire pour vérifier le modèle de suspension de solide,
- 10- le calcul est effectué avec un logiciel en tenant en compte du confinement,
- 11- la viscosité est fixée arbitrairement à  $5.10^4 \text{Pa.s}$  (valeur correspondante au béton autoplaçant selon les expériences du LCPC),
- 12- la teneur en eau est réduite en conséquence et la teneur en fillers est maintenue constante,
- 13- le rapport ; gravillon/pâte liante est optimisé,
- 14- le béton est élaboré en petites quantités 10 à 15 litres et sa teneur en eau est ajustée pour améliorer la résistance,
- 15- le dosage en superplastifiant est aussi ajusté pour obtenir l'étalement souhaité, ceci n'affecte pas la viscosité plastique. À ce stade le béton vérifie les propriétés rhéologiques imposées par le cahier des charges à savoir la contrainte de cisaillement et la viscosité plastique.
- 16- l'évolution du comportement rhéologique doit être étudiée, l'ajout d'un ajout chimique peut s'avérer nécessaire.

Pour vérifier la validité d'une formulation, celle-ci doit être confrontée à des expérimentations en vraie grandeur pour appréhender les problèmes de ségrégation.

### e) - Approche basée sur la minimisation du volume de pâte

Dans cette méthode le béton est considéré comme un matériau biphasique, une phase solide constitué par les granulats et une phase liquide qui est la pâte (eau, liant, adjuvant) [7].

Les chercheurs supposent que la pâte joue deux rôles principaux dans un béton autoplaçant :

D'une part, elle assure la fluidité du mélange, ce qui limite les frottements entre les granulats, d'autre part elle écarte les gravions pour éviter le phénomène de blocage.

Pour assurer ces deux rôles, les chercheurs jugent qu'il doit exister un volume minimum de pâte, ils proposent alors les deux critères suivants :

#### Ø Critère de fluidité

Le volume de pâte nécessaire pour fluidifier  $1\text{m}^3$  de béton peut être déterminé en fonction de la porosité du mélange, et de la granulométrie des granulats utilisés.

La formule s'écrit :

$$V_{\min} = 1 - (1 - V_{\text{vide}}) / C_e$$

Avec :

$V_{\text{vide}}$  : la porosité ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ ) mélange de sable+gravillon, mesurée selon la norme américaine,

$C_e$  : coefficient d'écartement.

Le coefficient  $C_e$  est calculé comme suit :

$$C_e = ((e_{\text{min}}/D_{\text{moy}}) + 1)^3 \quad (1.3)$$

Avec :

$D_{\text{moy}} = \sum(m_i \times d_i) / \sum m_i$ , le diamètre moyen des granulats et :

$d_i$  : le diamètre du tamis  $i$  (mm),

$m_i$  : masse de granulats sur le tamis  $i$  (kg),

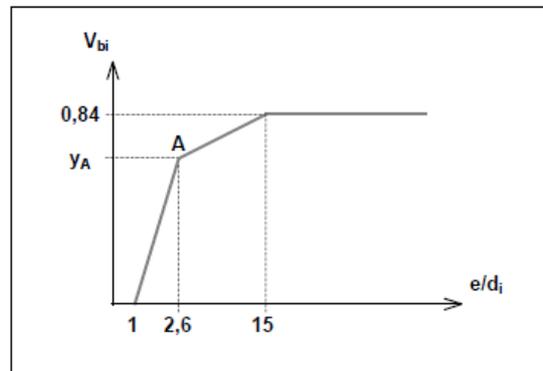
$e_{\text{min}}$  : est la distance moyenne entre les granulats pour fluidifier le béton (mm).

Lorsque  $C_e$  est égal à 1,  $V_{\text{min}}$  est égale à  $V_{\text{vide}}$ ; le volume de pâte remplit la porosité des granulats, dans le cas où  $C_e > 1$ , non seulement le volume de pâte comble la porosité mais il sert aussi à écarter les granulats.

La détermination de la valeur  $e_{\text{min}}$  se fait de façon expérimentale, il s'agit de confectionner des bétons en faisant varier le volume de la pâte (en le diminuant), et de mesurer l'étalement du béton. Lorsque l'étalement est inférieur à 65cm, le volume de pâte correspondant est considéré comme étant le volume minimal de pâte à prendre. En faisant varier le rapport (eau/fines), et pour différents paramètres maximaux du gravillon, on obtient des courbes donnant  $e_{\text{min}}$  en fonction  $D_{\text{moy}}$ . Les chercheurs ont choisi de faire varier que trois paramètres : le rapport ; eau/fines, diamètre maximal du gravillon et  $D_{\text{moy}}$ . Ce choix est justifié pour simplifier le modèle.

#### Ø Critère de non blocage

Il s'agit dans cette partie de modéliser  $V_{\text{bi}}$  qui est le volume limite de granulats de taille  $d_i$ , au delà duquel le béton ne s'écoule plus dans un milieu confiné. La modélisation de  $V_{\text{bi}}$  est faite en fonction du rapport de l'espacement  $e$  des armatures et du diamètre  $d_i$ . La figure (figure 1.6) suivante représente la variation du volume limite de blocage d'un sable en fonction du rapport  $e/d_i$ .



**Figure 1.6 :** Volume limite de blocage  $V_{bi}$  en fonction du rapport de l'espacement des armatures  $e$  et le diamètre  $d_i$  du granulats.

On remarque que le volume critique d'un sable quelconque ( $e/d_i > 15$ ) est de  $840 \text{ (l/m}^3\text{)}$ , si le béton est fluide. L'ordonnée du point A est déterminée expérimentalement pour les gravillons utilisés dans le béton à formuler, donc pour tracer la courbe du volume critique, plusieurs essais doivent être effectués.

Pour simplifier la méthode, on utilise les formules adoptées par les chercheurs, où le risque de blocage s'écrit en fonction du rapport du volume  $V_i$  de granulats  $d_i$  et de son volume limite  $V_{bi}$  :

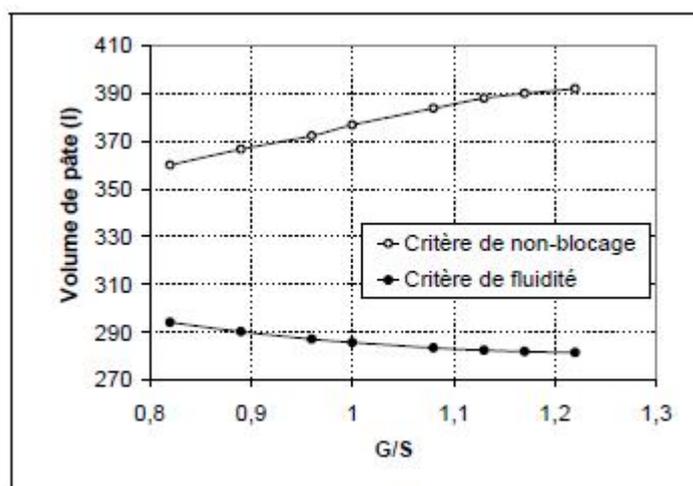
$$R = \sum (V_i / V_{bi}) \quad (1.4)$$

De cette expression est déduit le volume de pâte pour  $1 \text{ m}^3$ , en posant  $R=1$ .

$V_{bmin}$  dépend des paramètres suivants :

- 1- masse volumique du sable,
- 2- masse volumique du gravillon,
- 3- rapport entre la masse du gravillon et la masse totale de granulats,
- 4- proportion de gravillon de diamètre  $d_i$ ,
- 5- proportion de sable de diamètre  $d_i$ .

Pour différents rapports gravillon/sable croissant, on remarque que contrairement au critère de fluidité qui donne un volume de pâte décroissant, le critère de non blocage donne une fonction croissante du volume de la pâte (figure 1.7). Ces critères concernent la formule du béton autoplaçant 0/10, c'est-à-dire le béton qui contient un gravier dont son diamètre maximum est de 10mm.



**Figure 1.7 :** Volumes de pâtes respectant le critère de non-blocage et le critère de fluidité en fonction du rapport gravillon/sable pour la formule 0/10.

Le choix du rapport ; gravillon/sable peut se faire de manière arbitraire, en posant  $G/S=1$ , ou alors par mesure d'économie, on peut diminuer ce rapport au maximum pour limiter la quantité du liant.

Il faut noter aussi qu'un fort dosage en sable entraîne plus d'air. Le mélange sable et gravillon est choisi de façon à avoir une porosité minimale, cette optimisation se fait avec le logiciel : RENÉ – LCPC (tableau 1.2).

Répartition massique	Béton autoplaçant (0/10)
Gravillon 10/14 (%)	0
Gravillon 6/10 (%)	53
Sable (%)	47
G/S	1,13

**Tableau 1.2 :** Optimisation de l'empilement gravillon/sable à l'aide du logiciel RENÉ -LCPC.

Pour le rapport E/C, il est normalement imposé par le critère de fluidité, sinon il est fixé et l'étalement du béton est ajusté par le dosage du superplastifiant.

#### f) - Approche basée sur l'optimisation du squelette granulaire

Sachant que la résistance à la compression augmente avec la compacité de la pâte et que l'ouvrabilité est tributaire de l'arrangement du squelette granulaire. La formulation des bétons est basée sur l'optimisation de la porosité du système, en prenant en considération tous les grains solides, du ciment aux gravillons.

Si la phase interstitielle est l'eau de gâchage, et non plus la pâte. Plus la quantité d'eau qui écarte les grains est importante, plus la suspension est fluide. À quantité d'eau constante, si on minimise la porosité de l'empilement de grains, on optimise en conséquence le volume d'eau disponible pour fluidifier le mélange.

Cet exemple simple montre donc le lien entre compacité et rhéologie.

Les chercheurs SEDRAN et DE LARRARD ont développé un modèle décrivant mathématiquement un empilement, à partir des caractéristiques des grains qui le composent (forme, granulométrie). Le modèle permet le calcul de la compacité du béton et d'un indice représentatif de son degré de serrage.

En effet, de nombreuses études consacrées aux suspensions de grains solides montrent qu'il existe une relation directe entre la viscosité du mélange et le rapport entre concentration solide  $\Phi$  et la compacité de l'assemblage sec des grains.

À l'aide de ces variables, les chercheurs du LCPC ont essayé de modéliser le comportement rhéologique du béton (viscosité et seuil de cisaillement), en proposant un cahier des charges spécifique pour les bétons autoplaçants, avec des indices pour estimer la capacité de remplissage et la stabilité du béton.

Le modèle de calcul proposé (modèle d'empilement compressible) fait intervenir les deux notions suivantes : la compacité virtuelle et l'indice de serrage [7] [11].

### Ø La compacité virtuelle $\gamma$

Elle correspond à la compacité maximale que pourrait atteindre l'empilement des grains, si tous les grains étaient rangés de manière optimale.

Elle est en fonction de :

$y_i$  : proportion volumique des différents grains  $d_i$ ,

$\beta_i$  : compacité virtuelle des grains  $d_i$ ,

$a_i, b_{i,j}$  : sont des coefficients déterminés servant à modéliser les effets de desserrement et les effets de parois d'une classe sur une autre.

### Ø L'indice de serrage $K'$

En réalité un empilement ne peut pas atteindre sa compacité virtuelle, l'indice de serrage est représentatif du degré de compaction, il est défini comme étant la somme des indices de serrage  $K'_i$  de chaque classe granulaire  $d_i$ .

Pour un indice de serrage  $K'$  infini, la compacité réelle  $\Phi$  du mélange de grains est égale à la compacité virtuelle  $\gamma$  ; on montre en outre que  $\gamma$  est égale à la borne inférieure des  $\gamma_i$ .

Pour un béton, la porosité du squelette granulaire ( $1-\Phi$ ) est égale aux volumes d'eau et d'air pour  $1\text{m}^3$ . L'indice de serrage représente alors l'énergie qu'il faut fournir au béton pour atteindre la compacité  $\Phi$ .

Les chercheurs du LCPC ont développé un rhéomètre à béton qui a servi à montrer que le comportement rhéologique des bétons peut être approché par le modèle Binghamien [12].

Numériquement, ce modèle permet aussi de décrire correctement l'écoulement du béton [13].

La contrainte de cisaillement est alors une fonction linéaire de la vitesse de déformation :

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad (1.5)$$

Où  $\tau_0$  et  $\mu$  sont respectivement ; le seuil de cisaillement et la viscosité du béton.

Il a été montré que le comportement à l'état frais du béton dépend de l'arrangement de son squelette granulaire et que la viscosité n'est pas en fonction du dosage en superplastifiant.

La pratique montre que pour diminuer la viscosité du béton il faut augmenter la quantité d'eau (ou diminuer la concentration solide) ou doser le squelette granulaire de telle sorte qu'il soit le plus compact possible à l'état sec.

Une modélisation du seuil de cisaillement a été adoptée à l'aide des indices de serrage  $K_i$  des différentes classes granulaires.  $K_c$ ,  $K_f$ ,  $K_s$ ,  $K_S$ ,  $K_g$ ,  $K_G$  sont respectivement les indices de serrage du ciment, du filler, des éléments inférieurs à  $80\mu\text{m}$  du sable, des éléments supérieurs à  $80\mu\text{m}$  du sable, du petit gravillon, du gros gravillon.

$$T_0 = \exp(a_0 + a_c K_c + a_f K_f + a_s K_s + a_S K_S + a_g K_g + a_G K_G) \quad (1.6)$$

L'indice de serrage  $K_i$  représente la contribution de la classe  $i$  au seuil de cisaillement global. En effet, plus l'indice de serrage  $K_i$  est élevé, plus les grains de diamètre  $d_i$  sont proches les uns des autres, donc les frottements entre ces grains sont grands. Dans l'expression précédente, les indices de serrage partiels sont affectés d'un coefficient  $a_i$  qui est en fonction décroissante du diamètre moyen des grains. On traduit ainsi le fait que les frictions entre grains augmentent quand le diamètre moyen diminue, à volume de solide constant. Les coefficients affectés aux éléments fins sont de plus calculés en fonction du dosage en superplastifiant  $S_p$  et de son dosage à saturation  $S_p^*$  :

$$a_p = [a_{p0} + a_{p1}(S_p/S_p^*)] \quad (1.7)$$

Il reste qu'un béton autoplaçant n'est pas qu'un béton fluide, mais aussi un béton stable, capable de remplir un coffrage ferrailé. La modélisation de la rhéologie n'est donc pas suffisante pour formuler complètement un béton autoplaçant.

Intuitivement, il est concevable que les autres propriétés, stabilité et mobilité en milieu confiné, dépendent également des indices de serrage des grains. La ségrégation des gravillons doit notamment être contrôlée par le serrage des fines, décrit par l'indice  $K_p$ ' ; le risque de blocage de l'écoulement doit augmenter quant-à-lui avec la concentration en gros gravillons, fonction de l'indice  $K_G$ '. Après vérification expérimentale de ces hypothèses, les auteurs proposent de modéliser la stabilité et la capacité de remplissage d'un béton autoplaçant par des valeurs limites sur les indices  $K_p$ ' et  $K_G$ '.

Ces modèles rhéologiques sont compilés dans un logiciel de formulation des bétons (Bétonlab-Pro2). À partir des caractéristiques des constituants, le logiciel simule la plupart des propriétés du béton formulé (par exemple, les résistances à diverses échéances, le module élastique et l'amplitude des déformations différées). Le logiciel est également pourvu d'un module d'optimisation, qui calcule à partir d'un cahier des charges précis la formule de béton, optimale suivant un critère donné. Le tableau 1.3 donne le cahier des charges minimal à rentrer pour un béton autoplaçant.

Propriétés	Cahier des charges	Béton autoplaçant 0/10
$\tau_0$ (Pa)	$\leq 500$	371
$\mu$ (Pa.s)	$\leq 300$	339
$K_p$ '	$\geq 3,3$	3,4
$K_G$ '	$\leq 1,4$	1,3

**Tableau 1.3 :** Comparaison du cahier des charges d'un béton autoplaçant et de simulation des propriétés rhéologiques d'une formule 0/10.

### g) - Approche basée sur un plan d'expérience

Le principe de cette méthode est l'utilisation d'un plan d'expérience pour connaître l'effet des paramètres de composition du béton. KHAYAT et AL ont réalisé une telle étude avec les facteurs suivants : le volume de gravillons, la masse de fines (ciment+adition), le rapport massique eau sur fines, la masse de superplastifiant et la masse d'agent de viscosité.

Chaque facteur est varié sur une plage comportant cinq points, ce qui élève le nombre de compositions effectuées à 25. Au final, les auteurs fournissent les modèles obtenus, notamment l'étalement et le taux de remplissage, en fonction des différents facteurs. Ces modèles ne sont exploitables que pour les constituants utilisés dans l'étude. Plus qu'une méthode de formulation, cette approche fournit sur tout un support pour corriger une formule ne répondant pas, par exemple, aux critères de l'Association Française de Génie Civil.

### I.5.4 - Exemples d'application de quelques approches

Les tableaux ; 1.4 et 1.5 présentent respectivement ; composition obtenue avec différentes approches et résultats des essais de caractérisation [7].

Constituants (kg/m <sup>3</sup> )	Approche Japonaise	Approche basée sur la minimisation du volume de pâte	Approche basée sur l'optimisation du squelette granulaire
Gravier : 6/10	873	917	808
Sable	704	813	810
Ciment	400	350	350
Filler calcaire	330	210	275
Eau efficace	170	170	170
Superplastifiant	7,4	5,7	6,1
Volume de pâte (l)	424	363	388
Gravier/sable	1,24	1,13	1
Eau/ciment+filler	0,23	0,31	0,28

**Tableau 4.1 :** Exemple de formulations d'un béton autoplaçant 0/10.

Caractérisation rhéologique	Approche Japonaise	Approche basée sur la minimisation du volume de pâte	Approche basée sur l'optimisation du squelette granulaire
Etallement (cm)	75	68,5	72
H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub>	0,82	0,3	0,8
Laitance (%)	13,8	12	2

**Tableau 1.5 :** Résultats des essais de caractérisation d'un béton autoplaçant 0/10.

### I.5.5 - Analyse de quelques approches

#### a) - Analyse de l'approche Japonaise

Cette méthode présente un inconvénient du point de vue économique, car le prix de revient de telles formulations est supérieur de 10 à 20% par rapport à celui des bétons autoplaçant utilisés actuellement. Cependant, du point de vue calcul de la proportion des granulats, cette méthode est proche des méthodes utilisées actuellement. La masse de gravillon est fixée en prenant un volume égal à la moitié de la compacité. La compacité des gravillons est déterminée par piquage des gravillons secs dans un cylindre. De plus cette méthode permet de déterminer le dosage en eau et en superplastifiant par des

essais sur mortier. La méthode japonaise donne un béton visqueux vu la quantité de pâte importante calculée pour cette méthode.

#### **b) - Analyse de l'approche basée sur la minimisation du volume de pâte**

Les essais de caractérisation effectués sur les compositions calculés par cette méthode n'ont pas été validés. Les lois utilisées pour cette formulation sont issues de la littérature et concernent certains granulats, il faudrait donc déterminer des différents coefficients des gravillons utilisés pour la formulation. Cette méthode est basée sur la détermination de la quantité de pâte optimale a abouti à des résultats de fluidité satisfaisant >65cm, ces essais ont permis de montrer la corrélation entre le volume de pâte et le résultat d'étalement.

#### **c) - Analyse de l'approche basée sur l'optimisation du squelette granulaire**

Les résultats donnés par le logiciel Bétonlab2 sont satisfaisants par rapport aux deux méthodes précédentes, mais rien ne garantie que ceux sont les formulations optimales .la masse des fines trouvées par le calcul est assez importante (plus de 360kg/m<sup>3</sup>).

La précision des calculs effectués dépend de la justesse des mesures des propriétés des constituants. Même si la mesure de la compacité est reconnue comme fiable, la détermination du dosage optimal du super plastifiant n'est pas assurée.

Cette méthode a permis de prouver la bonne concordance entre le seuil de cisaillement et l'étalement, aussi entre l'indice de non blocage et l'essai de la boîte en L. Cependant aucune corrélation n'a été prouvée entre l'indice de ségrégation et le pourcentage de laitance récoltée lors des essais de la stabilité au tamis.

Par exemple pour l'approche japonaise l'indice de ségrégation est grand, donc elle devrait être la plus stable, mais il s'avère qu'elle présente le plus grand pourcentage de laitance, ce qui est contradictoire. On peut néanmoins s'interroger sur la pertinence de l'essai de stabilité pour des formulations contenant plus de 400 litres de pâte.

## I.6 - Conclusion du chapitre

Après avoir présenté les différentes méthodes de formulation et d'après les résultats d'essais effectués issus de la littérature ont permis de dresser les conclusions suivantes :

- Ü la première étape dans une formulation est la caractérisation des matériaux utilisés, et leur interaction.
- Ü Sachant que d'une part la compacité d'un gravillon est fonction de sa forme : un gravillon anguleux ou plat à une compacité plus faible qu'un gravillon arrondi, et d'autre part que la fluidité et le risque de blocage du béton dépendent de la forme des gravillons, il est donc judicieux de doser le gravillon à partir de sa compacité.
- Ü la méthode japonaise a montré qu'il existe une corrélation entre le comportement des bétons autoplaçants à l'état frais et son mortier. Il est donc préférable d'effectuer des essais sur mortiers dans un laboratoire que des essais sur béton.
- Ü Pour répondre aux exigences de fluidité, caractérisées par la boîte en L, on peut jouer sur la quantité de pâte du béton. Sachant qu'une augmentation de la quantité de la pâte implique un accroissement de la fluidité.
- Ü la méthode d'optimisation du squelette granulaire a permis de montrer, que les granulats anguleux et denses nécessitent un volume plus grand de la pâte pour assurer la stabilité, leur écoulement et éviter le phénomène de blocage.
- Ü La formulation par le logiciel Bétonlab2 basé sur la caractérisation des constituants est la plus cartésienne parmi les autres formulations des bétons autoplaçants. C'est un outil pédagogique intéressant, puisqu'il permet d'appréhender l'influence de chaque constituant sur le comportement du béton, au moyen de simples simulations. Néanmoins, si une bonne corrélation a été trouvée entre l'étalement et le seuil de cisaillement calculé, cela n'a pas été le cas entre l'indice de ségrégation et les résultats des essais au tamis. La valeur limite de stabilité proposée est, d'après des essais, sévère.

# **CHAPITRE II**

## **Le retrait et la fissuration des bétons**

### **- Revue bibliographique -**

## II.1 - Introduction

À l'état frais, le béton connaît une contraction de son volume, désignée de manière générale par retrait plastique, qui est susceptible de le faire fissurer. Il existe deux familles d'approches du mécanisme de fissuration. Dans la première, le problème est découpé en considérant d'un côté la sollicitation créant la fissuration, c'est-à-dire le retrait plastique, et de l'autre la résistance à fissuration, c'est-à-dire la capacité de déformation du béton frais. Ces approches découplées se font à la fois sur le plan de la modélisation et sur le plan expérimental. Dans la seconde famille d'approches, que nous désignerons de couplées, le problème est abordé de manière plus frontale par des études expérimentales de la fissuration.

## II.2 - Approches découplées de la fissuration à l'état frais

La plupart des études découplées de la fissuration portent sur le retrait plastique [14] [15] [16] [17] [18]. Dans cette section, nous présentons d'abord les modèles et techniques expérimentales mis au point pour son étude. Nous abordons ensuite le lien entre retrait et fissuration, à travers les études de la capacité de déformation.

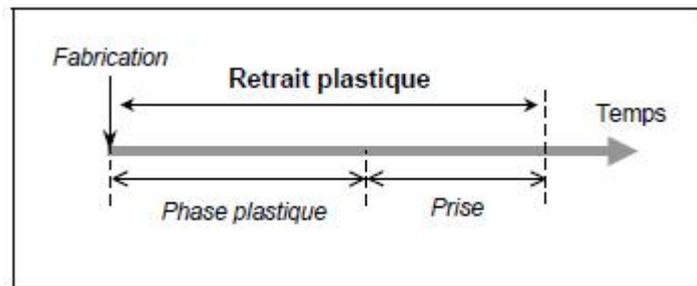
### II.2.1 - Une définition du retrait plastique

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 [18]. En effet, certaines publications sur les bétons à hautes performances font état de fissuration possible avant la fin de prise, malgré toute protection contre l'évaporation [19]. Cette fissuration est la conséquence du retrait endogène, de grande amplitude chez les bétons de rapport E/C inférieur à 0,4.

Même si les bétons autoplaçants ont en général un rapport E/C supérieur à cette valeur, et ont, a priori, un faible retrait endogène, nous désignerons ici par retrait plastique la contraction totale du béton, "somme" du retrait endogène et du retrait de séchage, pendant la phase plastique.

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.

Au final, nous choisissons de définir le retrait plastique comme la contraction totale du béton entre la fabrication du béton et la fin de prise (figure 2.1).



**Figure 2.1** : Définition du retrait plastique.

## II.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 2.2 (a)).

### Ø II.2.2.1 - Le tassement

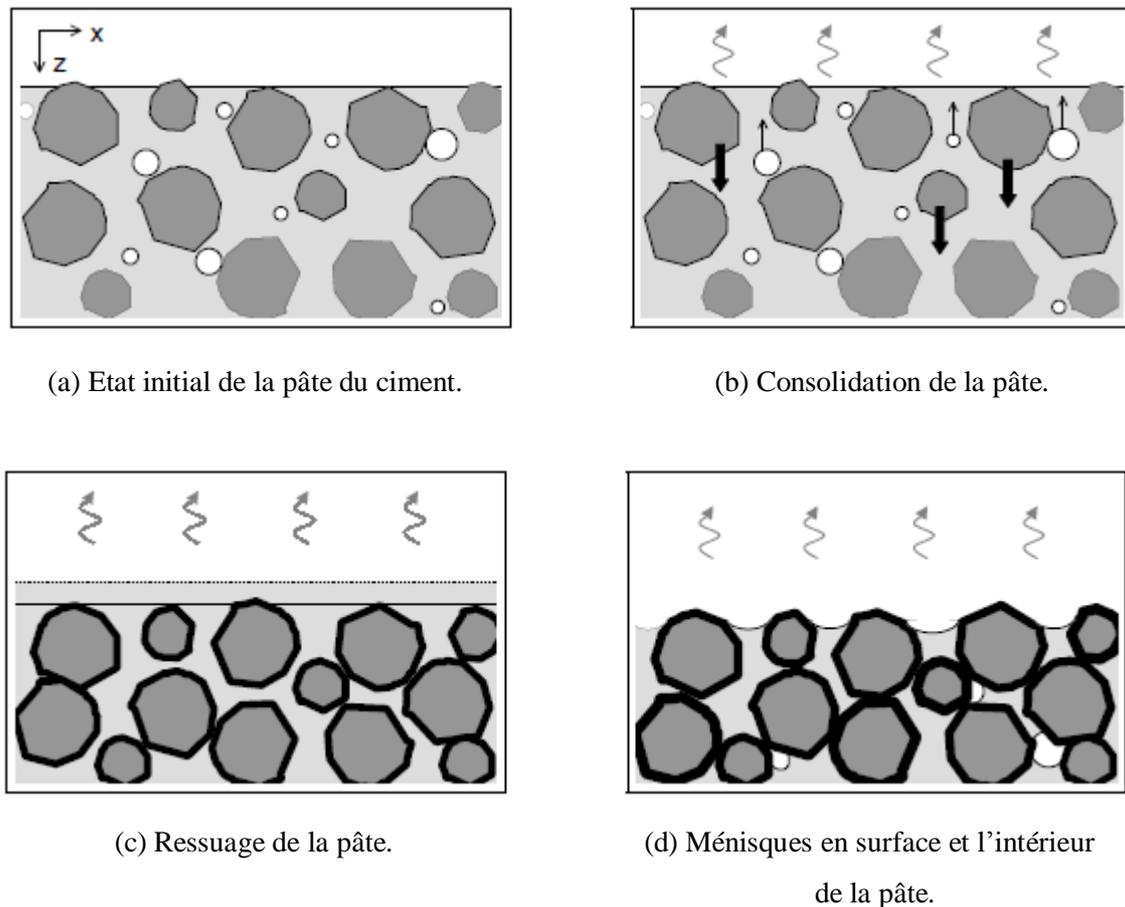
Juste après le coulage, les grains de ciment et l'air entraîné sont en suspension dans l'eau. Sous l'effet de la gravité, les particules solides sédimentent, alors que les bulles d'air remontent : la pâte se compacte (figure 2.2 (b)). Au cours de cette consolidation, l'eau est contrainte de percoler vers la surface. Il se forme alors une couche d'eau, appelée eau de ressuage, schématisée par le trait en pointillés sur la figure 2.2 (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, que nous nommons "tassement".

### Ø II.2.2.2 - Le retrait de séchage

À un instant donné, l'épaisseur de la couche d'eau ressuée dépend de la vitesse de consolidation, mais également du taux d'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 2.2 (d)).



(a) Etat initial de la pâte du ciment.

(b) Consolidation de la pâte.

(c) Ressuage de la pâte.

(d) Ménisques en surface et l'intérieur de la pâte.

**Figure 2.2 :** Schématisation des mécanismes du retrait plastique d'une pâte de ciment.

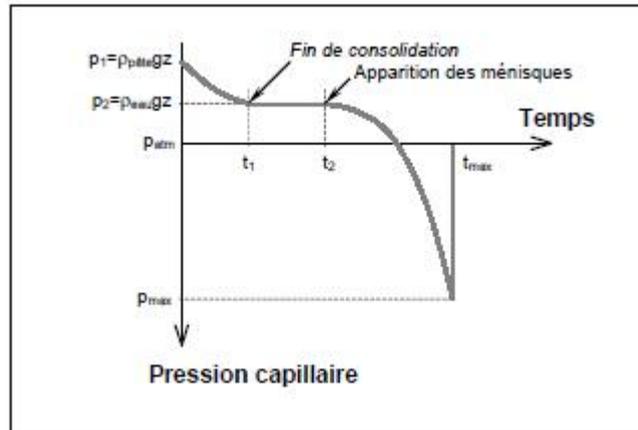
Selon la relation de Laplace (2.1), la variation de pression de l'eau, consécutive à la formation d'un ménisque, est négative. La pression capillaire  $p$  est proportionnelle à la tension de surface de l'eau  $\sigma$ , à l'angle de mouillage  $\theta$ , et au rayon du pore  $r$ .

$$p = (-2\sigma/r)\cos\theta \quad (2.1)$$

La figure 2.3 présente l'évolution théorique de la pression de l'eau, à la profondeur  $z$  dans la pâte de ciment [20]. À l'instant initial, la pression est égale à  $p_1 = \rho_{\text{pâte}}gz$ , où  $\rho_{\text{pâte}}$  est la masse volumique de la suspension. À l'âge  $t_1$ , quand la consolidation se termine, le squelette granulaire supporte son propre poids ; la pression est égale à la pression hydrostatique  $p_2 = \rho_{\text{eau}}gz$ . Durant l'intervalle  $[t_1-t_2]$ , la pâte est recouverte d'eau de ressuage. À 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  $t_{\text{max}}$  sur la figure 2.3. Cet instant correspond au moment où le capteur cesse d'être en contact avec la

phase liquide de l'eau capillaire. Il est donc probablement de penser que la pression maximale mesurée  $p_{\max}$  dépend du dispositif expérimental.



**Figure 2.3 :** Evolution théorique de la pression de l'eau dans une pâte de ciment.

Ecrivons maintenant l'équilibre des forces en présence à l'apparition des ménisques. Les notations sont les suivantes :  $\sigma'_x$  et  $\sigma'_z$  sont les contraintes s'exerçant sur le squelette solide (contraintes effectives), respectivement suivant l'axe horizontal  $x$  et l'axe vertical  $z$ . Le repère est défini sur la figure 2.2 (a). À la profondeur  $z$ , on a :

$$\sigma'_z + p = \rho g z \quad \text{et} \quad \sigma'_x + p = f(z) \quad (2.2)$$

$f(z)$  est la pression exercée par la paroi verticale du moule contenant la pâte. Si le squelette solide est supposé élastique, la déformation horizontale s'écrit comme suit :

$$\zeta_x = [(1-\nu)/E] \sigma'_x - [\nu/E] \sigma'_z \quad (2.3)$$

Lorsqu'il y a "retrait" ( $\epsilon_x$  positif), la pâte ne touche plus la paroi : la réaction  $f(z)$  s'annule. En remplaçant  $\sigma'_x$  et  $\sigma'_z$  par leur expression en fonction de  $p$  pour  $f(z)=0$ , il vient que le retrait en  $z$  se produit seulement si la condition suivante est satisfaite:

$$\zeta_x \geq 0 \Leftrightarrow p \leq p_{\text{limite}} \quad \text{avec} \quad p_{\text{limite}} = -[K/(1-K)] \rho g z \quad (2.4)$$

En géotechnique,  $K$  est le coefficient des terres au repos. Il est fonction du coefficient de Poisson. On l'estime généralement avec l'angle de frottement interne du milieu  $\varphi$ .

$$K = \nu/(1-\nu) = 1 - \sin \varphi \quad (2.5)$$

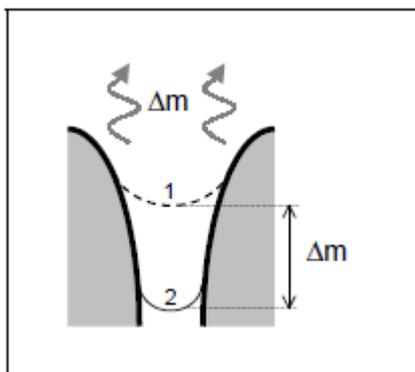
Il résulte de l'équation 2.4 deux conditions pour que la diminution de volume soit transmise horizontalement :

- La pression de l'eau est négative (ménisques à la surface),
- les interactions entre les grains solides sont suffisantes ( $\phi \rightarrow 0 \Rightarrow p_{\text{limite}} \rightarrow -\infty$ )

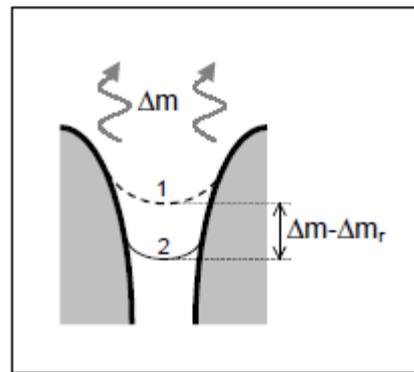
À l'état frais, une pâte de ciment est une suspension : l'eau limite les contacts entre les grains. La consolidation et l'évaporation sont les éléments qui vont permettre à l'angle de frottement d'être en jeu. Tous les paramètres affectant l'angle de frottement ont une influence sur la cinétique du retrait ; citons par exemple, la taille des grains ou l'hydratation du ciment.

RADOCEA [17] a proposé une modélisation du retrait plastique avec séchage, qui va nous permettre de mieux appréhender le lien entre pression capillaire et retrait.

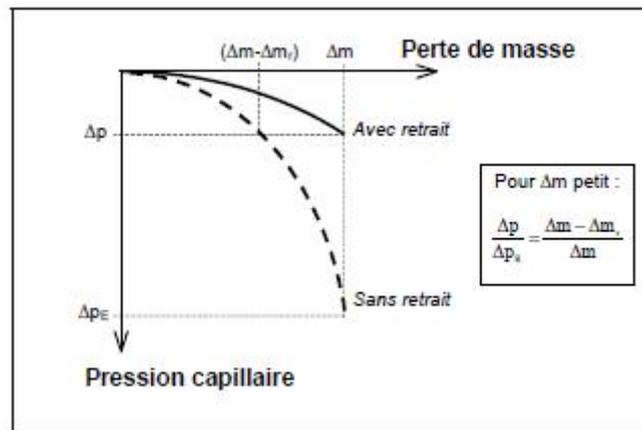
L'auteur fait l'hypothèse que les grains à la surface forment, sur une faible épaisseur, une couche consolidée, c'est-à-dire qui ne se déforme pas sous l'effet de la pression capillaire. Dans la couche consolidée, l'évaporation d'une masse  $\Delta m$  (par unité de surface) fait descendre les ménisques dans les pores. Supposons que la pâte ne se contracte pas ; un ménisque passe de la position 1 à la position 2 (figure 2.4), provoquant une diminution de pression  $\Delta p_E$ . En réalité, la pâte se contracte ; une quantité  $\Delta m_r$  remonte donc dans le pore, et le ménisque évolue comme indiqué sur la figure 2.5, provoquant une diminution de pression  $\Delta p$ .



**Figure 2.4** : Position du ménisque sans retrait.



**Figure 2.5** : Position du ménisque avec retrait.



**Figure 2.6 :** Relation entre pression capillaire et perte de masse, en fonction du retrait de la pâte sous la couche consolidée (modélisation de RADOCEA [17]).

Sur la figure 2.6, on a tracé les courbes de pression capillaire en fonction de la perte de masse pour les deux situations. Pour  $\Delta m$  petit, on obtient par construction géométrique l'équation 2.6, sur un intervalle de temps  $dt$ .

$$dm_r/dt = (dm/dt) - \Gamma (dp/dt) \quad \text{avec} \quad \Gamma = (dm/dp_E) \quad (2.6)$$

$\Gamma$  est la pente de la courbe reliant la perte de masse à la pression capillaire, pour une pâte ne se déformant pas. C'est une fonction qui dépend uniquement de la géométrie des pores, puisque l'hypothèse de couche consolidée rend le rayon des pores à la surface indépendante du retrait et donc temps.

L'équation 2.6 relie l'évaporation et la pression capillaire au volume d'eau remontant dans le pore  $dm_r/\rho_{\text{eau}}$ . Celui-ci est proportionnel à la contraction volumique de la pâte  $d\varepsilon_v$ , équation 2.7, où  $A$  est la surface de la pâte,  $V_0$  son volume initial, et  $e$  son épaisseur.

$$d\varepsilon_v = (dm_r A / \rho_{\text{eau}} V_0) = (dm_r / \rho_{\text{eau}} e) \quad (2.7)$$

Par ailleurs, RADOCEA [17] définit le module du retrait  $M_r$ , par le rapport d'un incrément de pression sur l'incrément de déformation volumique correspondant (équation 2.8). Lorsque le poids propre est négligeable devant la pression capillaire (par exemple, en considérant l'épaisseur  $e$  petite), le problème devient isotrope et  $M_r$  s'écrit en fonction du module d'Young  $E$  et du coefficient de Poisson  $\nu$ .

$$M_r = (dP/d\varepsilon_v) \quad (\text{si } \sigma_x = \sigma_y = \sigma_z, M_r = E / (3(1-2\nu))) \quad (2.8)$$

À l'aide des équations 2.6, 2.7 et 2.8, la pression capillaire s'écrit suivant l'équation 2.9. De plus, si les déformations sont supposées isotropes, nous pouvons finalement relier le retrait au taux d'évaporation (équation 2.10).

$$p(t) = \int_{0,t} [1/(\Gamma + (\rho_{\text{eau}} e/M_r))] [dm/dt] dt \quad (2.9)$$

$$\varepsilon_x(t) = (1/3)\varepsilon_v(t) = (1/3) \int_{0,t} [1/(\Gamma M_r + (\rho_{\text{eau}} e))] [dm/dt] dt \quad (2.10)$$

Nous avons montré précédemment que le retrait n'apparaît que lorsque la pression capillaire devient négative. Nous voyons à présent qu'un retrait ne signifie pas nécessairement une pression capillaire importante. En effet, la pression dépend certes du taux d'évaporation  $dm/dt$ , mais aussi de la compressibilité du squelette solide  $1/M_r$ .

### Ø II.2.2.3 - Le retrait endogène

On nomme retrait endogène la contraction volumique de la pâte de ciment sans échange d'humidité avec le milieu extérieur en conditions isothermes [21]. C'est la conséquence macroscopique du retrait chimique, contraction égale à la différence de volume entre les hydrates et les réactifs, eau et ciment.

Lorsque la pâte est une suspension, le retrait endogène est égal au retrait chimique. Sous l'effet de la gravité, il en résulte un tassement, comme évoqué ci-dessus. Expérimentalement, on observe ensuite une divergence des courbes de retrait chimique et de retrait endogène en fonction du temps, qui s'accélère nettement pendant la prise. Au cours de l'hydratation, les particules solides deviennent peu à peu solidaires. Le squelette en formation empêche par conséquent la variation de volume chimique de se faire de manière macroscopique.

En un point donné de la pâte, le volume de l'eau doit augmenter pour compenser la perte de volume due au retrait chimique. Lorsque le débit de l'eau arrivant en ce point est trop faible, la pression de l'eau diminue, jusqu'à atteindre la pression de vapeur saturante [22]. L'eau se transforme alors en vapeur et c'est le volume de gaz formé qui vient compenser le retrait chimique. Les pores deviennent donc le lieu d'interfaces liquide/vapeur (figure 2.2 (d)), qui génèrent une pression capillaire (équation 2.1). La pression de l'eau continue de diminuer avec l'hydratation: on parle d'autodessiccation [23].

La pression capillaire engendre des efforts sur le squelette solide qui le compriment. Par analogie avec le retrait de séchage, il vient que le retrait endogène se manifeste selon l'axe horizontal lorsque la pression est inférieure à  $p_{\text{limite}}$  (équation 2.4).

L'échéance à laquelle apparaît la composante horizontale du retrait se situe, à première vue, après le début de prise (déterminé de manière classique par l'essai Vicat). Une diminution importante de la pression de l'eau suppose en effet un squelette suffisamment rigide. Pour des pâtes de ciment de faible

rapport E/C (inférieur à 0,35), les mesures montrent cependant que le retrait endogène se trouve rapidement inférieur au retrait chimique, dès qu'un seuil de percolation de la phase solide apparaît [24]. Cela signifierait que l'autodessiccation, et donc le retrait horizontal, existe bien avant la prise ; cela justifierait par ailleurs la grande sensibilité des bétons à haute performance au retrait endogène. À l'opposé, pour des rapports E/C plus élevés, on considère souvent que la quantité d'eau est trop importante pour créer une autodessiccation rapide : en fin de prise, les pores sont encore saturés en eau.

#### II.2.2.4 - Paramètres affectant le retrait plastique

À la suite de cette présentation, nous pouvons lister les paramètres qui affectent la cinétique et l'amplitude du retrait plastique.

- **Le retrait chimique** : 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.
- **Le ressuage** : Le retrait de séchage n'apparaît que si le ressuage est négligeable devant l'évaporation.
- **Le taux d'évaporation** : Il existe dans la littérature des formules permettant d'estimer le taux d'évaporation en fonction des conditions extérieures [25].
- **L'angle de frottement interne** conditionne la "naissance" de la déformation horizontale.
- **La géométrie et la taille des pores** contrôlent le développement de la pression capillaire créée par un départ d'eau. RADOCEA [17] a mis au point une technique pour mesurer le paramètre  $\Gamma$  d'un empilement granulaire fin, modélisant la géométrie des pores (équation 2.6). Après remouillage, un matériau qui a séché ne se rétrécit plus; il faut alors déterminer la courbe pression/perte de masse pour trouver  $\Gamma$ . Il est à noter que  $\Gamma$  diminue avec la taille des pores.
- **Le module de retrait** relie déformation volumique et pression capillaire. Avant la prise, c'est la compressibilité du milieu granulaire. Après le début de prise, il représente la compressibilité du squelette.

#### II.2.3 - Mesures du retrait plastique

Certains des paramètres cités ci-dessus sont accessibles directement par des mesures. La mesure du retrait chimique peut se faire par pesée hydrostatique d'une fine couche de pâte en contact avec l'eau du bain [26]. Le taux d'évaporation se détermine aisément par suivi de la masse du béton qui sèche. Il existe de plus différentes méthodes de mesure du ressuage [27].

Les autres paramètres sont en revanche difficiles à déterminer expérimentalement. Par exemple, les mesures de la compressibilité d'un béton en phase plastique sont peu courantes ; la mesure du paramètre  $\Gamma$  n'a jamais été testée – ou réussie? – sur mortier ou béton.

Par conséquent, les études expérimentales du retrait plastique se concentrent sur la mesure du retrait proprement dit. Les techniques de mesure sont de deux types.

#### II.2.3.1 - Mesure linéaire

On mesure le déplacement dans la direction horizontale d'un échantillon de pâte, mortier, ou béton, placé dans un moule prismatique [28] [29] [15] [30] [31]. Lorsque sa surface est laissée à l'air libre, en ambiance contrôlée, le déplacement correspond au retrait total, résultat du séchage et de l'hydratation. Lorsque l'évaporation est empêchée, il correspond au retrait endogène, parasité par des déformations thermiques si la température du matériau ne reste pas constante en cours d'essai. Le dispositif est souvent pourvu de capteurs mesurant le déplacement vertical, ou le tassement de l'échantillon.

#### II.2.3.2 - Mesure volumique

Comme le retrait chimique, le retrait endogène peut être mesuré par pesée hydrostatique. Dans ce cas, la pâte de ciment (ou le mortier) est placée dans une membrane souple [26] [16] [32]. Depuis quelques temps, cette méthode fait l'objet de débats, car le retrait mesuré ainsi n'est pas égal au retrait mesuré avec les méthodes dites linéaires [14]. Malgré les artefacts expérimentaux suspectés, elle permet tout de même d'analyser de manière qualitative le comportement du matériau.

Les essais sur le retrait plastique sont souvent accompagnés d'autres mesures, par exemple des mesures de la pression capillaire et du temps de prise.

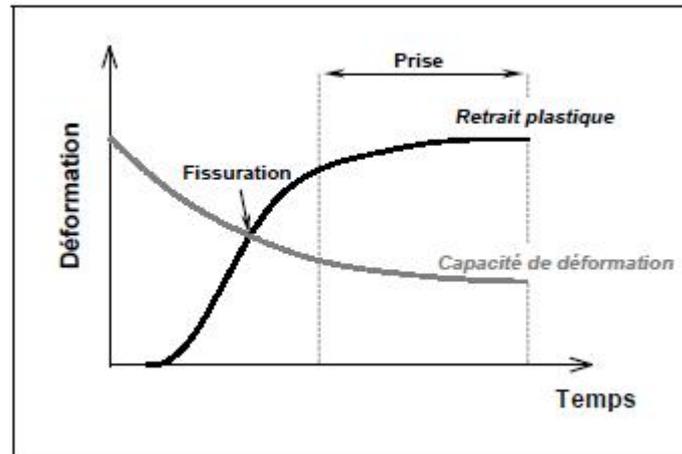
### II.2.4 - Lien entre retrait plastique et fissuration

Lorsque le retrait plastique ne peut pas se faire librement dans une structure, le béton est mis en traction et risque par conséquent de fissurer. Les fissures dues au retrait plastique sont typiquement espacées de 0,3 à 1m ; leur profondeur va de 25 à 50mm [33].

Le lien entre le retrait et la fissuration est fait dans la littérature avec la notion de capacité de déformation [34] [20]. La capacité de déformation est définie comme la déformation maximale qu'est capable de supporter le béton frais en traction. La fissuration à l'état frais est donc atteinte lorsque le retrait empêché dépasse cette limite en déformation.

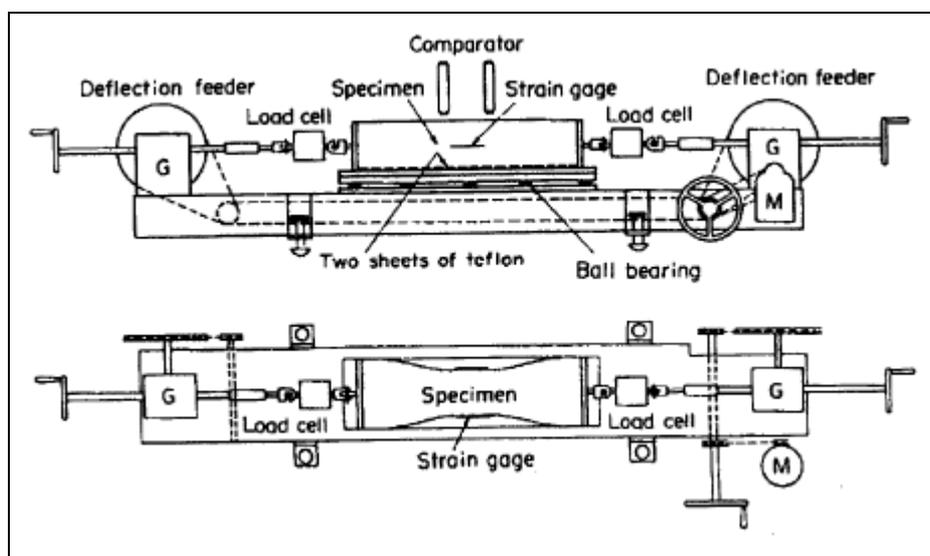
La figure 2.7 schématise le principe. La capacité de déformation du béton frais diminue jusqu'à la prise, parce que l'eau interstitielle est consommée par l'hydratation et le séchage, ou encore parce que l'effet d'un éventuel adjuvant s'amenuise dans le temps. La diminution de la capacité de déformation est d'ailleurs à mettre en parallèle de la perte d'ouvrabilité du béton [34].

Il faut souligner maintenant que les études consacrées à la capacité de déformation du béton frais sont très rares, comparées aux études sur le retrait plastique. Il y a à cela plusieurs raisons. D'abord, toute modélisation est complexe, puisque les propriétés du béton changent beaucoup au très jeune âge, et d'autant plus si l'eau s'évapore. Ensuite, du point de vue expérimental, les problèmes techniques sont nombreux [35] ; il est par exemple délicat d'exercer une traction sur un matériau plastique.



**Figure 2.7** : Schématisation de la fissuration à l'état frais, en termes de retrait et capacité de déformation (d'après [33]).

Il existe néanmoins quelques dispositifs de mesure, développés récemment [36] [37] [38]. Un exemple est donné sur la figure 2.8. En l'absence de séchage, la capacité de déformation d'un béton peut aller jusqu'à 25mm/m [35] ; lorsque le béton sèche, cette valeur est nécessairement plus faible. Un retrait plastique dépassant 1mm/m est considéré, dans nombreuses publications, comme critique vis-à-vis de la fissuration [30]. Dans le cas des bétons à hautes performances, la capacité de déformation est même beaucoup plus faible, puis qu'elle se situe dans la plage de 100 à 300 $\mu$ m/m ; le séchage est la principale cause avancée, parce qu'il provoque l'apparition d'une peau à très faible capacité de déformation à la surface du béton [38] [20].



**Figure 2.8 :** Exemple de dispositif de mesure de la capacité de déformation du béton frais [38].

### II.3 - Approches couplées de la fissuration à l'état frais

Contrairement au retrait plastique, les études couplées de la fissuration à l'état frais sont essentiellement expérimentales. Il n'y a pas dans la littérature de modélisation du phénomène. La raison en est sans doute que la complexité d'une modélisation, évoquée plus haut, est trop grande au regard de l'enjeu. La fissuration est en fait évitée simplement en protégeant du séchage la surface du béton. Il faut bien sûr que la cure (le produit de cure est un liquide blanc laiteux à base de résine en phase aqueuse) appliquée soit réellement efficace. Dans le cas des bétons à haute performance, une cure n'est pas toujours suffisante ; c'est d'ailleurs à leur arrivée que le retrait plastique a commencé à faire l'objet de recherches poussées.

Les études expérimentales s'appuient sur divers dispositifs des fissurations, dont DIAS [39] et SOROUSHIAN [40] donnent un large aperçu. Les dispositifs sont pour la plupart passifs : la fissuration est créée dans un moule grâce à des entailles ou à des réductions de largeur. Le matériau est soumis à un séchage intense, obtenu en appliquant une circulation d'air ou une température élevée à la surface du béton.

Les formes des dispositifs sont aussi variées ; il en existe quatre types :

- **Plaque :** Une pâte de ciment ou un mortier est coulé sur une faible épaisseur, et fissure sous l'effet du séchage à cause des frottements sur le fond du moule [41] [42] [43].

- **Dalle** : Le retrait du mortier ou béton est empêché par des surélévations en fond d'un moule prismatique (figure 2.9), ou des vis d'ancrage sur ses parois latérales [44] [33] [40].

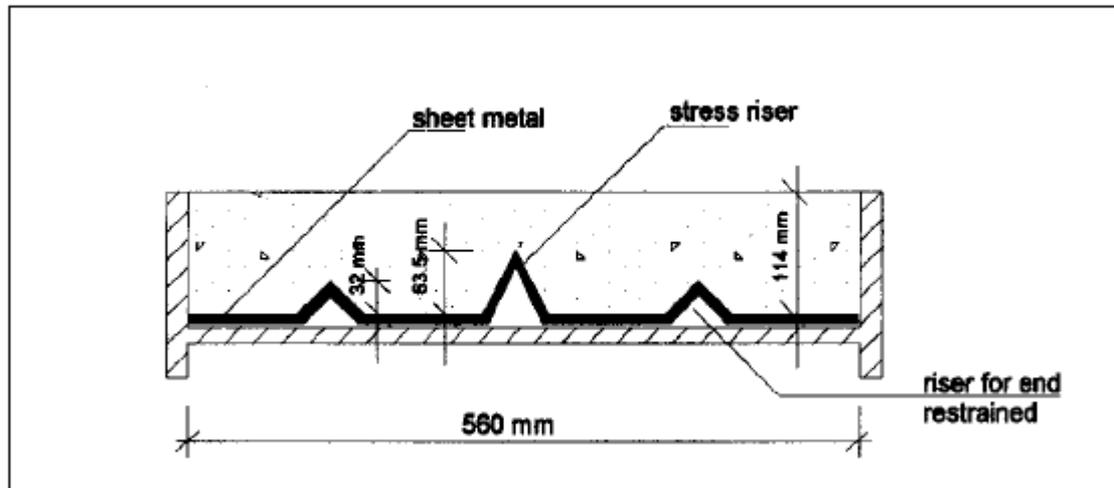


Figure 2.9 : Dalle de retrait empêché [40].

- **Anneau** : Le béton est coulé autour d'un anneau en acier (figure 2.10) ; les fissures sont initiées par des entailles placées à sa périphérie [34].

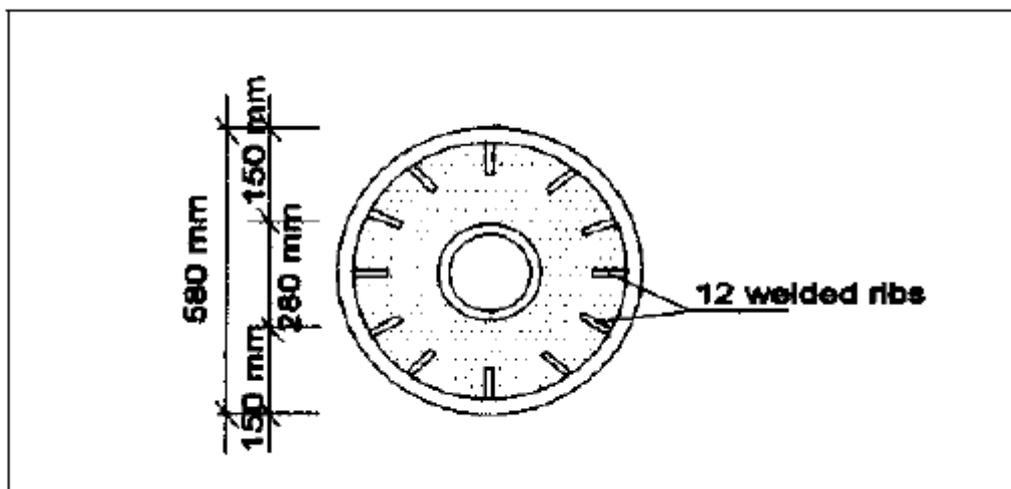


Figure 2.10 : Anneau de retrait empêché.

- **Poutre** : Le mortier ou béton est coulé dans un moule dont l'une des dimensions est privilégiée (figure 2.11). La fissuration est initiée par l'encastrement aux deux extrémités de la poutre [36] [39].

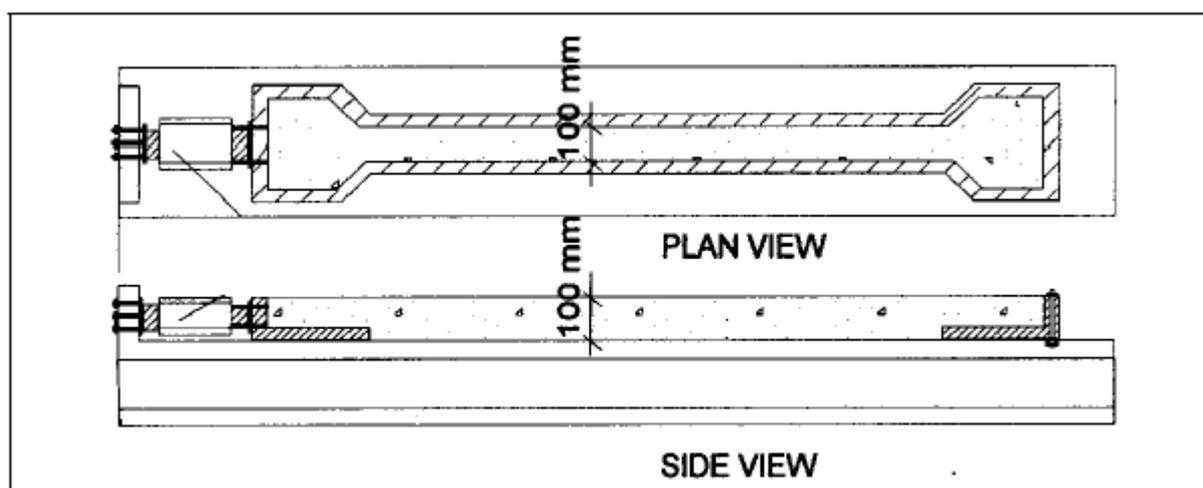


Figure 2.11 : Poutre de retrait empêché [36].

Ces essais permettent de mesurer d'une part l'âge d'apparition des fissures, d'autre part l'amplitude de la fissuration, quantifiée par la longueur ou l'aire totale des fissures.

Au cours des essais, d'autres mesures sont souvent réalisés ; c'est la plupart du temps le taux d'évaporation, ou même le ressuage. Les mesures de retrait en parallèle des essais de fissuration sont étrangement peu courantes.

L'essentiel des publications traite de la fissuration due au séchage, et non à l'hydratation. Les essais de retrait empêché en conditions endogènes utilisent des dispositifs plus sophistiqués, avec par exemple une mise en traction active du matériau [45]. Trois domaines d'études ont par ailleurs récurrents : l'étude des effets de la formulation, l'étude des effets des conditions environnemental et l'étude de l'efficacité de fibres antifissuration.

## II.4 - Influence de la formulation sur la fissuration à l'état frais

### II.4.1 - Approches découplées

Les principaux paramètres qui influent sur le retrait plastique sont les suivants [15] [30] [31] [18] :

- **Rapport de la masse d'eau et de la masse de fines (E/F) :** La taille des pores, et donc rayon des ménisques à la surface, diminuent avec le rapport E/F ; en conséquence, le retrait de séchage se trouve augmenté lorsque ce rapport diminue.
- **Rapport E/C :** Le retrait endogène est fonction décroissante du rapport E/C. L'eau des pores est consommée d'autant plus vite par l'hydratation que sa proportion est faible dans le mélange.

- **Masse de ciment ou de fines** : Pour un rapport E/F ou E/C donné, l'augmentation de masse de ciment ou de fines provoque l'augmentation du retrait plastique, parce que les efforts capillaires ont lieu au sein de la pâte.
- **Nature des fines** : Le retrait plastique augmente avec la surface spécifique. L'emploi d'un ciment fin ou d'une addition comme la fumée de silice engendre un réseau poreux très resserré et donc des pressions capillaires rapidement élevées sous l'effet du séchage ou de l'hydratation.
- **Adjuvants** : 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 formulation du béton a les mêmes effets sur le retrait endogène que sur le retrait de séchage, si ce n'est que les fines jouent, dans le cas du séchage, le rôle joué par le ciment dans le cas de l'hydratation.

Concernant la capacité de déformation, il y a peu d'études, donc peu de résultats sur l'effet de la formulation. Le rapport E/F semble tout de même être un paramètre prépondérant. Dans l'exemple des bétons à hautes performances, la capacité de déformation diminue avec le rapport E/F [46].

La capacité de déformation doit également dépendre des adjuvants modifiant le temps de prise ou la consistance [35] ; mais il y a, là encore, peu de données sur le lien entre rhéologie et capacité de déformation.

#### II.4.2 - Approches couplées

Les résultats obtenus par des approches couplées de la fissuration sont dans l'ensemble cohérentes avec les résultats sur le retrait plastique. Le phénomène de fissuration est en effet amplifié lorsque le rapport E/F ou E/C diminue, lorsque la masse de fines ou la surface spécifique augmente [44] [39] [40] [47] [43]. Les adjuvants retardateurs de prise provoquent également une augmentation de la fissuration [39] ; mais leur effet est moins flagrant que le rapport E/F, par exemple.

## II.5 - Conclusion du chapitre

La fissuration à l'état frais touche principalement les bétons utilisés dans les structures horizontales, parce qu'elles présentent une large surface d'évaporation.

D'après les données bibliographiques sur l'influence de la formulation, il est possible que les bétons autoplçants possèdent un retrait plastique important. Ils ont en effet toutes les caractéristiques pour que ce soit le cas : ils sont fortement adjuvantés, contiennent beaucoup d'éléments fins, pour un faible rapport E/F.

Il existe une étude sur le retrait plastique des bétons autoplçants qui va dans ce sens. GRAM et AL [48] trouvent que l'amplitude du retrait plastique des bétons autoplçants est largement supérieur de celui des bétons ordinaires, fabriqués avec les mêmes constituants et destinés aux mêmes ouvrages.

Le retrait plastique n'est toute fois qu'un facteur du phénomène de fissuration. La capacité de déformation est aussi une caractéristique du béton qui conditionne l'apparition de fissures. Or les bétons autoplçants se distinguent principalement des bétons ordinaires par leurs propriétés rhéologiques.

# **CHAPITRE III**

## **Dispositifs expérimentaux pour l'étude du retrait plastique**

### III.1 - Introduction

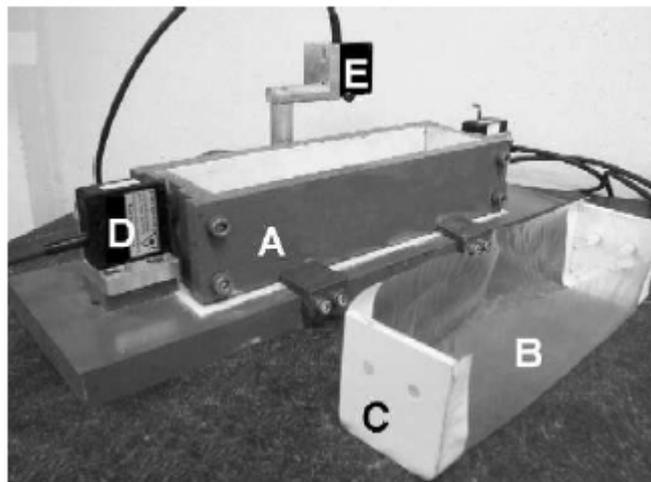
Ce chapitre a été consacré à la description d'un dispositif de mesure des déformations plastiques du béton. La difficulté de conception d'un tel appareillage réside dans le fait qu'un béton, et a fortiori un béton autoplaçant, ne possède pas ou presque de cohésion à l'état frais. Nous Présentons ici les solutions retenues.

Dans une structure, les déformations plastiques sont plus ou moins empêchées, ce qui peut mener à la fissuration. À l'état frais, la fissuration dépend non seulement du retrait, mais aussi de la capacité de déformation du béton. En l'absence de moyen pour mesurer directement cette dernière, nous avons utilisé un dispositif de fissuration similaire à celui décrit dans ce chapitre.

### III.2 - Etude du retrait plastique

#### III.2.1 - Dispositif de mesure des déformations plastiques

Le choix s'est porté sur une méthode linéaire, qui permet de déterminer à la fois l'effet du séchage et l'effet de l'hydratation sur les déformations plastiques. Les éléments du dispositif que nous avons conçu sont présentés sur la figure 3.1 [11].

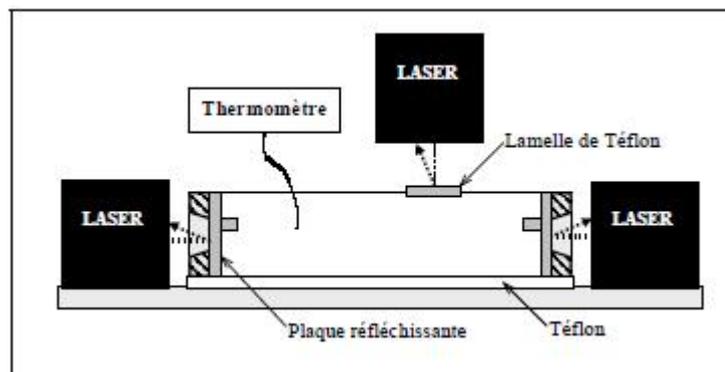


**Figure 3.1** : Dispositif de mesure des déformations plastiques : moule 7x7x28cm(A), enveloppe (B+C), capteurs laser (D et E).

- **Un moule** : Le moule prismatique en acier [A], de dimensions 7x7x28cm, repose sur une plaque recouverte de téflon. L'intérieur de ses parois est également recouvert de téflon. Les deux extrémités sont percées en leur centre d'une ouverture circulaire.
- **Une enveloppe** : à l'intérieur du moule vient se placer une enveloppe formée par une feuille de polyane [B], de dimensions 21x28cm, et deux plaques minces en PVC blanc [C], de largeur 6,8cm, de hauteur 7cm et d'épaisseur 0,5cm. Chacune d'elles est collée sur la feuille avec un

ruban adhésif double face. Coulé dans cette enveloppe, le béton n'est pas directement en contact avec le moule. Pour limiter les frottements entre téflon et polyane, l'intérieur du moule est saupoudré de talc.

- **Des capteurs laser :** Lorsque l'échantillon se rétracte, il entraîne les plaques de PVC. Deux capteurs lasers [D], dont les rayons se réfléchissent comme schématisé sur la figure 3.2, sont utilisés pour mesurer leurs déplacements. L'emploi d'un laser nous permet d'éviter tout contact entre béton frais et capteur. La précision des capteurs est de  $\pm 2\mu\text{m}$ .



**Figure 3.2 :** Schéma du dispositif de mesure des déformations plastiques.

Le retrait plastique, exprimé en  $\mu\text{m}/\text{m}$ , est déduit de la somme des déplacements des deux plaques, divisée par la longueur de l'échantillon. Il est à noter que c'est une déformation moyenne, c'est-à-dire la déformation à mi-hauteur de l'échantillon. Dans le cas d'un séchage non uniforme suivant la hauteur, le retrait est nécessairement plus important à la surface qu'au fond du moule.

Le capteur laser [E], placé au dessus de l'échantillon, permet de mesurer le déplacement d'un carré de téflon, de 1cm de côté et 1mm d'épaisseur, déposée à la surface du béton (figure 3.3). La densité du téflon est inférieure à celle du béton, mais supérieure à celle de l'eau : le carré reste à la surface du béton malgré un éventuel ressuage. Le déplacement du carré rapporté à la hauteur de l'échantillon nous donne le tassement, exprimé en  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

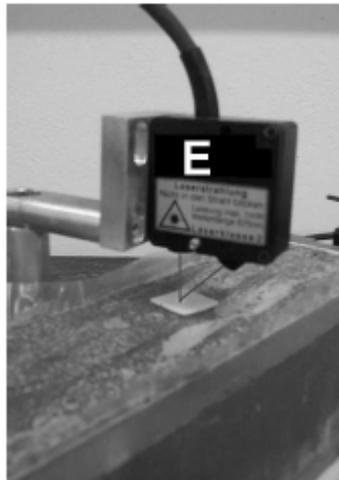


Figure 3.3 : Mesure du tassement.

Un thermocouple placé à mi-hauteur de l'échantillon est utilisé pour mesurer la température au sein du béton (figure 3.2).

La figure 3.4 montre l'allure du retrait plastique d'un béton autoplaçant, mesuré à trois reprises. Les différences observées entre les courbes s'expliquent par la sensibilité du phénomène aux conditions ambiantes ; toutes variations de température ou d'humidité relative affectent la cinétique du séchage, et par conséquent la cinétique et l'amplitude du retrait. Pour un matériau donné, trois essais sont donc réalisés pour obtenir un fuseau de courbes, de largeur  $\pm 10\%$  de la valeur moyenne.

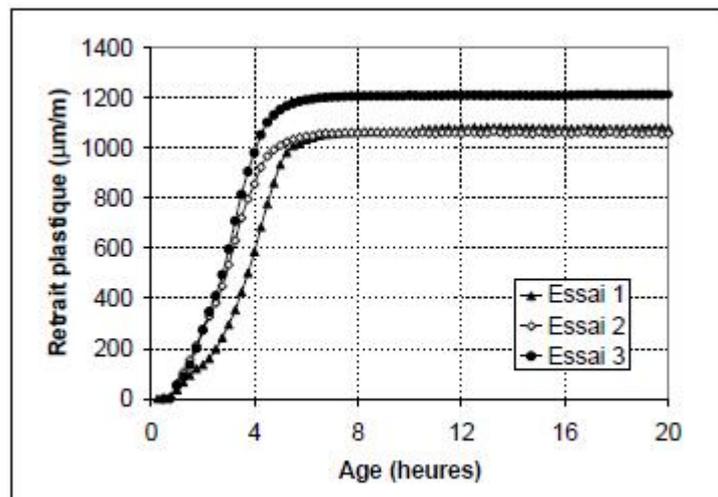


Figure 3.4 : Reproductibilité de la mesure du retrait plastique.

### III.2.2 - Mesure de l'évaporation

Pendant la mesure du retrait plastique avec séchage, on suit également de l'évolution de la masse d'un échantillon cylindrique, de diamètre 10cm et de hauteur 7cm (figure 3.5). La perte de masse divisée par la surface du cylindre nous donne l'évaporation, exprimée en  $\text{kg/m}^2$ . L'échantillon est soumis aux mêmes conditions extérieures que l'échantillon du retrait (on supposera donc que leurs taux d'évaporation sont identiques) [11].



Figure 3.5 : Mesure de l'évaporation.

### III.2.3 - Mesure de la pression capillaire

Le dispositif schématisé sur les figures 3.6 et 3.7 sont utilisés pour mesurer la pression de l'eau capillaire. Deux céramiques poreuses (figure 3.8) reliées à des capteurs de pression sont placées à 10 et 35mm de la surface d'un échantillon, de mêmes dimensions que celui de l'essai de perte de masse. Le capteur et le tube reliant capteur et céramique sont remplis d'eau désaérée avant l'essai avec une pompe à vide [11].

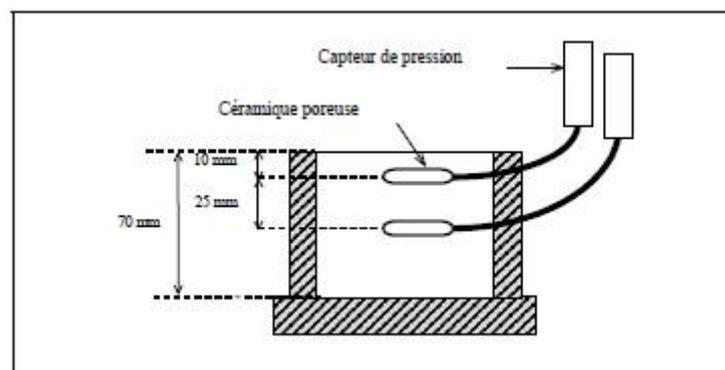


Figure 3.6 : Schéma du dispositif de mesure de la pression capillaire.

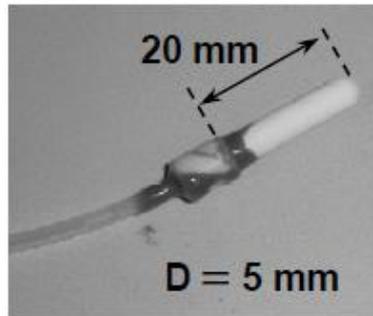


Figure 3.7 : Mesure de la pression capillaire.

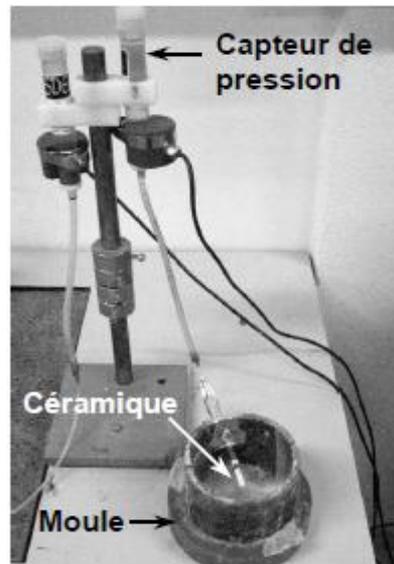


Figure 3.8 : Céramique poreuse.

La mesure se termine lorsque la diminution de pression mène à une vaporisation de l'eau interstitielle. La céramique se trouve alors en contact avec une phase gazeuse et une phase liquide ; une bulle de vapeur a d'ailleurs tendance à remonter dans le tube du capteur. A cette échéance, la mesure n'est plus possible ; la courbe de pression retourne à zéro [17].

### III.2.4 - Conditions et procédures des essais

Les essais sont réalisés dans une salle climatisée à 20°C et 50% d'humidité relative [11]. Les échantillons peuvent être soumis à plusieurs conditions :

#### III.2.4.1 - Essai en conditions endogènes

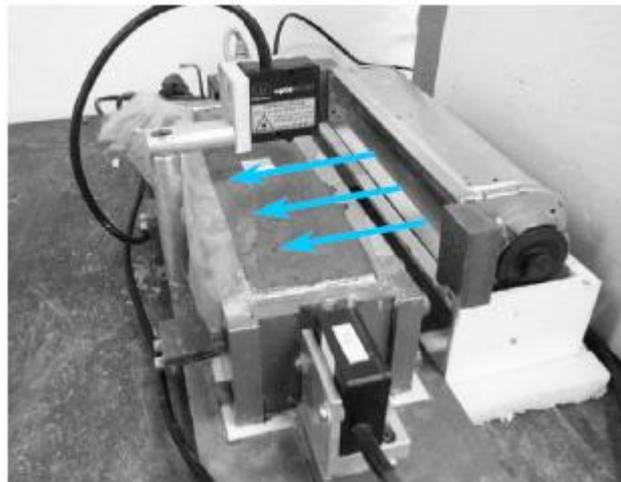
La surface du béton est recouverte d'un polyane. Le retrait mesuré est dû à la seule hydratation du ciment. Dans ces conditions, la mesure du tassement telle que proposée est impossible.

### III.2.4.2 - Essai sans vent (ou avec un séchage modéré)

La surface du béton est laissée à l'air libre. Le retrait mesuré est la "somme" du retrait endogène et du retrait de séchage.

### III.2.4.3 - Essai avec vent

Un ventilateur à turbine tangentielle, produisant un courant d'air de 5m/s, est placé à côté du dispositif de mesure du retrait pour accélérer le séchage (figure 3.9). Un appareil identique est également placé à proximité des échantillons servant aux mesures de l'évaporation et de la pression capillaire.



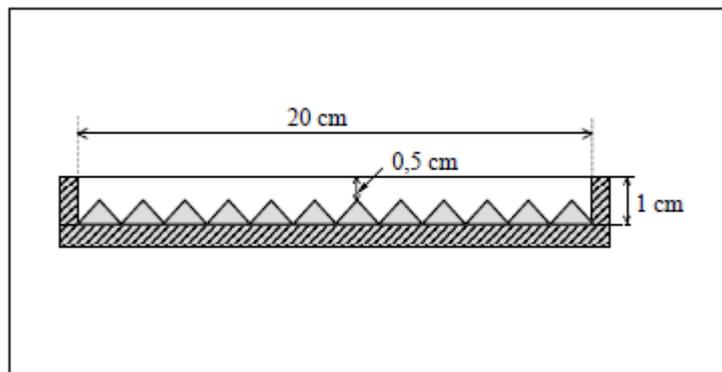
**Figure 3.9 :** Mesure du retrait plastique avec ventilation.

La mise en place du matériau dans les dispositifs s'effectue sur environ 10 minutes, qui sont suivies de 5 minutes de réglage des capteurs. Les essais débutent donc 15 minutes après le contact eau/ciment.

## III.3 - Etude de la fissuration à l'état frais

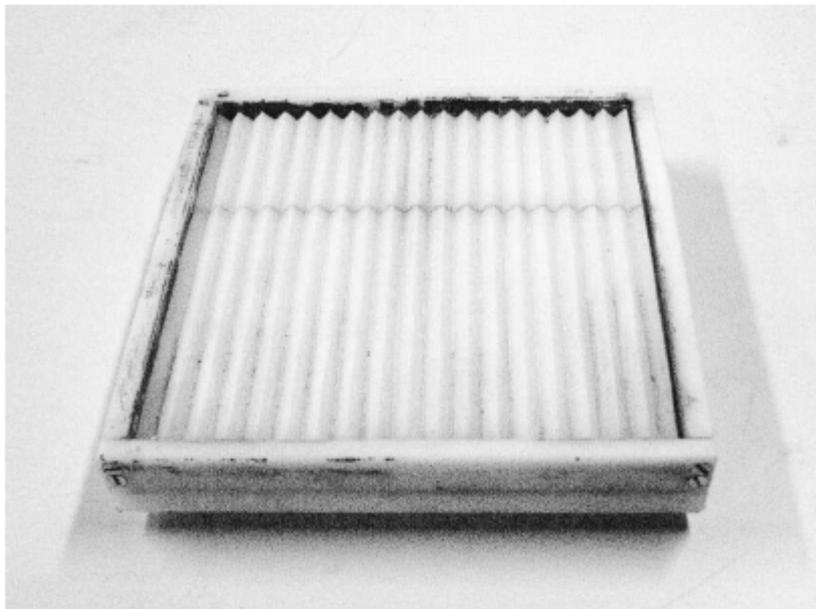
### III.3.1 - Dispositif de fissuration pour mortier

Le dispositif pour mortier est une plaque carrée de 20cm de côté et 1cm d'épaisseur. Pour empêcher le retrait plastique, le fond du moule est pourvu de dents de 0,5cm de haut (figure 3.10) [11].



**Figure 3.10** : Vue en coupe du dispositif de fissuration des mortiers.

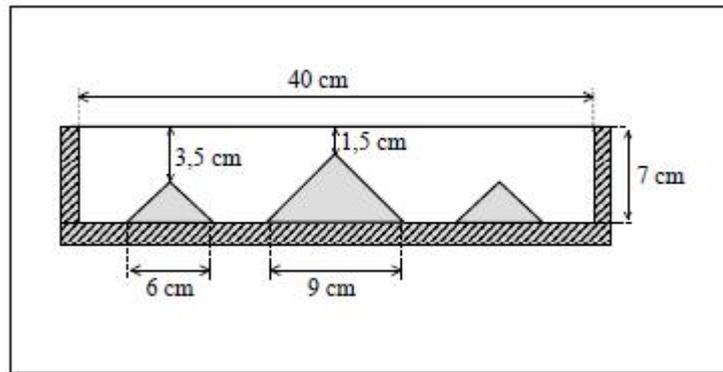
L'essai se déroule dans la salle climatisée avec ou sans ventilateur à côté du moule (figure 3.11). En fin d'essai, huit heures après la fabrication, on relève sur un calque le tracé des fissures. Pour chacune d'elles, on mesure la longueur et la largeur maximale avec une lentille graduée de précision  $\pm 10\mu\text{m}$ . L'amplitude de la fissuration est la somme des aires des fissures, calculées comme le produit de la longueur et la largeur maximale.



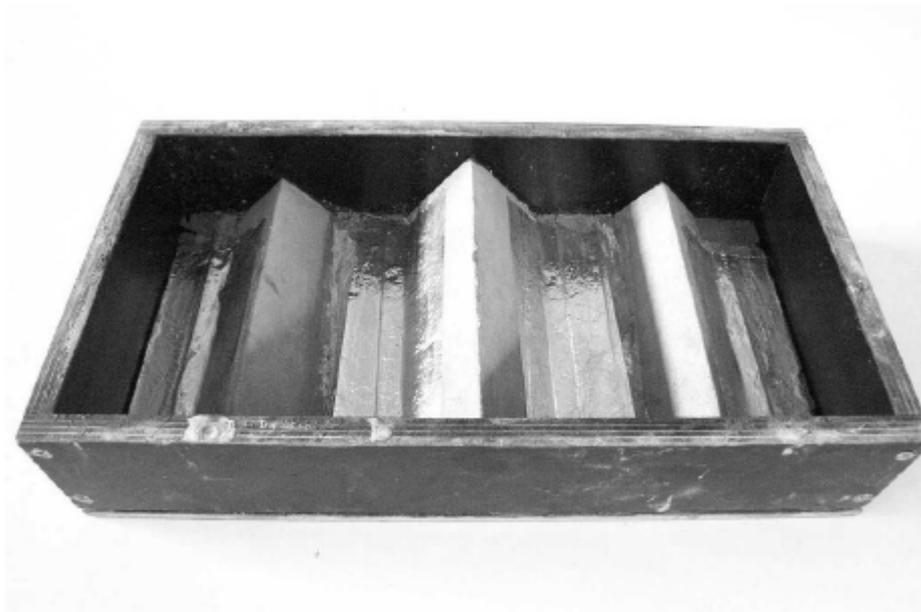
**Figure 3.11** : Dispositif de fissuration pour mortier.

### III.3.2 - Dispositif de fissuration pour béton

Le dispositif de fissuration est composé d'un moule prismatique de longueur 40cm, de largeur 20cm et de hauteur 7cm. Trois sur élévations triangulaires sont placées au fond du moule pour initier la fissuration (figures 3.12 et 3.13) [11].



**Figure 3.12 :** Vue en coupe du dispositif de fissuration des bétons.



**Figure 3.13 :** Dispositif de fissuration pour bétons.

L'essai se déroule dans une enceinte climatique où la température et l'humidité relative sont contrôlées, avec ou sans ventilateur à côté de l'échantillon. Au cours de l'essai, on mesure l'âge d'apparition de la fissure centrale; puis, à huit heures, on mesure la largeur maximale de la fissure à l'aide de la lentille graduée.

### Remarque

Les mortiers et les bétons présentent des cinétiques de déformations identiques, c'est pourquoi nous avons choisi d'analyser les résultats expérimentaux sur l'exemple des mortiers pour faciliter les expérimentations. Ces mortiers sont formulés avec une proportion de sable convenable déterminée par la technique du mortier de béton équivalent «MBE», et diverses proportions d'eau, superplastifiant, ciment et d'addition (filler calcaire).

### III.4 - La technique du mortier de béton équivalent «MBE»

#### III.4.1 - But de la technique

La technique du mortier de béton équivalent n'a pas vocation à remplacer les techniques traditionnelles de la détermination granulométrique de composition des bétons, mais vient favorablement améliorer les conditions d'études paramétriques pour le choix des types et dosages en adjuvant d'un béton. En ce sens, elle constitue une méthode rapide et fiable pour la mise au point des bétons adjuvés et permet de détecter les éventuels incidents rhéologiques pouvant survenir sur chantier.

#### III.4.2 - Principe de la technique

Pour éviter la difficulté à reproduire en laboratoire en utilisant des conditions exactes du malaxage du béton en centrale et pour limiter la lourdeur des études sur béton, il s'est avéré nécessaire d'utiliser une technique d'essai rapide et capable de fournir des résultats pouvant être reliés avec ceux qui seraient obtenus sur le béton. La méthode retenue consiste à travailler sur la phase mortier du béton avec prise en compte de la surface développée des gravillons écartés. Pour cette raison, la technique a été appelée technique du Mortier de Béton Equivalent (MBE) [49].

Pour utiliser cette technique, il convient de connaître au préalable les éléments d'identification des constituants et les bases de composition suivants :

- La granulométrie de chaque classe de granulats,
- leurs masses volumiques,
- leurs taux d'absorption d'eau,
- leurs teneurs en eau totales,
- la nature et le dosage en ciment (ou en liant équivalent),
- les caractéristiques des adjuvants,
- la composition granulométrique du mélange,
- le ou les rapports Eau efficace-Liant (ciment ou liant équivalent) fixés par le chantier.

Ces éléments préalables peuvent être complétés par la connaissance des contraintes particulières imposées par le chantier (durées de transport, variations de températures, conditions de coulage,...).

Les différents essais rhéologiques qui seront appliqués sur le mortier restent du même type que ceux appliqués sur le béton correspondant. Ainsi, les essais d'affaissement et d'étalement au cône d'Abrams du béton correspondant les essais d'affaissement et d'étalement au mini-cône du mortier de béton équivalent.

### III.4.3 - Calcul des surfaces développées par les granulats

La première partie de la transformation consiste à évaluer la surface développée par chacun des granulats dans le béton. Pour ce faire, il faut d'abord admettre les hypothèses suivantes :

- 1/ Les particules constituant les granulats sont des sphères parfaites,
- 2/ malgré leur porosité ces sphères sont considérées indéformables dans l'eau,
- 3/ à l'intérieur de chaque tranche granulaire, la densité de la particule moyenne est considérée indépendante de sa taille et reste égale à celle du granulat considéré.

Au niveau des granulats, il convient de considérer les différents cas pouvant se présenter :

- **Cas 1** - Les différents gravillons présentent des masses volumiques très voisines (écart inférieur ou égal à  $0,05\text{kg/dm}^3$ ).
- **Cas 2** - Les différents gravillons présentent des masses volumiques différentes (Écart supérieur à  $0,05\text{kg/dm}^3$ ).
- **Cas 3** - Le cas des sables.

#### III.4.3.1 - Cas des gravillons de masses volumiques voisines

Dans ce cas, il devient possible de calculer directement la surface développée dans le béton par les grains du mélange de tous ces gravillons. Dans ce contexte, le calcul de cette surface développée est organisé chronologiquement comme suit :

- a) Calcul de la granulométrie du mélange des gravillons du béton,
- b) définition des tranches granulaires successives dans ce mélange,
- c) calcul de la masse de chaque tranche granulaire,
- d) calcul du diamètre de la particule moyenne dans chaque tranche,
- e) calcul du volume de la particule moyenne dans chaque tranche,
- f) calcul de la surface développée de la particule moyenne dans chaque tranche,
- g) calcul du volume massique de la matrice du gravillon du mélange,
- h) calcul du volume total de l'ensemble des particules dans chaque tranche granulaire,
- i) calcul du nombre de particules moyennes dans chaque tranche granulaire,
- j) calcul de la surface développée par les particules moyennes dans chaque tranche granulaire,
- k) somme de l'ensemble des surfaces calculées pour chaque tranche granulaire du mélange de gravillons,

a) Calcul de la granulométrie du mélange des gravillons du béton

Si on considère par exemple deux gravillons  $G_3$  et  $G_4$ , qui présentent les caractéristiques suivantes :

Gravillon	Dosage dans le béton	Masse volumique	Refus au tamis $t_i$
$G_3$	$g_3$	$\mu_3$	$R_{i3}$
$G_4$	$g_4$	$\mu_4$	$R_{i4}$

**Tableau 3.1** : Caractéristiques des gravillons du béton.

Il est possible de déterminer la granulométrie du mélange des gravillons en calculant le refus à chacun des tamis couvrant l'ensemble des gravillons à recomposer. Le passant à chacun de ces tamis est déterminé par la formule :

$$r_i = (g_3 \cdot r_{i3} + g_4 \cdot r_{i4}) / (g_3 + g_4) \quad (3.1)$$

De même la masse volumique du mélange est déterminée par la relation :

$$\mu_g = (g_3 \cdot \mu_3 + g_4 \cdot \mu_4) / (g_3 + g_4) \quad (3.2)$$

b) Définition des tranches granulaires successives dans ce mélange

Chaque tranche granulaire est limitée par un tamis supérieur  $[TM_i]$  et par un tamis inférieur  $[Tm_i]$ . Les refus correspondant à ces tamis sont respectivement  $RM_i$  et  $Rm_i$  (exprimé en %, par exemple 15%). Les tamis à considérer sont les suivants :

$$20/16/12,5/10/8/6,3/5/4/3,15/2,5/1,25/0,63/0,315/0,16/0,08/<0,08\text{mm.}$$

c) Calcul de la masse de chaque tranche granulaire

La masse  $M_i$  de chaque tranche granulaire est définie par la relation :

$$M_i = (Rm_i - RM_i) \times (g_3 + g_4) / 100 \quad (3.3)$$

d) Calcul du diamètre de la particule moyenne dans chaque tranche

La particule moyenne de chaque tranche granulaire est définie comme étant une particule sphérique par hypothèse, présentant un diamètre ( $d_i$ ) défini par la relation :

$$d_i = (TM_i + Tm_i) / 2 \quad (3.4)$$

e) Calcul du volume de la particule moyenne dans chaque tranche

Le volume de chaque type de particule moyenne est donné par la relation :

$$v_i = (\pi \cdot d_i^3) / 6 \quad (3.5)$$

f) Calcul de la surface développée de la particule moyenne dans chaque tranche

La surface développée pour chaque type de particule moyenne est donnée par la relation :

$$s_i = \pi \cdot d_i^2 \quad (3.6)$$

g) Calcul du volume massique de la matrice du gravillon du mélange

Le volume massique de la matrice du gravillon du mélange est déterminé à partir de la masse volumique du mélange calculée au paragraphe (a) :

$$\omega = 1/\mu_g \quad (3.7)$$

h) Calcul du volume total de l'ensemble des particules dans chaque tranche granulaire

Le volume total de l'ensemble des particules contenues dans une tranche granulaire est le produit de la masse de la tranche granulaire par le volume massique de la matrice du gravillon ; ces paramètres ont été définis aux paragraphes (c) et (g) :

$$V_i = \omega \cdot M_i \quad (3.8)$$

i) Calcul du nombre de particules moyennes dans chaque tranche granulaire

Le nombre de particules moyennes est alors obtenu par le rapport du volume total de l'ensemble des particules de la tranche granulaire au volume unitaire de la particule moyenne ; ces paramètres  $v_i$  et  $V_i$  ont été définis aux paragraphes (e) et (h) :

$$N_i = V_i/v_i \quad (3.9)$$

j) Calcul de la surface développée par les particules moyennes dans chaque tranche granulaire

La surface développée par les particules moyennes dans chaque tranche granulaire est alors représentée par le produit de la surface développée de la particule moyenne par le nombre de particules moyennes :

$$S_i = N_i \cdot s_i \quad (3.10)$$

k) Calcul de la somme de l'ensemble des surfaces calculées pour chaque tranche granulaire du mélange de gravillon

La somme de l'ensemble des surfaces calculées pour chaque tranche granulaire du mélange de gravillon représente la surface développée de l'ensemble des gravillons :

$$SD = \sum S_i \quad (3.11)$$

### III.4.3.2 - Cas des gravillons de masses volumiques différentes

Dans ce cas, le calcul doit être effectué séparément pour chaque gravillon et dans ce contexte le calcul de la surface développée par chaque classe de gravillons du béton est organisé chronologiquement comme suit :

- 1) Définition des tranches granulaires successives du gravillon considéré,
- 2) calcul de la masse de chaque tranche granulaire,
- 3) calcul du diamètre de la particule moyenne dans chaque tranche,
- 4) calcul du volume de la particule moyenne dans chaque tranche,
- 5) calcul de la surface développée de la particule moyenne dans chaque tranche,
- 6) calcul du volume massique de la matrice du gravillon,
- 7) calcul du volume total de l'ensemble des particules dans chaque tranche granulaire,
- 8) calcul du nombre de particules moyennes dans chaque tranche granulaire,
- 9) calcul de la surface développée par les particules moyennes dans chaque tranche granulaire,
- 10) somme de l'ensemble des surfaces calculées pour chaque tranche granulaire du gravillon.

Ces calculs sont effectués sur les mêmes bases que celles décrites au paragraphe III.4.3.1  
La somme des surfaces développées par toutes les classes de gravillons donne le résultat attendu.

### III.4.3.3 - Cas des sables du béton

Il convient de déterminer la surface développée par le sable du béton et qui sera utilisé dans le mortier MBE. La démarche adoptée est rigoureusement identique à celle utilisée pour les gravillons, même dans le cas d'emploi de deux sables de masses volumiques distinctes.

## III.4.4 - Calcul de la composition du mortier de béton équivalent

### III.4.4.1 - Méthode de calcul

La correction granulaire du mortier MBE est généralement réalisée à partir des sables du béton. Il convient donc d'adopter la démarche suivante :

- a. calculer les surfaces développées ( $SD_{S_i}$ ) pour chaque sable ( $S_i$ ) du béton comme indiqué précédemment,
- b. déterminer les taux de correction par chaque sable selon la méthode décrite ci-dessous.

Si la composition du béton de départ est caractérisée par les éléments suivants :

Constituant	Composition (kg/m <sup>3</sup> )
Ciment C	c
Sable S <sub>1</sub>	s <sub>1</sub>
Sable S <sub>2</sub>	s <sub>2</sub>
Gravillon G <sub>3</sub>	g <sub>3</sub>
Gravillon G <sub>4</sub>	g <sub>4</sub>
Eau efficace	e <sub>eff</sub>
Adjuvant A <sub>1</sub>	a <sub>1</sub>
Adjuvant A <sub>2</sub>	a <sub>2</sub>

**Tableau 3.2 :** Composition du béton.

La composition du mortier de béton équivalent sera définie comme suit :

Constituant	Composition (kg/m <sup>3</sup> )
Ciment C	c
Sable S <sub>1</sub>	s' <sub>1</sub>
Sable S <sub>2</sub>	s' <sub>2</sub>
Adjuvant A <sub>1</sub>	a <sub>1</sub>
Adjuvant A <sub>2</sub>	a <sub>2</sub>

**Tableau 3.3 :** Composition du MBE corrigé par les sables du béton.

Où les quantités s'<sub>1</sub> et s'<sub>2</sub> sont calculées de façon à assurer le postulat d'équivalence entre les surfaces développées respectivement par les sables S<sub>1</sub> et S<sub>2</sub> du MBE d'une part et par tous les granulats du béton (S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, G<sub>3</sub>, G<sub>4</sub>) d'autre part. Ce postulat peut encore s'écrire plus simplement au niveau des surfaces développées (SD) :

$$SD(s'_1 s_1 + s'_2 s_2) = SD(g_3 + g_4) \quad (3.12)$$

Les quantités s'<sub>1</sub> et s'<sub>2</sub> peuvent être alors déduites comme suit :

$$SDs'_1 + SDs'_2 = SDs_1 + SDs_2 + SDg_3 + SDg_4 \quad (3.13)$$

En outre :  $(s'_1/s'_2) = (s_1/s_2) \quad (3.14)$

Soit :  $(SDs'_1/SDs'_2) = (SDs_1/SDs_2) \quad (3.15)$

$$\text{Donc : } SDs'_1 = (SDs_1/SDs_2) \cdot (SDs_1 + SDs_2 + SDg_3 + SDg_4 - SDs'_1) \quad (3.16)$$

$$\text{Ou encore : } SDs'_1 \cdot [1 + (SDs_1/SDs_2)] = (SDs_1/SDs_2) \cdot (SDs_1 + SDs_2 + SDg_3 + SDg_4) \quad (3.17)$$

$$SDs'_1 = [(SDs_1/SDs_2) \cdot (SDs_1 + SDs_2 + SDg_3 + SDg_4)] / [1 + (SDs_1/SDs_2)] \quad (3.18)$$

$$\text{Et : } s'_1 = (SDs'_{1,s_1}) / SDs_1 \quad (3.19)$$

$s'_2$  pouvant être calculé de la même façon.

#### III.4.4.2 - Bilan des compositions du mortier MBE

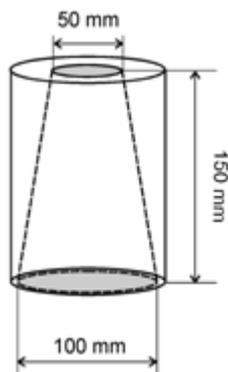
Constituants possibles du mortier	Composition de la phase mortier du béton	Composition du MBE Corrigé par le sable standard	Composition du MBE Corrigé par les sables du béton	Composition du MBE Non corrigé
Ciment C	c	c	c	c
Sable S <sub>1</sub>	s <sub>1</sub>	s <sub>1</sub>	s' <sub>1</sub>	s <sub>1</sub>
Sable S <sub>2</sub>	s <sub>2</sub>	s <sub>2</sub>	s' <sub>2</sub>	s <sub>2</sub>
Sable correcteur S <sub>c</sub>		s <sub>c</sub>		

**Tableau 3.4 :** Composition du MBE suivant le type de correction.

#### III.4.5 - Essais réalisables sur le mortier du béton équivalent

Les essais rhéologiques réalisables sur mortier MBE sont :

- Affaissement au mini-cône,
- Étalement au mini-cône (figure 3.14).



(a) Cône MBE

**Figure 3.14** : Dimensions du cône MBE par rapport au cône d'Abrams.

### III.4.5.1 - Essais d'évaluation du comportement rhéologique

#### III.4.5.1.1 - Essais d'affaissement au mini-cône

Utiliser un mini-cône dont la paroi intérieure est propre et légèrement humidifié. La surface d'étalement sur la plaque de base doit également être propre et légèrement humidifié (sans qu'il ne subsiste de l'eau résiduelle sur la plaque).

Pendant le remplissage, le moule est appuyé fermement sur la plaque de base. Au moyen d'une pelle creuse, introduire le mortier dans le moule en trois couches d'épaisseurs équivalentes. Pour chacune des couches, piquer 15 fois le mortier (sauf dans le cas de mortier autoplacant ou fluide) à l'aide de la tige de piquage métallique, en répartissant les enfoncements sur la surface du mortier et en faisant pénétrer la tige dans la couche sous-jacente s'il y a lieu.

Araser en roulant la tige de piquage sur le bord supérieur du moule. Eviter pendant cette opération un compactage supplémentaire du béton. Puis soulever le cône le plus verticalement possible en 2 secondes, avec précaution, lentement et sans secousses.

Après démoulage, procéder dans la minute à la lecture de l'affaissement au centre de la partie supérieure du mortier à l'aide d'un réglet métallique gradué en mm.

#### III.4.5.1.2 - Essais d'étalement au mini-cône

La mesure de l'étalement est effectuée juste après celle de l'affaissement, sur le même échantillon affaissé précédemment. Elle s'effectue à l'aide du matériel défini précédemment selon 3 diamètres pour les mortiers fermes à très plastiques et selon 2 diamètres orthogonaux pour les mortiers fluides à autoplacants. La valeur de l'étalement est la moyenne de ces valeurs.

Ces procédures sont valables à toutes les échéances retenues. Pour les suivis rhéologiques dans le temps, remettre après essai un maximum de mortier dans le bol du malaxeur et le couvrir d'un linge

humide ou d'un film plastique en attendant l'échéance suivante. Il est important de bien remalaxer 15 secondes à petite vitesse avant chaque nouvel essai.

### III.5 - Conclusion du chapitre

Parmi les dispositifs de fissuration cités précédemment aux paragraphes III.3.1 et III.3.2, il est préférable d'utiliser celui du mortier pour faciliter les expérimentations. Donc pour travailler sur la phase mortier du béton, il faut compenser les gravillons écartés par les sables uniquement en utilisant la technique du mortier de béton équivalent.

La technique du mortier de béton équivalent est simple et pratique permet désormais une prévision de la formulation d'un béton et ouvre de nouvelles possibilités de recherche dans la compréhension des phénomènes rhéologiques. Elle n'a cependant pas pour but de remplacer, à elle seule, les études complètes de composition de béton, mais elle améliore considérablement le processus de formulation des bétons adjuvantés.

# **CHAPITRE IV**

## **Étude expérimentale du retrait plastique des bétons autoplaçants**

## IV.1 - Introduction

Pour étudier expérimentalement le retrait plastique des bétons autoplaçants à l'état frais, il faut tout d'abord donner une formulation au béton autoplaçant. Puisque les mortiers et les bétons présentent des cinétiques de déformations identiques, nous avons choisi de faire les essais sur mortiers, et pour déduire la phase mortier de ce béton, nous avons compensé les quantités des graviers écartés par une quantité convenable du sable en utilisant la technique du mortier de béton équivalent. Dans le but de suivre l'évolution d'amplitude du retrait plastique pendant le temps, le mortier formulé a été placé dans différentes conditions (essai ; en conditions endogènes et avec un séchage).

## IV.2 - Le béton autoplaçant, formulation et expérimentation

### IV.2.1 - Identification des matériaux

Avant d'entamer une formulation, il est nécessaire de connaître les matériaux utilisés à cet effet. Leurs caractéristiques sont déterminées au moyen d'un certain nombre d'essais, ces essais sont pour la plupart normalisés.

#### IV.2.1.1 - Identification des granulats

##### Ø Echantillonnage (NF P18-553)

C'est l'opération qui consiste à prélever un échantillon représentatif du matériau pour effectuer les essais. Elle peut se faire par quartage ou à l'aide d'un échantillonneur (figure 4.1).



Figure 4.1 : Echantillonneur [50].

### Ø Analyse granulométrique

Il s'agit de fractionner le matériau au moyen d'une série de tamis pour déterminer sa classe [51].

### Ø Densités (absolues et apparentes) des granulats

La densité absolue est le rapport de la masse spécifique à la masse d'un égal volume d'eau, alors que la densité apparente est le rapport de la masse volumique à la masse d'un égal volume d'eau. Ce rapport est donc sans dimension.

### Ø Module de finesse du sable

Le module de finesse sert à évaluer la grosseur du sable.

- Un module de finesse élevé correspond à un sable grossier.
- Un module de finesse faible correspond à un sable fin.

La valeur du module de finesse dépend surtout de la teneur en grains fins du sable.

### Ø Equivalent du sable

Cet essai est un essai de propreté, la valeur de l'équivalent de sable exprime le pourcentage de fines contenues dans le sable. L'absence de fines ne permet pas d'obtenir un béton compact et diminue les résistances mécaniques. L'excès de fines est défavorable dans la mesure où il augmente la demande en eau, donc le rapport E/C.

#### IV.2.1.2 - Identification du ciment

### Ø La résistance mécanique du ciment

La détermination de la résistance réelle d'un ciment de classe CPJ-CEM II / B 42,5N NA 442 se fait par essais de traction/compression sur des éprouvettes de mortier à 2 et 28 jours. La norme EN 196-1 (tableau 4.10) donne la résistance convenable :

Classe	Résistance à la compression (N/mm <sup>2</sup> ) R à 2j	Résistance à la compression (N/mm <sup>2</sup> ) R <sub>min</sub> à 28j	Résistance à la compression (N/mm <sup>2</sup> ) R <sub>max</sub> à 28j	Temps du début de prise (mn)
42,5N	≥12,5	>42,5	<62,5	>60

**Tableau 4.1** : La résistance du ciment à 2 et 28 jours.

### Ø Analyse chimique du ciment

Les différents composants chimiques sont :

- Silice .....( $\text{SiO}_2$ ),
- chaux .....( $\text{CaO}$ ),
- magnésie .....( $\text{MgO}$ ),
- carbonate ..... ( $\text{CaCO}_3$ ),
- anhydride carbonique .....( $\text{CO}_2$ ),
- eau de constitution .....( $\text{H}_2\text{O}$ ),
- oxyde ferrique .....( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ),
- oxyde d'alumine .....( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ),
- insolubles .....( $\text{INS}$ ),
- perte au feu .....( $\text{PAF}$ ).

Les pourcentages des composants chimiques sont résumés dans le tableau 4.11 :

Composant chimique	$\text{SiO}_2$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{CaCO}_3$	$\text{CO}_2$	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	INS	PAF
Pourcentage (%)	20,92	61,74	1,58	11,11	4,82	0,46	4,32	5,33	1,48	5,52

**Tableau 4.2 :** Composition chimique du ciment.

La composition chimique ne suffit pas pour caractériser un ciment, il est nécessaire de connaître les composés minéralogiques constitués lors de la fabrication du ciment à partir des composés chimiques [52].

Les principaux composés minéralogiques formés sont :

- Silicate tricalcique : ( $3\text{CaO SiO}_2$ ) noté  $\text{C}_3\text{S}$ ,
- Silicate bicalcique : ( $2\text{CaO SiO}_2$ ) noté  $\text{C}_2\text{S}$ ,
- Aluminate tricalcique : ( $3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$ ) noté  $\text{C}_3\text{A}$ ,
- Alumino-ferrite tétracalcique : ( $4\text{CaO Fe}_2\text{Al}_2\text{O}_3$ ) noté  $\text{C}_4\text{AF}$ .

Le pourcentage de ces constituants est calculé à partir de la composition chimique par les formules de BOGUE suivantes :

- $\text{C}_3\text{A} = 2,65 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 1,69 \text{ Fe}_2\text{O}_3$ .
- $\text{C}_3\text{S} = 4,07 \text{ CaO} - 7,60 \text{ SiO}_2 - 6,72 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 1,43 \text{ Fe}_2\text{O}_3 - 2,85 \text{ SO}_3$ .
- $\text{C}_2\text{S} = 2,87 \text{ SiO}_2 - 0,754 \text{ C}_3\text{S}$ .
- $\text{C}_4\text{AF} = 3,04 \text{ Fe}_2\text{O}_3$ .

Le tableau 4.12 donne le résultat de l'analyse minéralogique du ciment :

Composant chimique	C <sub>3</sub> A	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>4</sub> AF
Pourcentage (%)	7,62	44,53	26,46	13,13

**Tableau 4.3 :** Composition minéralogique du ciment.

#### IV.2.1.3 - Identification du superplastifiant

Le superplastifiant utilisé est un haut réducteur d'eau commercialisé par l'entreprise GRANITEX sous le nom de MEDAFLOW30. Conçu à base de polycarboxylates, cet adjuvant n'a aucun effet retardateur [53].

##### Ø Caractéristiques

Forme .....liquide,  
 Couleur .....jaunâtre,  
 PH .....6-6,5,  
 Densité .....1,07,  
 Teneur en chlore .....<1g/L,  
 Plages de dosage recommandée .....0,5 à 2,0%.

#### IV.2.1.4 - Identification du filler calcaire (poudre du marbre blanc) [54]

##### Ø Caractéristiques

Forme .....poudre,  
 Aspect .....homogène,  
 Couleur .....blanche,  
 Densité apparente .....1,1,  
 Plages de dosage recommandée .....selon les performances recherchées.

##### Ø Calcul de la densité absolue

Le filler du marbre blanc étant une poudre très fine, la détermination de sa densité absolue ne peut se faire à l'aide du pycnomètre pour gravier et de l'eau. On utilise donc un petit pycnomètre utilisé généralement pour les produits bitumineux et un produit liquide hydrocarbure (Toluène). La valeur obtenue après essais ; 2,7. La répartition granulométrique est de 0/100 $\mu$ m (proche de celle du ciment).

Les pourcentages des composants chimiques sont résumés dans le tableau 4.13 :

<b>Composant chimique</b>	CaCO <sub>3</sub>	MgO, CaO, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , SiO <sub>2</sub>
<b>Pourcentage (%)</b>	99,05	0,95

**Tableau 4.4 :** Composition chimique du filler calcaire.

#### IV.2.2 - Formulation du béton autoplaçant par tâtonnement

Contrairement à la formulation du béton ordinaire, pour la formulation du béton autoplaçant nous n'avons pas suivi une formulation classique. Nous avons respecté les conditions nécessaires permettant de garantir l'autoplaçabilité tout en se basant sur des compositions proposées dans la littérature spécialisée [7] [8].

Il s'agit de choisir les proportions des constituants dans 1m<sup>3</sup> du béton, en respectant les paramètres suivants :

- ✓ Un rapport gravier/sable (G/S) proche de 1,
- ✓ Un rapport eau/ciment (E/C) égale à 0,5,
- ✓ Un dosage en ciment plutôt élevé (le dosage minimal du ciment est 300kg/m<sup>3</sup>).  
On a fixé le dosage de ce dernier à 400kg/m<sup>3</sup> pour tous les deux bétons testés,
- ✓ Un pourcentage déterminé en ajouts (superplastifiant et filler calcaire),
- ✓  $330(l/m^3) \leq \text{volume de pâte} \leq 400(l/m^3)$ ,
- ✓  $120(kg/m^3) \leq \text{masse d'addition} \leq 200(kg/m^3)$ .

Pour que nous ayons obtenu la formulation du béton autoplaçant ci après (une formulation qui respecte les conditions de l'AFGC), nous avons modifié le dosage du superplastifiant et du filler calcaire dans nombreux essais.

Pour calculer les proportions des constituants dans un mètre cube on a fixé les rapports suivants :

- ◆ G/S=0,8 pour augmenter la quantité de sable, celle-ci permet d'assurer une meilleure stabilité et une quantité suffisante de mortier,
- ◆ E/C=0,5, le dosage en ciment étant constant,
- ◆ Le volume d'air occlus (A) est de l'ordre de 4%.

Dans 1m<sup>3</sup> du béton on a les constituants suivants :

$$G+S+C+E+A+FC=1000(l) \quad (4.1)$$

Avec:

$$A=4(l/m^3).$$

$$C=400(kg/m^3)=(400/3,1)(l/m^3)=129,03(l/m^3). \quad E=200(l/m^3).$$

Pour respecter la valeur du volume de la pâte recommandée, on prend le dosage en filler calcaire (FC) suivant :

$$FC=120(\text{kg}/\text{m}^3)=(120/2,7)(\text{l}/\text{m}^3)=44,44(\text{l}/\text{m}^3).$$

Les constituants présents dans le mélange sont :

$$G+S+C+E+A+FC=1000(\text{l}) \quad (4.1)$$

Pour les deux fractions du gravier on a choisi d'utiliser 50% de 8/15 et 50% du 3/8.

Pour le superplastifiant, on a pris un dosage de 1,6%C.

#### IV.2.3 - Préparation de gâchée

La préparation du béton autopléant demande plus d'attention et de précision que celle d'un béton ordinaire. Pour parvenir à effectuer plusieurs essais sur le béton frais, il faut suivre une certaine méthodologie.

Le premier paramètre à prendre en compte est la capacité du malaxeur utilisé.

Dans notre cas elle est de 1/40<sup>ème</sup> du m<sup>3</sup>.

Après avoir déterminé les proportions de chaque constituant on suit le mode opératoire suivant :

- ü Vérifier en premier le nombre et l'état des moules cubiques/prismatique nécessaires pour les essais. Ces derniers doivent être graissés à l'aide d'une huile pour faciliter le décoffrage,
- ü Réunir tout le matériel nécessaire pour effectuer les essais.
- ü Vérifier que les matériaux ne sont pas humides, sinon les sécher préalablement dans l'étuve,
- ü Préparer la quantité d'eau nécessaire pour la gâchée. Le superplastifiant est ajouté à première moitié du l'eau de gâchage,
- ü Peser les matériaux secs (gravier, sable, ciment et filler calcaire) et les introduire dans le malaxeur,
- ü Mettre le malaxeur en marche pour homogénéiser le mélange sec.
- ü Laisser le malaxeur en marche et ajouter progressivement la première moitié du l'eau de gâchage (celle qui contient l'adjuvant),
- ü Ajouter la deuxième moitié d'eau graduellement,
- ü Effectuer immédiatement les essais après arrêt du malaxage, les essais sont réalisés au moins deux fois pour valider les valeurs obtenues,
- ü Remplir les éprouvettes en deux/trois couches sans vibration.

#### IV.2.4 - Les essais effectués

Les essais effectués sur les bétons autopléants permettent de caractériser leurs performances physiques, mécaniques et de conclure sur leurs natures (autopléant ou non).

Les caractéristiques et propriétés qui ont été appréhendées concernent la rhéologie et les performances mécaniques sont :

- Ø L'étalement au cône d'Abrams.
- Ø L'écoulement à la boîte en L.
- Ø La stabilité au tamis.
- Ø La résistance à la compression.
- Ø La résistance de traction par flexion.

#### IV.2.4.1 - Essais sur le béton frais

##### IV.2.4.1.1 - Essai au cône d'Abrams

Pour un béton autoplaçant, cet essai permet de mesurer la mobilité du béton autoplaçant en milieu non confiné (figure 4.2).



**Figure 4.2 :** Etalement d'un béton autoplaçant.

Le principe de cet essai est de mesurer le diamètre d'une galette du béton (moyenne de deux diamètres orthogonaux) après soulèvement du cône d'Abrams (figure 4.3).

Pour un béton autoplaçant la valeur visée de l'étalement est de 60 à 75cm avec un affaissement supérieur à 25cm.



**Figure 4.3 :** Essai d'étalement.

- **Mesure de vitesse d'étalement**

La vitesse d'étalement peut nous renseigner sur la viscosité, la fluidité et l'ouvrabilité du béton. Après soulèvement du cône, on chronomètre le temps nécessaire, pour que le béton forme un cercle de 50cm du diamètre, on le note  $T_{50}$ , donc on peut déduire la vitesse d'étalement  $V_e$ (cm/s).

Si une ségrégation apparaît lors de l'écoulement, il est possible de modifier la fluidité du béton en ajoutant ou en diminuant la quantité de certains composants. Par exemple si l'étalement est faible on peut augmenter le volume de la pâte, en maintenant le rapport (eau/liant) constant, ou alors augmenter le dosage en superplastifiant. Dans le cas où la ségrégation apparaît sous forme de couronne de pâte, il convient de diminuer le dosage en superplastifiant ou d'augmenter le volume de la pâte mais toujours en maintenant le rapport (eau/liant) constant.

#### IV.2.4.1.2 - Essai à la boîte en L

La boîte en L permet de tester la mobilité du béton frais en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes du blocage inacceptable (figure 4.4).



**Figure 4.4 :** L'essai à la boîte en L.

Le principe de cet essai, est de remplir entièrement la partie verticale de la boîte, laisser le béton se reposer environ une minute puis enlever la trappe et laisser le béton s'écouler dans la partie horizontale à travers le ferraillage, lorsque le mouvement d'écoulement est arrêté, on mesure les hauteurs  $H_1$  et  $H_2$  et on exprime le taux de remplissage  $H_2/H_1$ . Notons que les distances entre les barres d'acier représentent un ferraillage standard pour des ouvrages de génie civil très ferrailés. Pour des applications moins ferrailées, il est possible d'alléger la grille en ne mettant que deux barres distantes de 58mm.

Selon l'association française de génie civil (AFGC), le taux de remplissage doit être supérieur ou égale à 0,8. Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferraillage et qu'il se produit un amoncellement de granulats en aval de la grille, c'est le signe d'un problème du blocage ou de ségrégation, il convient

donc de diminuer le rapport G/S (augmenter la quantité de sable, ou diminuer celle des graviers), ou d'augmenter le volume de la pâte en maintenant le rapport eau/liant constant.

#### IV.2.4.1.3 - Essai de la stabilité au tamis

L'essai de la stabilité au tamis (figure 4.5) permet de qualifier les bétons autoplaçants vis à vis au risque ségrégation. Il s'agit de verser 10 litre du béton juste après le malaxage dans un sceau, puis couvrir le sceau pour protéger le béton de la dessiccation et laisser reposer durant 15 minutes. Verser 5kg du béton au centre d'un tamis de 5mm du diamètre, à une hauteur de chute de 50cm, on récupère le béton passant dans un récipient. Après 2 minutes, on mesure le pourcentage en poids de laitance passant à travers le tamis.

On considère qu'une valeur inférieure à 15% de laitance est une caractéristique d'un béton stable.

- **Critères d'acceptabilité**

La mesure du pourcentage de laitance conduit à classer les formules du béton autoplaçant de la façon suivante :

$0\% \leq \text{Plaitance} \leq 15\% \rightarrow$  stabilité satisfaisante,

$15\% < \text{Plaitance} \leq 30\% \rightarrow$  stabilité critique,

$\text{Plaitance} > 30\% \rightarrow$  stabilité très mauvaise.

Ces critères sont particulièrement adaptés aux applications en éléments verticaux.



**Figure 4.5 :** Essai de stabilité au tamis.

- **Conservation des éprouvettes**

Après le gâchage, les moules cubiques et prismatique nécessaires pour les essais sont conservés dans une pièce à température ambiante, et démoulés après 24h. Une fois démoulées, pour assurer un bon mûrissement du béton, les éprouvettes sont conservées dans un bac d'eau à une température de 20°C, ceci permet d'éviter les pertes d'eau, et de garantir le déroulement normal du processus du ciment.

#### IV.2.4.2 - Essais sur le béton durci

##### IV.2.4.2.1 - Essais de compression

L'essai de compression consiste à soumettre l'éprouvette du béton à l'écrasement par compression axiale (figure 4.6.a). La mise en charge doit se faire d'une manière continue jusqu'à la rupture de l'éprouvette (figure 4.6.b).



a) Epreuve avant écrasement.



b) Epreuve après écrasement.

**Figure 4.6 :** Essai de compression.

On note la charge maximale atteinte  $P$  (KN) et la surface de chargement  $S$  ( $m^2$ ), la contrainte maximale (résistance à la compression) s'écrit alors :

$$\sigma_c(\text{MPa})=P/S \quad (4.2)$$

Les essais de compression sont effectués sur des éprouvettes cylindriques de 15cm du diamètre et 30cm de hauteur, la contrainte maximale s'écrit :

$$\sigma_c(\text{MPa})=[P]/[\pi.(D/2)^2] \quad (4.3)$$

$P$  : charge de rupture,

$D$  : diamètre de l'éprouvette cylindrique ( $D=15\text{cm}$ ),

$\sigma_c$  : résistance à la compression.

L'objectif de cet essai est de suivre l'évolution de la résistance à la compression et le comportement du béton autoplaçant.

##### IV.2.4.2.2 - Essai de traction par flexion

L'essai de traction par flexion est effectué sur des prismes de sections carrées ( $10 \times 10 \times 40$ ) $\text{cm}^3$ . Le prisme est placé dans une machine automatique de flexion (figure 4.7.a) et est soumis à une charge croissante jusqu'à sa rupture (figure 4.7.b).



a) Prisme avant la rupture.



b) Prisme après la rupture.

**Figure 4.7 :** Essai de traction par flexion.

On note alors la charge de rupture  $P$ .

La résistance à la traction s'écrit :

$$\sigma_T(\text{MPa}) = 1,5(P/a^2) \quad (4.4)$$

$P$  : charge de rupture,

$a$  : coté du prisme ( $a \times a \times 4a$ ).

### IV.3 - Formulation du mortier de béton équivalent

Le volume de sable du mortier est calculé par la technique du mortier de béton équivalent. En négligeant le volume d'air entraîné, leur composition varie en fonction des seules variables suivantes :

- La quantité de superplastifiant (en  $l/m^3$ ) :  $S_p$ ,
- Le rapport du volume d'addition et du volume de ciment :  $a/c$ ,
- Le rapport du volume d'eau et du volume de fines (addition + ciment) :  $e/f$ .

Dans une formule du mortier, la quantité de superplastifiant se situe entre 5 et 10 ( $l/m^3$ ), le rapport  $e/f$  entre 0,93 et 1,07 (dans le cas où l'addition est le filler calcaire), et le rapport  $a/c$  entre 0,6 et 1,2.

Le choix de la plage du rapport  $e/f$  s'est fait également en fonction des quantités d'eau limites, par rapport à la consistance et à la stabilité des mortiers. Le rapport  $e/f$  minimal est suffisant pour permettre une mise en place aisée du mortier. De même, le rapport  $e/f$  maximal est inférieur au rapport provoquant une instabilité du mélange.

Les additions n'ont pas des plages identiques pour le rapport  $e/f$ , parce que leurs demandes en eau sont différentes, ce qui est le cas pour les cendres volantes (CV) et les fillers de calcaire (FC) (tableau 4.21) [11].

Paramètre	Minimum	Intermédiaire	Maximum
Sp (l/m <sup>3</sup> )	0	5	10
a/c	0	0,6	1,2
e/f (FC)	0,93	-	1,07
e/f (CV)	1,07	-	1,24

**Tableau 4.5 :** Plages des paramètres d'une formule du mortier.

### IV.3.1 - Détermination de la quantité du sable nécessaire S' par la technique du mortier de béton équivalent «MBE»

Le principe de cette technique est de compenser les quantités de gravier (gavier 3/8 et 8/15) et du sable (sable 0/3) utilisables dans la formule précédente du béton autoplaçant par une quantité convenable du sable utilisé précédemment [49].

#### 1. Calcul les surfaces développées par les gravillons

Les différents gravillons présentent des masses volumiques très voisines (écart inférieure ou égale à 0,05kg/dm<sup>3</sup>).

A / Calcul de la granulométrie du mélange des gravillons du béton :

Gravillon	Dosage dans le béton (g/l)	Masse volumique (g/l)	refus au tamis t <sub>i</sub>
G <sub>3</sub> : 8/15	g <sub>3</sub> =363,83	μ <sub>3</sub> =2630	R <sub>i3</sub>
G <sub>4</sub> : 3/8	g <sub>4</sub> =365,22	μ <sub>4</sub> =2640	R <sub>i4</sub>

**Tableau 4.6 :** Caractéristiques des gravillons du béton.

Il est possible de déterminer la granulométrie du mélange des gravillons en calculant le refus à chacun des tamis couvrant l'ensemble des gravillons à recomposer. Le passant à chacun de ces tamis est déterminé par la formule :

$$r_i = (g_3 \cdot r_{i3} + g_4 \cdot r_{i4}) / (g_3 + g_4) \quad (4.5)$$

De même la masse volumique du mélange est déterminée par la relation :

$$\mu_g = (g_3 \cdot \mu_3 + g_4 \cdot \mu_4) / (g_3 + g_4) \quad (4.6)$$

B / Définition des tranches granulaires successives dans ce mélange :

Chaque tranche granulaire est limitée par un tamis supérieur [TM<sub>i</sub>] et par un tamis inférieur [Tm<sub>i</sub>]. Les refus correspondant à ces tamis sont respectivement RM<sub>i</sub> et Rm<sub>i</sub> (exprimé en %).

C / Calcul de la masse de chaque tranche granulaire :

La masse  $M_i$  de chaque tranche granulaire est définie par la relation :

$$M_i = (Rm_i - RM_i) \times (g_3 + g_4) / 100 \quad (4.7)$$

D / Calcul du diamètre de la particule moyenne dans chaque tranche :

La particule moyenne de chaque tranche granulaire est définie comme étant une particule sphérique par hypothèse, présentant un diamètre ( $d_i$ ) défini par la relation :

$$d_i = (TM_i + Tm_i) / 2 \quad (4.8)$$

E / Calcul du volume de la particule moyenne dans chaque tranche :

Le volume de chaque type de particule moyenne est donné par la relation

$$v_i = (\pi \cdot d_i^3) / 6 \quad (4.9)$$

F / Calcul de la surface développée de la particule moyenne dans chaque tranche :

La surface développée pour chaque type de particule moyenne est donnée par la relation :

$$s_i = \pi \cdot d_i^2 \quad (4.10)$$

G / Calcul du volume massique de la matrice du gravillon du mélange :

Le volume massique de la matrice du gravillon du mélange est déterminé à partir de la masse volumique du mélange calculée au paragraphe (A).

$$\omega = 1 / \mu_g \quad (4.11)$$

H / Calcul du volume total de l'ensemble des particules dans chaque tranche granulaire :

Le volume total de l'ensemble des particules contenues dans une tranche granulaire est le produit de la masse de la tranche granulaire par le volume massique de la matrice du gravillon ; ces paramètres ont été définis aux paragraphes (C) et (G) :

$$V_i = \omega \cdot M_i \quad (4.12)$$

I / Calcul du nombre de particules moyennes dans chaque tranche granulaire :

Le nombre de particules moyennes est alors obtenu par le rapport du volume total de l'ensemble des particules de la tranche granulaire au volume unitaire de la particule moyenne ; ces paramètres  $v_i$  et  $V_i$  ont été définis aux paragraphes (E) et (H) :

$$N_i = V_i / v_i \quad (4.13)$$

J / Calcul de la surface développée par les particules moyennes dans chaque tranche granulaire :

La surface développée par les particules moyennes dans chaque tranche granulaire est alors représentée par le produit de la surface développée de la particule moyenne par le nombre de particules moyennes :

$$S_i = N_i \cdot s_i \quad (4.14)$$

K / Calcul de la somme de l'ensemble des surfaces calculées pour chaque tranche granulaire du mélange de gravillon :

La somme de l'ensemble des surfaces calculées pour chaque tranche granulaire du mélange de gravillon représente la surface développée de l'ensemble des gravillons :

$$SD = \sum S_i \quad (4.15)$$

**2. Calcul des surfaces développées par les grains du sable**

La démarche adoptée est rigoureusement identique à celle utilisée pour les gravillons.

A / Calcul de la granulométrie du sable du béton :

Sable	Dosage dans le béton (g/l)	Masse volumique (g/l)	refus au tamis $t_i$
S : 0/3	$s_b = 899,21$	$\mu_s = 2600$	$R_i$

**Tableau 4.7 :** Caractéristiques du sable du béton.

B / Définition des tranches successives du sable :

Chaque tranche du sable est limitée par un tamis supérieur [TM<sub>i</sub>] et un tamis inférieur [Tm<sub>i</sub>]. Le refus R<sub>i</sub> correspondant à chaque tamis est exprimé en %.

C / Calcul de la masse de chaque tranche du sable :

La masse M<sub>i</sub> de chaque tranche du sable est définie par la relation :

$$M_i = (R_i) \times (s_b) / 100 \quad (4.16)$$

D / Calcul du diamètre de la particule moyenne dans chaque tranche :

La particule moyenne de chaque tranche du sable est définie comme étant une particule sphérique par hypothèse, présentant un diamètre (d<sub>i</sub>) défini par la relation :

$$d_i = (TM_i + Tm_i) / 2 \quad (4.17)$$

E / Calcul du volume de la particule moyenne dans chaque tranche :

Le volume de chaque type de particule moyenne est donné par la relation :

$$v_i = (\pi \cdot d_i^3) / 6 \quad (4.18)$$

F / Calcul de la surface développée de la particule moyenne dans chaque tranche :

La surface développée pour chaque type de particule moyenne est donnée par la relation :

$$s_i = \pi \cdot d_i^2 \quad (4.19)$$

G / Calcul du volume massique du sable :

Le volume massique du sable est déterminé à partir de la masse volumique du sable mentionnée au tableau 4.27 :

$$\omega = 1/\mu_s \quad (4.20)$$

H / Calcul du volume total de l'ensemble des particules dans chaque tranche du sable :

Le volume total de l'ensemble des particules contenues dans une tranche du sable est le produit de la masse de la tranche par le volume massique; ces paramètres ont été définis aux paragraphes (C) et (G) :

$$V_i = \omega \cdot M_i \quad (4.21)$$

I / Calcul du nombre de particules moyennes dans chaque tranche granulaire :

Le nombre de particules moyennes est alors obtenu par le rapport du volume total de l'ensemble des particules de la tranche du sable au volume unitaire de la particule moyenne ; ces paramètres  $v_i$  et  $V_i$  ont été définis aux paragraphes (E) et (H) :

$$N_i = V_i/v_i \quad (4.22)$$

J / Calcul de la surface développée par les particules moyennes dans chaque tranche du sable :

La surface développée par les particules moyennes dans chaque tranche du sable est alors représentée par le produit de la surface développée de la particule moyenne par le nombre de particules moyennes :

$$S_i = N_i \cdot s_i \quad (4.23)$$

K / Calcul de la somme de l'ensemble des surfaces calculées pour chaque tranche du sable du béton:

La somme de l'ensemble des surfaces calculées pour chaque tranche représente la surface totale développée du sable :

$$SD = \sum S_i \quad (4.24)$$

### 3. Détermination de la quantité du sable nécessaire (S')

La composition du mortier du béton équivalent sera définie comme suit :

Constituant	Composition (g/l)
Ciment	C
Sable	S'
Superplastifiant	SP
Eau	E
Filler calcaire	FC

**Tableau 4.8** : Composition du MBE corrigé par le sable du béton.

La quantité S' est calculée d'une façon à compenser les quantités des granulats du béton (S, G<sub>3</sub>, G<sub>4</sub>). Cette compensation se traduit par le principe d'équivalence des surfaces développées :

$$SD(S')=SD(G_3+G_4)+SD(S) \quad (4.25)$$

La quantité du sable S' s'écrit :

$$S'=[SD(S').S]/SD(S) \quad (4.26)$$

#### IV.4 - Etude du retrait plastique du mortier de béton équivalent

##### IV.4.1 - Dispositif de fissuration utilisé pour la réalisation des essais

Le dispositif de fissuration pour mortier est une plaque carrée de 20cm de côté et d'épaisseur 1cm. le fond du moule est pourvu des barres de 0,5cm du diamètre pour orienter les fissures (figure 4.8) [11].



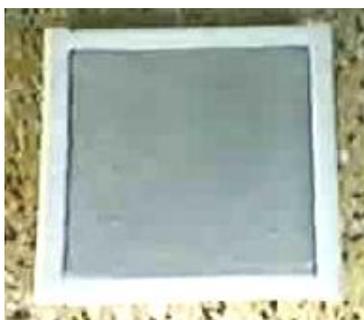
**Figure 4.8** : Dispositif de fissuration pour mortier.

Pour la méthode d'évaluation des déformations, on mesure les longueurs des fissures chaque une demi heure en utilisant la loupe et la règle.

#### IV.4.2 - Procédure de malaxage [11]

- 1) Placer le sable, le filler calcaire et le ciment dans la cuve du malaxeur à mortier,
- 2) ajouter l'eau,
- 3) malaxer pendant 1,5 min à vitesse lente,
- 4) racler les parois du moule avec la pale du malaxeur et ajouter le superplastifiant,
- 5) malaxer pendant 1,5 min à vitesse rapide.

Une fois le mortier est fabriqué, on le met dans le dispositif de fissuration (figure 4.9).



**Figure 4.9** : Dispositif de fissuration menu d'un mortier.

#### IV.4.3 - Conditions et procédures des essais

- a. Étude du retrait plastique dans les conditions naturelles du laboratoire (Température : 15°C, Humidité : 70% et Vent : 0),
- b. Étude du retrait plastique dans le cas du séchage à température élevée,
- c. Étude du retrait plastique dans le cas du séchage à température élevée suivi du vent chaud.

##### IV.4.3.1 - Étude du retrait plastique dans les conditions naturelles du laboratoire (Température : 15°C, Humidité : 70% et Vent : 0)

- **Remarque** Pour ces conditions là, on répète l'essai trois fois pour donner la validité aux résultats obtenus.

##### IV.4.3.1.1 - Description des essais

Pour chaque essai, on mesure les longueurs de toutes les fissures existantes chaque une demi heure en utilisant la règle et la loupe pour mieux voire les petites fissures, puis on inscrit les résultats dans un tableau (figure 4.10).



**Figure 4.10 :** Aspect agrandi d'une fissure à la fin d'essai.

#### **IV.4.3.2 - Étude du retrait plastique dans le cas du séchage à température élevée**

##### **IV.4.3.2.1 - Description des essais**

Pour étudier le retrait plastique dans le cas du séchage à température élevée, on a réalisé 3 essais :

Ø Essai 1 : Le dispositif menu du mortier est met dans un étuve à 30°C pendant 4 heures

(figure 4.11).

Ø Essai 2 : Le dispositif menu du mortier est met dans un étuve à 50°C pendant 3 heures.

Ø Essai 3 : Le dispositif menu du mortier est met dans un étuve à 70°C pendant 3 heures.

La mesure des longueurs de toutes les fissures existantes se fait chaque une demi heure.



**Figure 4.11 :** Insertion du dispositif menu du mortier dans l'étuve.

#### **IV.4.3.3 - Étude du retrait plastique dans le cas du séchage à température élevée suivi du vent chaud**

##### **IV.4.3.3.1 - Description des essais**

Le dispositif en mortier est met dans un étuve à une certaine température durant 2 heure et demi, suivie d'une excitation continue du vent chaud durant une demi heure par un séchoir qui a 3 vitesses

$V_1$ ,  $V_2$  et  $V_3$  avec  $V_1 < V_2 < V_3$  ( la distance entre le dispositif en mortier et la source en air chaud est environ 50cm ).

Pour mesurer les déformations plastiques dans le cas du séchage à température élevée suivi du vent chaud, on a réalisé 9 essais :

Essai 1 : Le dispositif en mortier est met dans un étuve à 30° durant 2 heure et demi, suivie d'une excitation du vent chaud  $V_1$  durant une demi heure (figure 4.12).

Essai 2 : Le dispositif en mortier est met dans un étuve à 30° durant 2 heure et demi, suivie d'une excitation du vent chaud  $V_2$  durant une demi heure. .

Essai 3 : Le dispositif en mortier est met dans un étuve à 30° durant 2 heure et demi, suivie d'une excitation du vent chaud  $V_3$  durant une demi heure.

Essai 4 : Le dispositif en mortier est met dans un étuve à 50° durant 2 heure et demi, suivie d'une excitation du vent chaud  $V_1$  durant une demi heure.

Essai 5 : Le dispositif en mortier est met dans un étuve à 50° durant 2 heure et demi, suivie d'une excitation du vent chaud  $V_2$  durant une demi heure. .

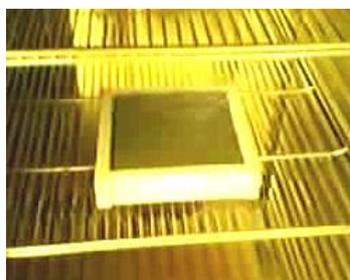
Essai 6 : Le dispositif en mortier est met dans un étuve à 50° durant 2 heure et demi, suivie d'une excitation du vent chaud  $V_3$  durant une demi heure.

Essai 7 : Le dispositif en mortier est met dans un étuve à 70° durant 2 heure et demi, suivie d'une excitation du vent chaud  $V_1$  durant une demi heure.

Essai 8 : Le dispositif en mortier est met dans un étuve à 70° durant 2 heure et demi, suivie d'une excitation du vent chaud  $V_2$  durant une demi heure.

Essai 9 : Le dispositif en mortier est met dans un étuve à 70° durant 2 heure et demi, suivie d'une excitation du vent chaud  $V_3$  durant une demi heure.

La mesure des longueurs de toutes les fissures existantes se fait toujours chaque une demi heure.



**Figure 4.12** : Exposition du mortier à température élevée et vent chaud.

# **CHAPITRE V**

## **Résultats et interprétations**

## V.1 - Résultats

### V.1.1 - Résultats d'essais sur granulats

#### Ø Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique établie pour chaque fraction des granulats roulés est représentée dans les tableaux 5.1, 5.2 et 5.3 :

<b>Gravier 8/15</b>			
<b>Poids de l'échantillon : 3000 (g)</b>			
Ouvertures des tamis (mm)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
16	740	24,67	75,33
12,5	1898,5	63,28	36,72
10	2678	89,27	10,73
8	2944	98,13	1,87
6,3	2982,5	99,42	0,58
Fond du tamis	2999,5	99,98	0,02

**Tableau 5.1 :** Analyse granulométrique du gravier 8/15.

<b>Gravier 3/8</b>			
<b>Poids de l'échantillon : 2000 (g)</b>			
Ouvertures des tamis (mm)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
8	419	20,95	79,05
6,3	971,5	48,58	51,42
5	1612	80,60	19,4
2,5	1984,5	99,23	0,77
1,25	1995	99,75	0,25
0,5	1995	99,75	0,25
Fond du tamis	1995,5	99,78	0,22

**Tableau 5.2 :** Analyse granulométrique du gravier 3/8.

<b>Sable 0/3</b>			
<b>Poids de l'échantillon : 1500 (g)</b>			
<b>Ouvertures des tamis (mm)</b>	<b>Refus cumulé (g)</b>	<b>Refus cumulé (%)</b>	<b>Tamisât (%)</b>
5	1,80	0,12	99,88
2	151	10,07	89,93
1,25	482,70	32,18	67,82
0,63	844	56,27	43,73
0,315	1242,60	82,84	17,16
0,16	1466,70	97,78	2,22
0,08	1483,70	98,91	1,09
Fond du tamis	1498,30	99,98	0,11

**Tableau 5.3 :** Analyse granulométrique du sable 0/3.

- Remarque** Selon l'analyse granulométrique précédente des granulats, nous remarquons que la quantité des grains dont le diamètre dépasse 16mm pour le gravier 8/15, 8mm pour le gravier 3/8 est assez importante tandis que le sable 0/3 a une proportion très faible des grains dont le diamètre dépasse 5mm. Donc pour mettre les granulats disponibles au niveau du laboratoire de la Faculté du Génie de la Construction, suivant les dimensions, 8/15, 3/8 et 0/3, il faut éliminer dans les granulats, les grains dont le diamètre dépasse 16mm pour le gravier 8/15, 8mm pour le gravier 3/8 et 5mm pour le sable 0/3. L'analyse granulométrique obtenue pour chaque fraction est représentée dans les tableaux 5.4, 5.5 et 5.6 :

<b>Gravier 8/15</b>		
<b>Ouvertures des tamis (mm)</b>	<b>Refus cumulé (%)</b>	<b>Tamisât (%)</b>
16	0	100
12,5	51,26	48,74
10	85,75	14,25
8	97,52	2,48
6,3	99,23	0,77
Fond du tamis	99,98	0,02

**Tableau 5.4 :** Analyse granulométrique du gravier 8/15.

Gravier 3/8		
Ouvertures des tamis (mm)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
8	0	100
6,3	34,95	65,05
5	75,46	24,54
2,5	99,02	0,98
1,25	99,68	0,32
0,5	99,68	0,32
Fond du tamis	99,72	0,28

Tableau 5.5 : Analyse granulométrique du gravier 3/8.

Sable 0/3		
Ouvertures des tamis (mm)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
5	0	100
2	9,96	90,04
1,25	32,10	67,90
0,63	56,21	43,79
0,315	82,82	17,18
0,16	97,78	2,22
0,08	98,91	1,09
Fond du tamis	99,89	0,11

Tableau 5.6 : Analyse granulométrique du sable 0/3.

#### Ø Densités (absolues et apparentes) des granulats

Granulat	Gravier 8/15	Gravier 3/8	Sable 0/3
Densité absolue	2,63	2,64	2,60
Densité apparente	1,32	1,38	1,5

Tableau 5.7 : Densités apparente et absolue des granulats.

### Ø Module de finesse du sable

Le tableau 5.8 présente le résultat obtenu :

Granulat	Sable 0/3	Spécifications
<b>Module de finesse <math>M_f</math></b>	2,7	2,8 < $M_f$ < 3,2 ; sable grossier 2,2 < $M_f$ < 2,8 ; sable moyen 1,8 < $M_f$ < 2,2 ; sable fin

**Tableau 5.8 :** Module de finesse du sable.

### Ø Equivalent du sable

L'essai a donné le résultat présenté dans le tableau 5.9 :

Granulat	Sable 0/3
<b>Equivalent de sable (%)</b>	75

**Tableau 5.9 :** Valeur de l'équivalent du sable.

### V.1.2 - Résultat de formulation du béton autoplaçant

On a obtenu la formulation suivante (tableau 5.10) :

Composant	Composant (l/m <sup>3</sup> )	Densité absolue	Composant (kg/m <sup>3</sup> )
Gravier 8/15	138,35	2,63	363,86
Gravier 3/8	138,35	2,64	365,24
Sable 0/3	345,85	2,60	899,21
Ciment	129,03	3,1	400
Superplastifiant 1,6%C	5,98	1,07	6,4
Filler de calcaire	44,44	2,70	120
Eau	200	1	200

**Tableau 5.10 :** La composition du béton autoplaçant.

### V.1.3 - Résultats d'essais sur le béton frais

#### V.1.3.1 - Essai au cône d'Abrams

Le résultat obtenu de cet essai est présenté dans le tableau 5.11 :

Béton	Béton autoplaçant
<b>Étalement (cm)</b>	70
<b>Affaissement (cm)</b>	Affaissement total
<b>Vitesse d'étalement <math>V_e</math>(cm/s)</b>	12,5

**Tableau 5.11** : Résultat d'essai au cône d'Abrams.

On voit que l'étalement est acceptable dans cet essai ( $60 \leq \text{Étalement} \leq 75$ ).

#### V.1.3.2 - Essai à la boîte en L

Le résultat d'essai effectué sur le béton autoplaçant est représenté dans le tableau 5.12 :

Béton	Béton autoplaçant
<b>La hauteur <math>H_1</math> (cm)</b>	9,5
<b>La hauteur <math>H_2</math> (cm)</b>	7,7
<b>Capacité de remplissage (<math>H_2/H_1</math>)</b>	0,81

**Tableau 5.12** : Résultats de l'essai à la boîte en L.

On voit que la valeur du rapport ( $H_2/H_1$ ) est respectée ( $H_2/H_1 \geq 0,8$ ).

#### V.1.3.3 - Essai de la stabilité au tamis

Le résultat d'essai effectué sur le béton autoplaçant est représenté dans le tableau 5.13 :

Béton	Béton autoplaçant
<b>Poids de laitance (%)</b>	8

**Tableau 5.13** : Résultat d'essai de stabilité au tamis.

On voit que le pourcentage en poids de laitance dans le récipient est acceptable dans cet essai ( $0\% \leq \text{Plaitance} \leq 15\%$ ).

- **Remarque** Les trois conditions de l'association Française de génie civil à l'état frais sont respectées, donc le béton testé est un béton autoplaçant.

## V.1.4 - Résultats d'essais sur le béton durci

### V.1.4.1 - Essais de compression

Les essais effectués sur le béton à différents âges (7,15 et 28 jours) ont donné les résultats présentés dans le tableau 5.14 :

Béton	Résistance à la compression (MPa)	Résistance à la compression (MPa)	Résistance à la compression (MPa)
	7 jours	15 jours	28 jours
Béton autoplaçant	30,97	35,54	39,04

**Tableau 5.14 :** Résistance à la compression du béton autoplaçant.

On constate que le béton autoplaçant testé a un meilleur comportement à la compression.

### V.1.4.2 - Essais de traction par flexion

Les essais effectués sur les bétons à différents âges (7, 15 et 28 jours) ont donné les résultats présentés dans le tableau 5.15 :

Béton	Résistance à la traction (MPa)	Résistance à la traction (MPa)	Résistance à la traction (MPa)
	7 jours	15 jours	28 jours
Béton autoplaçant	3,10	3,58	3,91

**Tableau 5.15 :** Résistance à la traction du béton autoplaçant.

On remarque que le béton autoplaçant testé a un meilleur comportement à la traction par rapport au béton ordinaire, même au jeune âge. On note que la résistance à la traction représente à peu près le 1/10<sup>ème</sup> de la résistance à la compression, ces résultats permettent de vérifier la cohérence des résultats et de valider les essais mécaniques.

- **Récapitulatif des résultats**

Le tableau 5.16 est un récapitulatif des performances du béton autoplaçant à l'état frais et durci :

Béton	Étalement (cm)	(H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub> )	Laitier (%)	Résistance à la compression (MPa) 7 jours	Résistance à la compression (MPa) 15 jours	Résistance à la compression (MPa) 28 jours
Béton autoplaçant	70	0,81	8	30,97	35,54	39,04

**Tableau 5.16 :** Récapitulatif des résultats d'essais effectués sur le béton autoplaçant.

### V.1.5 - Résultats d'application de la technique du mortier de béton équivalent «MBE»

#### V.1.5.1 - Les surfaces développées par les gravillons

##### A/ Granulométrie du mélange des gravillons du béton :

Les résultats de calcul sont représentés dans le tableau 5.17 :

Diamètre des tamis pour le mélange (mm)	Le passant r <sub>i</sub> (%)	Le refus R <sub>i</sub> (%)
16	100	0
12,5	74,42	25,58
10	82,79	17,21
8	94,13	5,87
6,3	81,64	18,36
5	29,80	70,20
2,5	38,29	61,71
1,25	49,76	50,24
0,5	50,09	49,91

**Tableau 5.17 :** Granulométrie du mélange.

La masse volumique du mélange est :

$$\mu_g = 2635,01 \text{ (g/l)}$$

**B / Définition des tranches granulaires successives dans ce mélange :**

Les tamis à considérer sont les suivants :

16/12,5/10/8/6,3/5/2,5/1,25/0,5mm.

**C / La masse de chaque tranche granulaire :**

Les résultats du calcul sont représentés dans le tableau 5.18 :

La tranche $T_i$	La masse de tranche (g)
$T_{12,5}$	186,50
$T_{10}$	61,03
$T_8$	82,68
$T_{6,3}$	91,06
$T_5$	377,97
$T_{2,5}$	61,90
$T_{1,25}$	83,63
$T_{0,5}$	2,41

**Tableau 5.18 :** Masse des tranches granulaires.

**D / Diamètre, volume et surface de la particule moyenne dans chaque tranche granulaire :**

Les résultats de calcul sont représentés dans le tableau 5.19 :

Le diamètre de la particule moyenne $d_{moy}(\text{mm})$	Le volume de la particule moyenne $v_{moy}(\text{mm}^3)$	La surface de la particule moyenne $s_{moy}(\text{mm}^2)$
14,25	1515,11	637,94
11,25	745,51	397,61
9	381,70	254,47
7,15	191,39	160,61
5,65	94,44	100,29
3,75	27,61	44,18
1,88	3,48	11,10
0,88	0,36	2,43

**Tableau 5.19 :** Diamètre, volume et surface de la particule moyenne dans chaque tranche granulaire.

**E / Volume massique de la matrice du gravillon du mélange :**

Le volume massique de la matrice du gravillon du mélange est :

$$\omega=0,00038(\text{l/g})$$

F / Volumes, nombres et surfaces développées de l'ensemble des particules moyennes dans chaque tranche :

Les résultats de calcul sont représentés dans le tableau 5.20 :

La tranche $T_i$	Le volume total de l'ensemble des particules dans la tranche granulaire $v_i(l)$	Le nombre de particules moyennes dans chaque tranche granulaire $N_i$	Calcul de la surface développée par les particules moyennes dans chaque tranche granulaire $s_i$ (mm <sup>2</sup> )
$T_{12,5}$	0,071	46,86	29893,87
$T_{10}$	0,023	30,85	12266,27
$T_8$	0,031	81,22	20668,05
$T_{6,3}$	0,035	182,87	29370,75
$T_5$	0,14	1482,42	148671,90
$T_{2,5}$	0,024	869,25	38403,47
$T_{1,25}$	0,032	9195,4	102068,94
$T_{0,5}$	0,00092	2555,56	6210,01

**Tableau 5.20 :** Volumes, nombres et surfaces développées de l'ensemble des particules moyennes dans chaque tranche.

G / La somme de l'ensemble des surfaces calculées pour chaque tranche granulaire du mélange de gravillon :

La somme de l'ensemble des surfaces calculées pour chaque tranche granulaire du mélange de gravillon représente la surface développée de l'ensemble des gravillons :

$$SD=387553,26\text{mm}^2$$

### V.1.5.2 - Les surfaces développées par les grains du sable

A / La granulométrie du sable du béton :

Les résultats de calcul sont représentés dans le tableau 5.21 :

Diamètre des tamis pour le sable (mm)	Le passant $r_i$ (%)	Le refus $R_i$ (%)
5	100	0
2	90,04	9,96
1,25	77,86	22,14
0,63	75,89	24,11
0,315	73,39	26,61
0,16	85,04	14,96
0,08	98,87	1,13

**Tableau 5.21 :** Granulométrie du sable du béton.

**B / Définition des tranches successives du sable :**

Les tamis à considérer sont les suivants :

5/2/1,25/0,63/0,315/0,16/0,08mm.

**C / La masse de chaque tranche du sable :**

Les résultats de calcul sont représentés dans le tableau 5.22 :

La tranche $T_i$	La masse de tranche (g)
$T_2$	89,57
$T_{1,25}$	199,10
$T_{0,63}$	216,81
$T_{0,315}$	239,21
$T_{0,16}$	134,53
$T_{0,08}$	10,16

**Tableau 5.22 :** Masses des tranches du sable.

**D / Diamètre, volume et surface de la particule moyenne dans chaque tranche du sable :**

Les résultats de calcul sont représentés dans le tableau 5.23 :

Le diamètre de la particule moyenne $d_{\text{moy}}$ (mm)	Le volume de la particule moyenne $v_{\text{moy}}$ (mm <sup>3</sup> )	La surface de la particule moyenne $s_{\text{moy}}$ (mm <sup>2</sup> )
3,5	22,45	38,48
1,625	2,25	8,30
0,94	0,43	2,78
0,4725	0,055	0,70
0,2375	0,0070	0,18
0,12	0,00090	0,045

**Tableau 5.23 :** Diamètre, volume et surface de la particule moyenne dans chaque tranche du sable.

E / Volume massique du sable :

Le volume massique du sable est :

$$\omega = 0,00038 \text{ (l/g)}$$

F / Volumes, nombres et surfaces développées de l'ensemble des particules moyennes dans chaque tranche :

Les résultats de calcul sont représentés dans le tableau 5.24 :

La tranche $T_i$	Le volume total de l'ensemble des particules dans la tranche du sable $v_i$ (l)	Le nombre de particules moyennes dans chaque tranche du sable $N_i$	Calcul de la surface développée par les particules moyennes dans chaque tranche granulaire $s_i$ (mm <sup>2</sup> )
$T_2$	0,034	1514,48	58277,19
$T_{1,25}$	0,076	33777,78	280355,57
$T_{0,63}$	0,082	190697,67	530139,52
$T_{0,315}$	0,091	1654545,46	1158181,82
$T_{0,16}$	0,051	7285714,29	1311428,57
$T_{0,08}$	0,0039	4333333,33	195000

**Tableau 5.24 :** Volumes, nombres et surfaces développées de l'ensemble des particules moyennes dans chaque tranche.

G / Somme de l'ensemble des surfaces calculées pour chaque tranche du sable du béton :

La somme de l'ensemble des surfaces calculées pour chaque tranche représente la surface totale développée du sable :

$$SD=3533382,67\text{mm}^2$$

### V.1.5.3 - La quantité du sable nécessaire (S') dans le mortier

La quantité du sable S' est :

$$S'=1000(\text{g/l})$$

### V.1.6 - Composition du mortier de béton équivalent «MBE»

Après la prise en compte des conditions citées au paragraphe IV.3, la composition du mortier de béton équivalent sera comme suit :

Constituant	Poids volumique (g/l)	Volume (ml)
Sable	1000	384,62
Ciment	587,30	189,45
Filler calcaire	341,01	126,30
Eau	293,65	293,65
Superplastifiant	6,4	5,98

**Tableau 5.25 :** Composition du mortier de béton équivalent.

#### V.1.6.1 - Composition du mortier occupant le dispositif

Volume de mortier occupant le dispositif:  $20 \times 20 \times 1 = 400 \text{cm}^3 = 0,4(1)$ .

Constituant	Poids (g)
Sable	400
Ciment	234,92
Filler calcaire	136,40
Eau	117,46
Superplastifiant	2,56

**Tableau 5.26 :** Composition du mortier occupant le dispositif de fissuration.

### V.1.7 - Résultats d'essais du retrait plastique du MBE

#### V.1.7.1 - Le retrait plastique dans les conditions naturelles du laboratoire

(Température : 15°C, Humidité : 70% et Vent : 0)

- **Essai 1** : Les résultats du premier essai sont inscrits dans le tableau suivant :

Le temps $T_i$ (h)	Les fissures ( $F_i$ )	Le lieu dans le dispositif expérimental	La longueur (cm)	Déformation totale (cm)
$T_1=0$	0	/	/	0
$T_2=5$	0	/	/	0
$T_3=5,50$	$F_1 ; F_2 ; F_3$	Milieu ; Coté ; Milieu	12 ; 1,8 ; 7,2	21
$T_4=6,00$	$F_1 ; F_2 ; F_3$ $F_4$	Milieu ; Coté ; Milieu Coté	13,5 ; 1,8 ; 7,6 2,1	25
$T_5=6,50$	$F_1 ; F_2 ; F_3$ $F_4$	Milieu ; Coté ; Milieu Coté	13,5 ; 1,8 ; 10,5 2,1	27,9
$T_6=7,00$	$F_1 ; F_2 ; F_3$ $F_4$	Milieu ; Coté ; Milieu Coté	14,8 ; 3 ; 11 2,2	31
$T_7=7,50$	$F_1 ; F_2 ; F_3$ $F_4$	Milieu ; Coté ; Milieu Coté	14,8 ; 3 ; 12 2,2	31,9
$T_8=8,00$	$F_1 ; F_2 ; F_3$ $F_4$	Milieu ; Coté ; Milieu Coté	14,8 ; 3 ; 12 2,2	31,9

**Tableau 5.27** : Résultats du premier essai.

- **Essai 2** : Les résultats du deuxième essai sont inscrits dans le tableau suivant :

Le temps $T_i$ (h)	Les fissures ( $F_i$ )	Le lieu dans le dispositif expérimental	La longueur (cm)	Déformation totale (cm)
$T_1=0$	0	/	/	0
$T_2=4,5$	0	/	/	0
$T_3=5,00$	$F_1 ; F_2 ; F_3$	Milieu ; Milieu ; Milieu	10 ; 6,5 ; 2,5	19
$T_4=5,50$	$F_1 ; F_2 ; F_3$	Milieu ; Milieu ; Milieu	11,1 ; 7,2 ; 4,6	22,9
$T_5=6,00$	$F_1 ; F_2 ; F_3$	Milieu ; Milieu ; Milieu	12,8 ; 7,9 ; 6,2	26,9
$T_6=6,50$	$F_1 ; F_2 ; F_3$	Milieu ; Milieu ; Milieu	14,8 ; 9,4 ; 6,8	31
$T_7=7,00$	$F_1 ; F_2 ; F_3$	Milieu ; Milieu ; Milieu	15,6 ; 11,1 ; 7,1	33,8
$T_8=7,50$	$F_1 ; F_2 ; F_3$	Milieu ; Milieu ; Milieu	15,9 ; 12,2 ; 7,9	36
$T_9=8,00$	$F_1 ; F_2 ; F_3$	Milieu ; Milieu ; Milieu	15,9 ; 12,2 ; 7,9	36

**Tableau 5.28** : Résultats du deuxième essai.

- **Essai 3** : Les résultats du troisième essai sont inscrits dans le tableau suivant :

Le temps $T_i$ (h)	Les fissures ( $F_i$ )	Le lieu dans le dispositif expérimental	La longueur (cm)	Déformation totale (cm)
$T_1=0$	0	/	/	0
$T_2=4,5$	0	/	/	0
$T_3=5,00$	$F_1 ; F_2 ; F_3$ $F_4$	Coté ; Milieu ; Milieu Coté	4 ; 7,2 ; 2,1 1,6	14,9
$T_4=5,50$	$F_1 ; F_2 ; F_3$ $F_4$	Coté ; Milieu ; Milieu Coté	4 ; 7,5 ; 4,8 2,7	19
$T_5=6,00$	$F_1 ; F_2 ; F_3$ $F_4$	Coté ; Milieu ; Milieu Coté	4,1 ; 7,7 ; 5,6 5,1	22,5
$T_6=6,50$	$F_1 ; F_2 ; F_3$ $F_4$	Coté ; Milieu ; Milieu Coté	5,4 ; 8,2 ; 6,7 5,7	26
$T_7=7,00$	$F_1 ; F_2 ; F_3$ $F_4$	Coté ; Milieu ; Milieu Coté	6,3 ; 9,4 ; 6,7 6,1	28,5
$T_8=7,50$	$F_1 ; F_2 ; F_3$ $F_4$	Coté ; Milieu ; Milieu Coté	6,9 ; 10,2 ; 6,7 6,1	29,9
$T_9=8,00$	$F_1 ; F_2 ; F_3$ $F_4$	Coté ; Milieu ; Milieu Coté	6,9 ; 10,2 ; 6,7 6,1	29,9

**Tableau 5.29** : Résultats du troisième essai.

### V.1.7.2 - Le retrait plastique dans le cas du séchage à température élevée

- **Essai 1** : Les résultats du premier essai sont inscrits dans le tableau suivant :

Le temps $T_i$ (h)	Les fissures ( $F_i$ )	Le lieu dans le dispositif expérimental	La longueur (cm)	Déformation totale (cm)
$T_1=0$	0	/	/	0
$T_2=0,5$	0	/	/	0
$T_3=1$	0	/	/	0
$T_4=1,50$	$F_1 ; F_2$	Milieu ; Milieu	1,1 ; 5,9	7
$T_5=2$	$F_1 ; F_2$	Milieu ; Milieu	7 ; 13	20
$T_6=2,50$	$F_1 ; F_2 ; F_3$	Milieu ; Milieu ; Coté	1,1 ; 14 ; 0,9	25
$T_7=3$	$F_1 ; F_2 ; F_3$	Milieu ; Milieu ; Coté	11 ; 14,1 ; 0,9	26
$T_8=3,50$	$F_1 ; F_2 ; F_3$ $F_4 ; F_5$	Milieu ; Milieu ; Coté Coté ; Coté	11 ; 15,5 ; 7,4 1,2 ; 0,8	35,9
$T_9=4,00$	$F_1 ; F_2 ; F_3$ $F_4 ; F_5 ; F_6$ $F_7 ; F_8 ; F_9$ $F_{10}$	Milieu ; Milieu ; Coté Coté ; Coté ; Coté Coté ; Coté ; Coté Coté	11 ; 15,5 ; 12,5 3,3 ; 1,7 ; 1,7 0,9 ; 2,7 ; 1 4,7	55

**Tableau 5.30** : Résultats du premier essai.

- **Essai 2** : Les résultats du deuxième essai sont inscrits dans le tableau suivant :

Le temps $T_i$ (h)	Les fissures ( $F_i$ )	Le lieu dans le dispositif expérimental	La longueur (cm)	Déformation totale (cm)
$T_1=0$	0	/	/	0
$T_2=0,5$	0	/	/	0
$T_3=1$	0	/	/	0
$T_4=1,50$	$F_1 ; F_2$	Coté ; Coté	6,5 ; 3,5	10
$T_5=2$	$F_1 ; F_2 ; F_3$ $F_4 ; F_5 ; F_6$ $F_7 ; F_8 ; F_9$ $F_{10} ; F_{11}$	Coté ; Coté ; Milieu Milieu ; Milieu ; Milieu Milieu ; Milieu ; Milieu Milieu ; Milieu	8,5 ; 4 ; 5,5 1,7 ; 3,5 ; 3,6 1,2 ; 1,4 ; 1,5 7,5 ; 7	45,4
$T_6=2,50$	$F_1 ; F_2 ; F_3$ $F_4 ; F_5 ; F_6$ $F_7 ; F_8 ; F_9$ $F_{10} ; F_{11} ; F_{12}$ $F_{13} ; F_{14}$	Coté ; Coté ; Milieu Milieu ; Milieu ; Milieu Milieu ; Milieu ; Milieu Milieu ; Milieu ; Coté Coté ; Coté	9,1 ; 5,2 ; 6 2,1 ; 3,8 ; 3,9 2,3 ; 3,4 ; 1,5 8,1 ; 8,7 ; 8,3 2,6 ; 2,9	68
$T_7=3$	$F_1+F_2$ $F_3+F_4+F_5+F_6+F_7$ $F_8+F_9$ $F_{10}+F_{11}$ $F_{12} ; F_{13} ; F_{14}$ $F_{15} ; F_{16} ; F_{17}$ $F_{18}$	Coté Milieu Milieu Milieu Milieu ; Coté ; Coté Coté ; Coté ; Coté Coté	17,1 18,3 6,4 16,8 8,6 ; 2,8 ; 3,4 1,9 ; 1,6 ; 1,9 2,6	81,4

**Tableau 5.31** : Résultats du deuxième essai.

- **Essai 3** : Les résultats du troisième essai sont inscrits dans le tableau suivant :

Le temps $T_i$ (h)	Les fissures ( $F_i$ )	Le lieu dans le dispositif expérimental	La longueur (cm)	Déformation totale (cm)
$T_1=0$	0	/	/	0
$T_2=0,5$	0	/	/	0
$T_3=1$	0	/	/	0
$T_4=1,5$	$F_1 ; F_2 ; F_3$ $F_4 ; F_5 ; F_6$ $F_7$	Milieu ; Coté ; Milieu Milieu ; Milieu ; Milieu Milieu	6,1 ; 4,5 ; 6,9 5,2 ; 3,5 ; 6,6 3,2	35
$T_5=2$	$F_1 ; F_2 ; F_3$ $F_4 ; F_5 ; F_6$ $F_7 ; F_8 ; F_9$	Milieu ; Coté ; Milieu Milieu ; Milieu ; Milieu Milieu ; Coté ; Milieu	11,8 ; 10,6 ; 8,7 5,9 ; 5,3 ; 7,2 6,8 ; 6 ; 6,7	69
$T_6=2,5$	$F_1 ; F_2 ; F_3$ $F_4 ; F_5 ; F_6$ $F_7 ; F_8 ; F_9$ $F_{10} ; F_{11} ; F_{12}$ $F_{13}$	Milieu ; Coté ; Milieu Milieu ; Milieu ; Milieu Milieu ; Coté ; Milieu Coté ; Coté ; Coté Coté	12,6 ; 11,7 ; 9,3 7,2 ; 6,9 ; 8 7,6 ; 6,1 ; 7,3 8,9 ; 6,6 ; 3,4 4,4	100
$T_7=3,00$	$F_1 ; F_2 ; F_3$ $F_4 ; F_5 ; F_6$ $F_7 ; F_8 ; F_9$ $F_{10}$ $F_{11}+F_{12}+F_{13}$	Milieu ; Coté ; Milieu Milieu ; Milieu ; Milieu Milieu ; Coté ; Milieu Coté Coté	17 ; 12,8 ; 15,2 11,9 ; 7,3 ; 8,5 8,1 ; 9,1 ; 10,1 12,4 17,5	129,9

**Tableau 5.32** : Résultats du troisième essai.

### V.1.7.3 - Le retrait plastique dans le cas du séchage à température élevée suivi du vent chaud

- **Essai 1** : Les résultats du premier essai sont inscrits dans le tableau suivant :

Le temps $T_i$ (h)	Les fissures ( $F_i$ )	Le lieu dans le dispositif expérimental	La longueur (cm)	Déformation totale (cm)
$T_1=0$	0	/	/	0
$T_2=3$	$F_1 ; F_2 ; F_3$	Coté ; Milieu ; Milieu	13 ; 14,1 ; 7,8	34,9

**Tableau 5.33**: Résultats du premier essai.

- **Essai 2** : Les résultats du deuxième essai sont inscrits dans le tableau suivant :

Le temps $T_i$ (h)	Les fissures ( $F_i$ )	Le lieu dans le dispositif expérimental	La longueur (cm)	Déformation totale (cm)
$T_1=0$	0	/	/	0
$T_2=3$	$F_1 ; F_2 ; F_3$ $F_4 ; F_5$	Coté ; Milieu ; Milieu Milieu ; Coté	15,3 ; 13,1 ; 7,8 6,3 ; 2,5	45

**Tableau 5.34** : Résultats du deuxième essai.

- **Essai 3** : Les résultats du troisième essai sont inscrits dans le tableau suivant :

Le temps $T_i$ (h)	Les fissures ( $F_i$ )	Le lieu dans le dispositif expérimental	La longueur (cm)	Déformation totale (cm)
$T_1=0$	0	/	/	0
$T_2=3$	$F_1 ; F_2 ; F_3$ $F_4 ; F_5 ; F_6$ $F_7 ; F_8 ; F_9$	Coté ; Milieu ; Milieu Milieu ; Milieu ; Milieu Milieu ; Milieu ; Coté	15,5 ; 5,1 ; 6,2 3,1 ; 3,5 ; 2,7 6,5 ; 12,5 ; 1,7	56,8

**Tableau 5.35** : Résultats du troisième essai.

- **Essai 4** : Les résultats du quatrième essai sont inscrits dans le tableau suivant :

Le temps $T_i$ (h)	Les fissures ( $F_i$ )	Le lieu dans le dispositif expérimental	La longueur (cm)	Déformation totale (cm)
$T_1=0$	0	/	/	0
$T_2=3$	$F_1 ; F_2 ; F_3$ $F_4 ; F_5 ; F_6$ $F_7 ; F_8 ; F_9$	Milieu ; Milieu ; Coté Milieu ; Coté ; Milieu Coté ; Milieu ; Coté	11,5 ; 15,1 ; 10,2 7,3 ; 9,5 ; 5,7 9,5 ; 12,5 ; 10,8	92,1

**Tableau 5.36** : Résultats du quatrième essai.

- **Essai 5** : Les résultats du cinquième essai sont inscrits dans le tableau suivant :

Le temps $T_i$ (h)	Les fissures ( $F_i$ )	Le lieu dans le dispositif expérimental	La longueur (cm)	Déformation totale (cm)
$T_1=0$	0	/	/	0
$T_2=3$	$F_1 ; F_2 ; F_3$ $F_4 ; F_5 ; F_6$ $F_7 ; F_8 ; F_9$ $F_{10}$	Coté ; Milieu ; Coté Milieu ; Coté ; Coté Coté ; Milieu ; Milieu Coté	7,5 ; 9,1 ; 14,2 16,3 ; 9,5 ; 11,7 7,3 ; 14,6 ; 9,7 2,7	102,6

**Tableau 5.37** : Résultats du cinquième essai.

- **Essai 6** : Les résultats du sixième essai sont inscrits dans le tableau suivant :

Le temps $T_i$ (h)	Les fissures ( $F_i$ )	Le lieu dans le dispositif expérimental	La longueur (cm)	Déformation totale (cm)
$T_1=0$	0	/	/	0
$T_2=3$	$F_1 ; F_2 ; F_3$ $F_4 ; F_5 ; F_6$ $F_7 ; F_8 ; F_9$ $F_{10} ; F_{11} ; F_{12}$	Milieu ; Milieu ; Milieu Milieu ; Coté ; Milieu Coté ; Milieu ; Coté Coté ; Coté ; Milieu	6,9 ; 10,5 ; 17,2 11,3 ; 7,9 ; 12,8 8,3 ; 14,6 ; 10,7 5,4 ; 6,2 ; 8,5	120,3

**Tableau 5.38** : Résultats du sixième essai.

- **Essai 7** : Les résultats du septième essai sont inscrits dans le tableau suivant :

Le temps $T_i$ (h)	Les fissures ( $F_i$ )	Le lieu dans le dispositif expérimental	La longueur (cm)	Déformation totale (cm)
$T_1=0$	0	/	/	0
$T_2=3$	$F_1 ; F_2 ; F_3$ $F_4 ; F_5 ; F_6$ $F_7 ; F_8 ; F_9$ $F_{10} ; F_{11} ; F_{12}$ $F_{13} ; F_{14}$	Milieu ; Coté ; Milieu Milieu ; Coté ; Milieu Coté ; Milieu ; Coté Coté ; Coté ; Milieu Milieu ; Milieu	11,9 ; 15,5 ; 17,2 8,4 ; 4,9 ; 12,8 3,3 ; 12,6 ; 10,7 8,6 ; 9,9 ; 8,5 10,8 ; 5,5	140,6

**Tableau 5.39** : Résultats du septième essai.

- **Essai 8** : Les résultats du huitième essai sont inscrits dans le tableau suivant :

Le temps $T_i$ (h)	Les fissures ( $F_i$ )	Le lieu dans le dispositif expérimental	La longueur (cm)	Déformation totale (cm)
$T_1=0$	0	/	/	0
$T_2=3$	$F_1 ; F_2 ; F_3$ $F_4 ; F_5 ; F_6$ $F_7 ; F_8 ; F_9$ $F_{10} ; F_{11} ; F_{12}$ $F_{13}$	Coté ; Coté ; Milieu Coté ; Coté ; Coté Milieu ; Milieu ; Coté Milieu ; Coté ; Milieu Coté	12,9 ; 14 ; 16,1 9,4 ; 8,6 ; 11,7 7,6 ; 13,2 ; 11,7 8,6 ; 9,9 ; 14,5 10,8	149

**Tableau 5.40** : Résultats du huitième essai.

- **Essai 9** : Les résultats du neuvième essai sont inscrits dans le tableau suivant :

Le temps $T_i$ (h)	Les fissures ( $F_i$ )	Le lieu dans le dispositif expérimental	La longueur (cm)	Déformation totale (cm)
$T_1=0$	0	/	/	0
$T_2=3$	$F_1 ; F_2 ; F_3$ $F_4 ; F_5 ; F_6$ $F_7 ; F_8 ; F_9$ $F_{10} ; F_{11} ; F_{12}$ $F_{13} ; F_{14} ; F_{15}$	Coté ; Milieu ; Milieu Coté ; Milieu ; Milieu Coté ; Coté ; Coté Milieu ; Coté ; Coté Milieu ; Milieu ; Coté	10,1 ; 9,7 ; 8,3 15,5 ; 14,6 ; 17,4 7,6 ; 10,2 ; 6,9 16,6 ; 9,9 ; 11,5 10,8 ; 8,4 ; 4,2	161,7

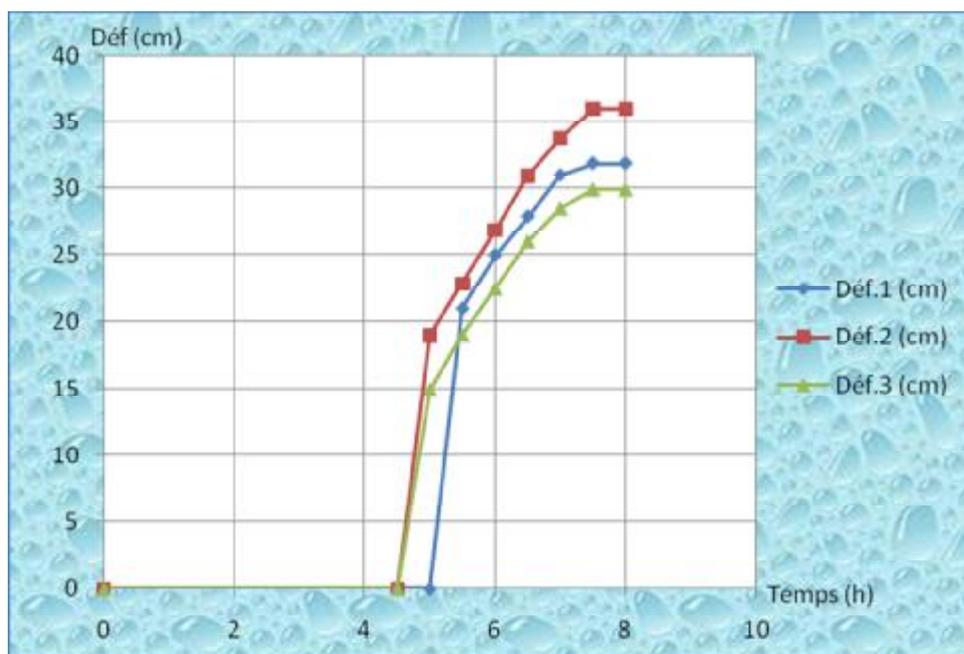
**Tableau 5.41** : Résultats du neuvième essai.

## V.2 - Interprétations

### V.2.1 - Interprétations des résultats d'essais du retrait plastique du MBE

#### V.2.1.1 - Le retrait plastique dans les conditions naturelles du laboratoire (Température : 15°C, Humidité : 70% et Vent : 0)

##### V.2.1.1.1 - La mise en graphe des résultats obtenus (figure 5.1)



**Figure 5.1** : Déformation (fissuration) du mortier dans les conditions naturelles du laboratoire (Température : 15°C, Humidité : 70% et Vent : 0).

##### V.2.1.1.2 - Description de graphe

Selon la figure précédente, on voit que la fissuration au cours du temps est lente et faible, alors l'apparition des fissures (on les appelle ; les fissures précoces) commence au minimum à partir de 4 heures et demi, ensuite après une demi heure du temps, on voit un développement remarquable et brusque des fissures mais avec le temps cette évolution va diminuer jusqu'à ce qu'elle devient inexistante.

Généralement dans les conditions là, on peut dire :

- Ü Les fissures sur mortier prennent beaucoup du temps pour s'apparaître,
- Ü le développement des fissures au cours du temps reste très faible.

### V.2.1.1.3 - Interprétation et conclusion

L'apparition retardataire et le développement faible des fissures s'expliquent comme suit :

- a. Phase 1 ;  $T_1=0$  à  $T_3=4,5$ (h) :** On l'appelle la phase dormante. Alors juste après le coulage, les grains du 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. Au cours de cette consolidation, l'eau est contrainte de percoler vers la surface. Il se forme alors une couche très fine d'eau, appelée eau de ressuage. 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 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, que nous nommons "tassement" avec aucune déformation horizontale. La durée de cette phase est lente à de l'inexistence d'un coefficient de l'évaporation [11].

- b. Phase 2 ;  $T_1=4,5$  à  $T_3=8$ (h) :** En un point donné de la pâte, le volume de l'eau doit augmenter pour compenser la perte de volume due au retrait chimique. Lorsque le débit de l'eau arrivant en ce point est trop faible, la pression de l'eau diminue, jusqu'à atteindre la pression de vapeur saturante. L'eau se transforme alors en vapeur et c'est le volume de gaz formé qui vient compenser le retrait chimique. Les pores deviennent donc le lieu d'interfaces liquide/vapeur, qui génère une pression capillaire. La pression de l'eau continue de diminuer avec l'hydratation : on parle d'autodessiccation. La pression capillaire engendre des efforts sur le squelette solide qui le compriment.

L'échéance à laquelle apparaît la composante horizontale du retrait se situe, à première vue, après le début de prise. Une diminution importante de la pression de l'eau suppose en effet un squelette suffisamment rigide. Pour des pâtes de ciment de faible rapport E/C (inférieur à 0,35), les mesures montrent cependant que le retrait endogène se trouve rapidement inférieur au retrait chimique, dès qu'un seuil de percolation de la phase solide apparaît. Cela signifierait que l'autodessiccation, et donc le retrait horizontal, existe bien avant la prise ; cela justifierait par ailleurs la grande sensibilité des bétons à haute performance au retrait endogène. À l'opposé, pour des rapports E/C plus élevés, on considère souvent que la quantité d'eau est trop

importante pour créer une autodessiccation rapide : en fin de prise, les pores sont encore saturés en eau [11].

On sait que le retrait endogène est en fonction décroissante du rapport E/C, alors il augmente très vite quand se rapport tombe de 0,4 et peut atteindre 0,3‰, donc son importance croît et nécessite sa prise en considération, mais il reste inférieure à 0,1‰ pour des bétons dont le rapport E/C est supérieure à 0,45, ce qui est dans notre cas où on a prit un rapport E/C=0,5, donc une déformation très faible sur le mortier [55].

Donc la déformation faible précédente est due souvent au retrait endogène. Elle caractérise une surface de 400cm<sup>2</sup> d'amplitude maximale du retrait plastique de 16cm/m.

### V.2.1.2 - Le retrait plastique dans le cas du séchage à température élevée

#### V.2.1.2.1 - La mise en graphe des résultats obtenus (figure 5.2)

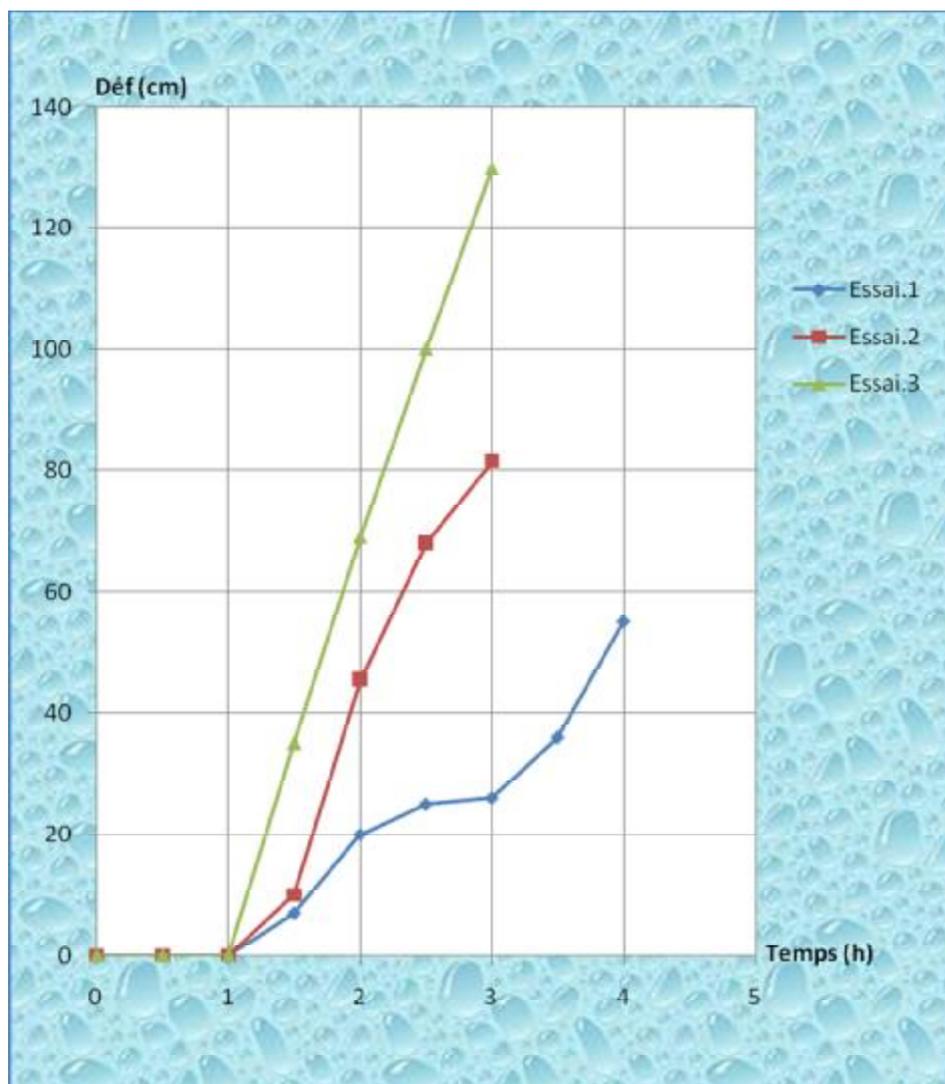


Figure 5.2 : Déformation (fissuration) du mortier dans le cas du séchage à température élevée.

#### V.2.1.2.2 - Description de graphe

Selon la figure précédente, on voit que la fissuration se développe proportionnellement au degré de température, alors les fissures commencent à s'apparaître après une heure de la mise en étuve contrairement au l'essai précédant, mais avec le temps la capacité et la rapidité de déformation sont en fonction croissante au degré de température.

Généralement dans les conditions là, on peut dire :

- ü L'apparition des fissures sur mortier se fait rapidement;
- ü La fissuration est en fonction croissante du degré de température.

### V.2.1.2.3 - Interprétation et conclusion

L'apparition rapide et le développement fort des fissures sont dus, à part le retrait endogène, au facteur efficace et dominant appelé le retrait du séchage qui est dû à l'évaporation de l'eau de la surface libre du mortier frais après la mise en étuve [55].

#### Comment se forme le retrait de séchage ?

Ø **Phase 1 ;  $T_1=0$  à  $T_3=1(h)$**  : Le séchage à température élevée conduit à une évaporation vite de l'eau à la surface du mortier. La pression capillaire diminue suite au tassement du squelette et devient négative, donc en premier lieu on observe une déformation verticale (un tassement) avec aucune déformation horizontale comme illustré dans le paragraphe V.2.1.1.3.a. Cette phase est plus courte que celle de l'essai précédant à cause de l'intervention du coefficient du séchage.

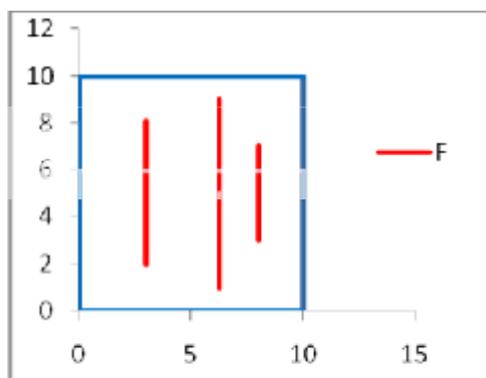
Ø **Phase 2 ;  $T_3=1(h)$  à  $T_7=3(h)$**  : La diminution du volume est transmise peu à peu horizontalement. Le retrait commence à se développer lorsque la pression capillaire devient négative. Cette condition n'est pas suffisante ; en effet, l'apparition du retrait horizontal traduit également la présence (ou la naissance) d'un frottement interne du squelette granulaire (paragraphe II.2.2.2). Contrairement à la phase de l'essai précédant, L'apparition rapide et le développement fort des fissures sont dus, à part le retrait endogène, au facteur efficace et dominant appelé le retrait du séchage qui est dû à l'évaporation de l'eau de la surface libre du mortier frais après la mise en étuve [11].

Donc dans cette phase, l'évolution du retrait devient fonction quasiment linéaire du temps et du l'évaporation, alors chaque fois le taux d'évaporation élevé, les fissures vont apparaître et développer rapidement.

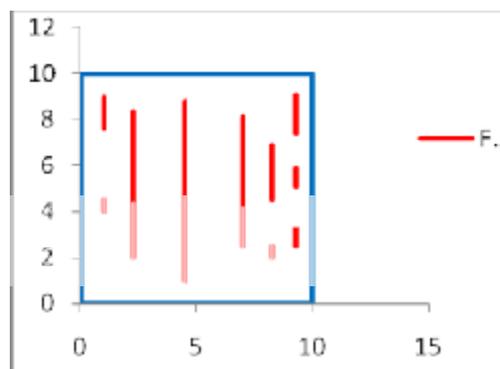
- **Remarque** Pendant le déroulement des essais on n'a pas observé le phénomène du ressuage des mortiers, ce qui confirme vraiment que les bétons autoplaçants ne présentent pas du ressuage.

### V.2.1.2.4 - Effet de la température dans le retrait plastique

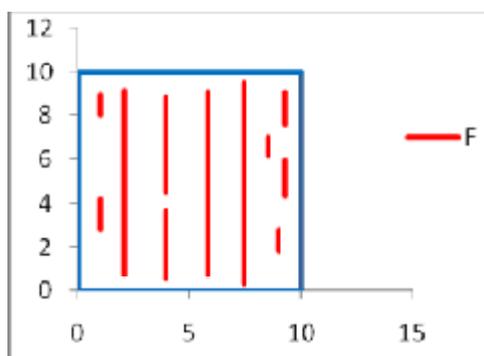
Pour mieux interpréter l'influence de la température sur les mortiers, les figures suivantes montrent l'état des mortiers aux degrés de températures différents (figure 5.3 ; 5.4 ; 5.5 et 5.6) :



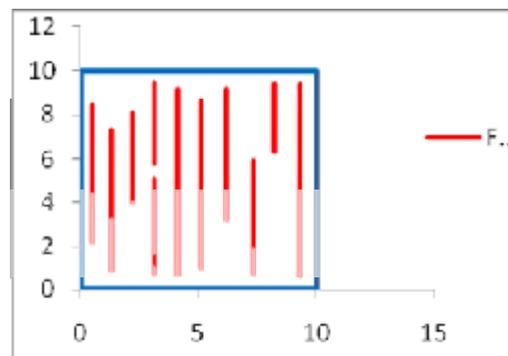
**Figure 5.3 :** Etat des fissures du mortier à un degré de température du 15°C après 8 heures du temps.



**Figure 5.4 :** Etat des fissures du mortier à un degré de température du 30°C après 4 heures du temps.



**Figure 5.5 :** Etat des fissures du mortier à un degré de température du 50°C après 3 heures du temps.

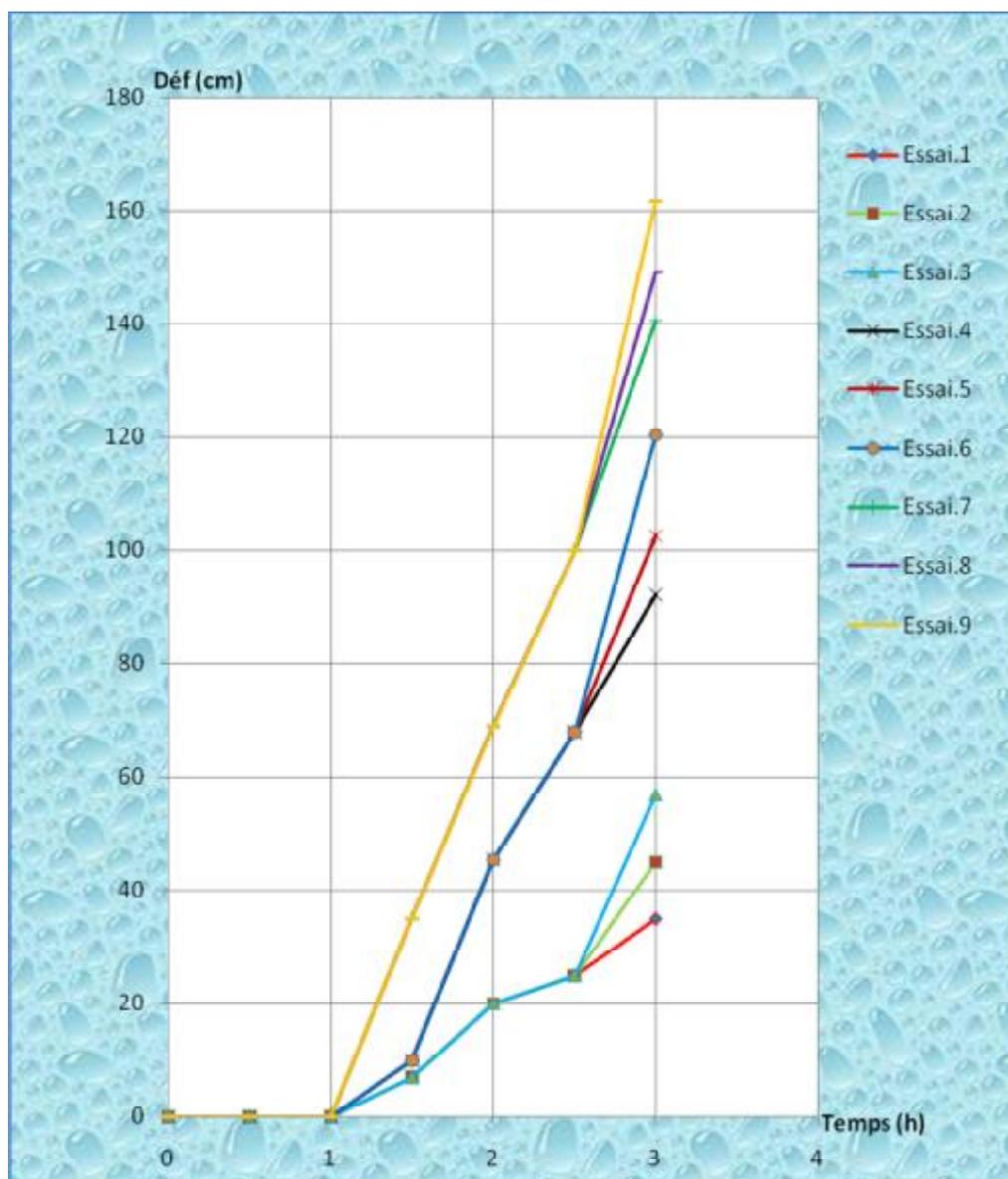


**Figure 5.6 :** Etat des fissures du mortier à un degré de température du 70°C après 3 heures du temps.

Les figures ci-dessus montrent la grande influence de la température sur la fissuration des mortiers dans une surface uniquement de 400cm<sup>2</sup> d'amplitude maximale du retrait plastique de 25cm/m pour une température de 30°C seulement, ce qui mène cette déformation énorme dans les grandes surfaces horizontales (exemple des dalles) exposé au séchage. Tandis que les éléments verticaux ne posent pas de problèmes. En ALGERIE où la température ne diminue pas de 37°C en été, il est impossible d'utiliser les bétons autoplaçants dans les conditions là surtout s'il intervient le vent chaud qui par la suite nous observons qu'il est le plus influent que la température élevée [30].

### V.2.1.3 - Le retrait plastique dans le cas du séchage à température élevée suivi du vent chaud

#### V.2.1.3.1 - La mise en graphe des résultats obtenus (figure 5.7)



**Figure 5.7 :** Déformation (fissuration) du mortier dans le cas du séchage à température élevée et à air chaud.

#### V.2.1.3.2 - Description de graphe

Dans la figure précédente, on voit que, à partir de l'instant  $T=2,5(h)$  (c'est l'instant où le mortier s'expose au vent chaud) la déformation se développe énormément pendant une demi-heure seulement, et elle est en fonction croissante de la vitesse du vent chaud, alors quand on augmente la vitesse du vent chaud, automatiquement un développement rapide des fissures, donc de retrait plastique.

### V.2.1.3.3 - Interprétation et conclusion

Les fissures se développent énormément pendant une demi-heure seulement, grâce à l'activité énorme du retrait de séchage.

#### Pourquoi cette activité énorme de retrait plastique ?

Les essais sur la perte de masse d'un mortier (figure 5.8 et 5.9) [11], montrent qu'en présence du vent chaud, la perte de masse s'évolue plus qu'en présence d'une température élevée, donc un taux d'évaporation aussi élevé. On constate que le courant du vent accélère le développement de la pression capillaire. L'air chaud provoque l'apparition du système de ménisques à la surface du mortier presque immédiatement.

Le retrait évolue de manière quasi-linéaire avec l'évaporation, c'est pour ça une énorme activité de retrait plastique.

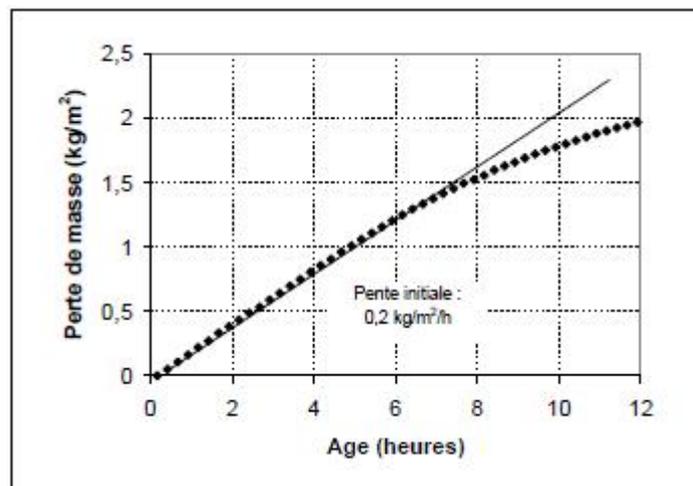


Figure 5.8 : Perte de masse du mortier par unité de surface, à température élevée.

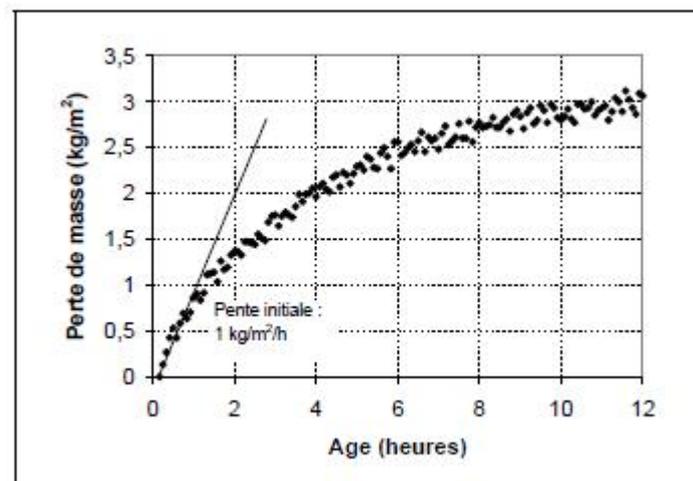


Figure 5.9 : Perte de masse du mortier par unité de surface, au vent chaud.

### V.3 - Évaluation les résultats des essais

#### V.3.1 - Évaluation les résultats des essais sur la formulation des bétons

Pour la formulation du béton autoplaçant, on a adopté l'expérimentation, alors les quantités des composants se varient dans chaque essai, mais avec le respect de toutes les conditions recommandées par l'association française de génie civil. L'expérimentation se termine lorsque les essais préconisés par l'AFGC sur le béton obtenu qui sont ; l'essai d'étalement au cône d'Abrams, l'essai à la boîte en L et l'essai de stabilité au tamis sont réalisables.

L'expérimentation sur le béton autoplaçant nous permis de savoir l'effet de chaque composant dans la rhéologie du béton, par exemple :

- L'excès de la quantité du gravier 8/15 bloque l'étalement du béton ;
- Les fillers calcaires ont besoin d'une quantité suffisante de l'eau à cause de leurs énorme absorption ;
- Le manque de la quantité du superplastifiant diminue la fluidité du béton ;
- L'excès de la quantité d'eau élimine l'homogénéité du béton et diminue la résistance.

En effet, le béton autoplaçant présente les meilleures caractéristiques rhéologiques et mécaniques, dues à l'incorporation d'ajouts chimiques (superplastifiant) et d'ajouts en filler calcaire (filler du marbre).

#### V.3.2 - Évaluation les résultats des essais sur le retrait plastique des bétons autoplaçant

Pour l'étude de retrait plastique du mortier du béton équivalent, on adopté un dispositif de fissuration similaire à celui utilisé dans la pratique.

L'analyse des courbes de retrait permet de mettre en évidence trois phases dans l'évolution du retrait [11]. Dans les essais du chapitre précédent, nous avons étudié seulement les deux premières phases puisque la troisième phase connaît une très faible évolution de retrait plastique. Puisque l'évaporation, principale cause des changements de volume des mortiers testés, est constante pendant le développement du retrait, ces deux phases reflètent des changements dans la microstructure du béton. Leur signification dépend cependant de l'intensité du séchage.

##### Ø Séchage à température élevée

Au cours de la première phase, le mortier connaît un fort tassement, lié en partie à la consolidation due à la gravité. La diminution de porosité engendrée provoque éventuellement un ressuage. Lors de la deuxième phase, la pression de l'eau interstitielle diminue, suite à l'apparition de ménisques sur la surface (dépression capillaire). Il en résulte le développement du retrait plastique (qui dépend aussi des interactions granulaires).

### Ø Séchage au vent chaud

La première et la deuxième phase, décrites ci-dessus, sont confondues : le retrait, le tassement et la dépression capillaire se développent simultanément, conséquences du séchage rapide de la surface. Dans les conditions de séchage les plus défavorables, les bétons autoplaçants et les bétons ordinaires ont révélé un comportement similaire.

Il est à retenir de cette analyse que la cinétique du retrait plastique est fortement dépendante du taux d'évaporation. Lorsque le séchage est élevé (vent chaud), le retrait se fait avant la prise: il s'agit donc de la contraction d'un milieu granulaire ne présentant pas ou très peu de cohésion matérielle. Lorsque le séchage est modéré, le béton se contracte aussi pendant la prise : le retrait plastique concerne donc deux milieux, d'abord un milieu granulaire, puis un milieu solide poreux en formation.

Généralement, le retrait plastique dans les conditions de séchage a une amplitude importante selon les résultats des essais effectués précédemment, ce qui traduit une déformation énorme dans les grandes surfaces horizontaux (exemple des dalles). Tandis que les éléments verticaux ne posent pas de problèmes.

## V.4 - Certaines précautions pour minimiser l'amplitude du retrait plastique

### V.4.1 - L'augmentation de la quantité d'eau

L'augmentation de la quantité d'eau diminue la fissuration, à l'exception du mortier contenant du filler, sans adjuvant et de rapport  $a/c=1,2$  [11].

### V.4.2 - L'utilisation du filler calcaire

Pour le rapport  $e/f$  commun ( $e/f=1,07$ ), les mortiers avec filler calcaire fissurent moins que les mortiers avec les cendres volantes. La différence est cependant négligeable pour  $S_p=10(l/m^3)$  [11].

### V.4.3 - Formuler en limitant le dosage en superplastifiant

Il est fort probable d'ailleurs que la consistance fluide offre aux bétons autoplaçants une capacité de déformation élevée. Ajoutons qu'il est préférable de les formuler en limitant le dosage en superplastifiant parce que la recherche bibliographique et les essais sur mortiers nous ont montré en effet que des dosages en fines et en superplastifiant importants sont susceptibles d'augmenter le retrait à l'état frais. Ces deux paramètres de formulation ont pour effet de limiter le ressuage et de retarder la prise [11].

#### V.4.4 - L'ajout du produit de cure

Le produit de cure est un liquide blanc laiteux à base de résine en phase aqueuse. C'est un produit prêt à l'emploi qui protège les bétons et mortiers frais d'une dessiccation trop rapide.

L'évaporation de l'eau de gâchage peut être trop rapide sous l'action du vent et du soleil, ce qui entraîne des fissures par manque d'hydratation du liant.

À l'état frais, les bétons autoplaçants ne doivent pas présenter un risque de fissuration accrue, à condition d'être protégés par un produit de cure, qui compensera leur absence de ressuage [11].

##### 1. Le rôle du produit de cure

Il est appliqué sur les surfaces de béton ou de mortiers exposés aux agents atmosphériques, il permet de s'opposer à l'évaporation de l'eau contenue dans le béton ou mortier pendant la phase de prise et de durcissement.

##### 2. Domaines d'application :

- Sols industriels, dallages et chapes,
- ouvrages d'art,
- voiries en béton,
- industries de la préfabrication.

Le type de produit de cure à utiliser est déterminé par plusieurs facteurs comme le type de ciment utilisé, sa classe, le rapport eau/liant, la température du béton, les conditions climatiques, l'exposition ultérieure du béton ou encore sa destination finale.

##### 3. Mise en œuvre

Le produit de cure s'applique immédiatement après le coulage (figure 5.10) :



**Figure 5.10** : Application immédiate du produit de cure après le coulage.

Il existe 2 méthodes pour pulvériser les produits de cure selon l'importance de la surface à traiter. Pour une surface inférieure à 100m<sup>2</sup> on utilisera un pulvérisateur manuel. Pour des surfaces plus importantes il est recommandé d'utiliser une méthode industrielle.

### V.5 - Conclusion du chapitre

Malgré certains inconvénients qui s'accompagnent les bétons autoplaçants à l'état frais en présence du séchage, mais ils se distinguent des bétons dits ordinaires, ou bétons à vibrer, par leurs propriétés à l'état frais. Ils sont capables de s'écouler sous leur propre poids, quel que soit le confinement du milieu, et restent homogènes au cours de l'écoulement (absence de ségrégation dynamique) et une fois en place (absence de ségrégation statique).

Le retrait plastique est nuisible avant tout aux structures présentant une large surface à l'air libre, lorsque le béton est à l'état frais. Il concerne donc en premier lieu les bétons autonivellants, bétons utilisés pour les dalles. Ces bétons ont souvent un volume de pâte moins important que les bétons autoplaçants, puisqu'ils n'ont pas à répondre au critère de non-blocage en milieu confiné.

En présence du séchage, l'amplitude du retrait plastique sera énorme et donc l'impossibilité d'utiliser les bétons autoplaçants aux éléments horizontaux particulièrement si on ne procède pas à effectuer certaines précautions pour limiter ce potentiel.

En ALGERIE où la température ne diminue pas de 37°C en été, il est impossible d'utiliser les bétons autoplaçants dans les conditions là, surtout s'il intervient le vent chaud qui est le plus influent que la température élevée. Donc pour la possibilité d'utiliser les bétons autoplaçant dans les éléments horizontaux, il faut certaines précautions comme celles citée précédemment.

# CONCLUSION GÉNÉRALE

## Conclusion générale

L'objectif de ce travail était d'interpréter l'amplitude élevée du retrait plastique des bétons autoplaçants, et de prévoir certaines modifications pour limiter ce potentiel.

Les bétons autoplaçants représentent une nouvelle avancée pour la construction en béton car ils offrent de nombreux avantages aussi bien du point de vue économique, technique que sociale. L'absence de vibration aide à la réduction des coûts de production, permet d'avoir des éléments de géométries complexes et fortement ferrillés. L'utilisation des bétons autoplaçants entraîne la réduction des nuisances sonores, ainsi que la pénibilité du travail.

Pour répondre à nos objectifs, nous avons commencé par la formulation du béton autoplaçant. Pendant l'expérimentation, il a été avéré que la formulation du béton autoplaçant n'est pas exacte, alors nous avons réalisé beaucoup d'essai pour l'obtention d'un béton qui respecte les conditions préconisées par l'association française de génie civil.

Pour l'étude du retrait plastique, il a été préférable d'utiliser le mortier au lieu du béton, en utilisant la technique du mortier du béton équivalent. Le dispositif de fissuration utilisé pour mesurer le retrait plastique a été fabriqué d'une façon qu'il soit similaire à celui utilisé dans la pratique grâce à la manque des outils expérimentaux nécessaires.

Les résultats d'essais sur le retrait plastique montrent l'influence du séchage sur les bétons autoplaçants, surtout lorsque ces bétons s'exposent au vent, où la déformation est nocive à la construction, et même chose pour les bétons ordinaires, puisque, il a été constaté qu'ils ont les mêmes amplitudes de retrait plastique en présence du vent.

Pour que les bétons autoplaçants ne doivent pas présenter un risque de fissuration accrue, certaines propositions ont été préconisées, exemple qu'ils doivent être protégés par un produit de cure, qui compensera leur absence de ressuage ou bien il est préférable de formuler le béton en limitant le dosage en superplastifiant.

En ALGERIE où la température ne diminue pas de 37°C en été, il est impossible d'utiliser les bétons autoplaçants dans les conditions là, surtout s'il intervient le vent chaud qui est le plus influent que la température élevée. Donc pour la possibilité d'utiliser les bétons autoplaçant dans les éléments horizontaux, il faut certaines précautions comme celles citée précédemment.

# **RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

## Bibliographie

- [1] **H. OKAMURA, K. OZAWA, and M. OUCHI.** Self-compacting concrete. *Structural Concrete*, (1) : 3\_17, March 2000.
- [2] Association Française de Génie Civil. Les bétons autoplaçants : Recommandations provisoires. AFGC, 2000.
- [3] **T. SEDRAN.** Rhéologie et rhéométrie des bétons. Application aux bétons autonivellants. Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1999.
- [4] **A. LOUKILI and Ph. TURCRY.** Effect of a viscosity agent on mechanical properties of self-compacting concrete. In *Proceedings of the Conference ICPCM A new era of building*, 18-20 Février 2003.
- [5] **S. ROLS, J. AMBROISE, and J. PÉRA.** Effects of different viscosity agents on the properties of self-leveling concrete. *Cement and Concrete Research*, 29 : 261\_266, 1998.
- [6] **Ir C .LADANG,** Béton autocompactant : formulation au départ des paramètres de base.
- [7] **PH.TURCRY et A.LOUKILI,** Différentes approches pour la formulation des bétons autoplaçants, revue française de génie civil volume 7 N°4, 2003.
- [8] **Z. ABIB,** Formulation et caractérisation des bétons autoplaçants, thèse de Magistère USTHB, 2004.
- [9] **A.DAOUUD,** Étude expérimentale de la liaison entre l'acier et le béton autoplaçant contribution à la modélisation numérique de l'interface, thèse de doctorat, INSA Toulouse, juin 2003.
- [10] **M.MOURET et F.KHARCHI,** Effet de la taille des granulats sur le comportement rhéologique des bétons (Application aux bétons autoplaçants), Algérie équipement, mai 2005.
- [11] **PH.TURCRY,** Retrait et fissuration des bétons autoplaçants : influence de la formulation, thèse de doctorat, l'université de Nantes, février2004.
- [12] **F. DE LARRARD and C. F. FERRARIS.** Rhéologie du béton frais remanié. *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, (213) : 73\_89, Janvier-Février 1998.

- [13] **F. DUFOUR**. Développement de la méthode des éléments finis avec des points d'intégration lagrangiens : applications à la géomécanique. Thèse de l'Ecole Centrale de Nantes, 2002.
- [14] **L. BARCELO, S. BOIVIN, S. RIGAUD, P. ACKER, and B. CLAVAUD**. Linear vs volumetric autogenous shrinkage measurement: material behaviour or experimental artefact? In Proceedings of Self-desiccation and its importance in concrete technology, Lund, 1999.
- [15] **T.A. HAMMER**. Test methods for linear measurement of autogenous shrinkage before setting. In Proceedings of the International Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete, Autoshrink' 98, Japan. RILEM, 1998.
- [16] **A. LOUKILI, D. CHOPIN, A. KHELIDJ, and J.-Y. Le TOUZOU**. A new approach to determine autogenous shrinkage of mortar at early age considering temperature history. Cement and Concrete Research, 30 : 915\_922, 2000.
- [17] **A. RADOCEA**. A model of plastic shrinkage. Magazine of Concrete Research, 46 (167) : 125\_132, June 1994.
- [18] **F. H. WITTMANN**. On the action of capillary pressure in fresh concrete. Cement and Concrete Research, 6(1) : 49\_56, 1976.
- [19] **P. C. AÏTCIN, A. NEVILLE, and P. ACKER**. Les différents types de retrait du béton. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 215 : 41\_51, Mai-Juin 1998.
- [20] **T.A. HAMMER**. The relationship between settlement and plastic shrinkage of high strength concrete. In Proceedings of the Full ACI Convention, Phenix USA. ACI, 2002.
- [21] **P. ACKER**. Comportement mécanique du béton: apport de l'approche physico chimique. Rapport de recherche LPC N<sup>o</sup> 152. Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées, 1988.
- [22] **A. RADOCEA**. Autogenous volume change of concrete at very early age. Magazine of Concrete Research, 50(2) : 107\_113, June 1998.
- [23] **C. HUA**. Analyse et modélisation du retrait d'autodessiccation de la pâte de ciment. Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1992.
- [24] **L. BARCELO, S. BOIVIN, P. ACKER, J. TOUPIN, and B. CLAVAUD**. Early age shrinkage of concrete : back to physical mechanisms. Concrete Science and Engineering (RILEM), 3(10), 2001.
- [25] **P. J. UNO**. Plastic shrinkage cracking and evaporation formulas. ACI Materials Journal, 95(4) : 365\_375, July-August 1998.

- [26] **S. BOIVIN**. Retrait au jeune âge du béton : développement d'une méthode expérimentale et contribution à l'analyse physique du retrait endogène. Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1999.
- [27] **L. JOSSERAND**. Ressuage des bétons hydrauliques. Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2002.
- [28] **O. BJONTEGAARD**. Thermal dilatation and autogenous deformation as driving forces to self-induced stresses in high performance concrete. PhD thesis of the Norwegian University of Science and Technology, 1999.
- [29] **E. FOUDRIN, C. GUIGOU, and J. CHAPPUIS**. Early age shrinkage of mortars : conception of a new device and detailed analysis of a typical experimental curve. In Shrinkage 2000, Proceedings of the International RILEM Workshop. RILEM, 2000.
- [30] **E.E. HOLT and M.T. LEIVO**. Methods of reducing early age shrinkage. In Shrinkage 2000, Proceedings of the International RILEM Workshop. RILEM, 2000.
- [31] **A. KRÖNLOF, M. LEIVO, and P. SIPARI**. Experimental study on the basic phenomena of shrinkage and cracking of fresh concrete. Cement and Concrete Research, 25(8) : 1747\_1754, 1995.
- [32] **Ph. TURCRY and A. LOUKILI**. Autogenous and thermal deformations of low water/cement ratio cement paste at early age. In Proceedings of the ASCE Engineering Mechanics Conference, 2 et 5 Juin 2002, New-York, Etats-Unis. ASCE, 2002.
- [33] **Z. BAYASI and M. MACINTYRE**. Application of fibrillated polypropylene fibers for restraint of shrinkage cracking in silica fumes concrete. ACI Materials Journal, 99(4) : 337\_344, July-August 2002.
- [34] **T.A. HAMMER**. Cracking in high performance concrete setting. In Proceedings of the International Symposium on high performance and reactive powder concrete, 14-16.08.98, Sherbrook, Canada. Edité par **P.C. AİTCIN**, 1998.
- [35] **D. J. HANNANT, J. BRANCH, and M. MULHERON**. Equipment for tensile testing of fresh concrete. Magazine of Concrete Research, 51(4) : 263\_267, August 1999.
- [36] **R. BLOOM and A. BENTUR**. Free and restrained shrinkage of normal and high strength concrete. ACI Materials Journal, 92 : 211\_217, 1995.

- [37] **J. BRANCH, A. RAWLING, D. J. HANNANT, and M. MULHERON.** The effects of fibers on the plastic shrinkage cracking of high strength concrete. *Materials and Structures*, 35 : 189\_194, April 2002.
- [38] **T.A. HAMMER.** On the strain capacity and cracking mechanisms of high strength concrete at very early age. In *Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and other Quasi Brittle Materials*. Elsevier Science Ltd., 2001.
- [39] **W.P.S. DIAS.** Influence of mix and environment on plastic shrinkage cracking. *Magazine of Concrete Research*, 55 : 385\_394, 2003.
- [40] **P. SOROUSHIAN and S. RAVANBAKHS.** Control of plastic shrinkage cracking with specialty cellulose fibers. *ACI Materials Journal*, 95(4) : 429\_435, July-August 1998.
- [41] **M. D. COHEN, J. OLEK, and W. L. DOLCH.** Mechanism of plastic shrinkage cracking in Portland cement and portland cement-silica fume paste and mortar. *Cement and Concrete Research*, 20(1) : 103\_119, 1990.
- [42] **H. NAJM and P. BALAGURU.** Effect of large-diameter polymeric fibers on shrinkage cracking of cement composites. *ACI Materials Journal*, 99(4) : 345\_351, July-August 2002.
- [43] **K. WANG, S. P. SHAH, and P. PHUAKSUK.** Plastic shrinkage cracking in concrete materials-influence of fly ash and fibers. *ACI Materials Journal*, 98(6) : 458\_464, November December 2001.
- [44] **A.A. ALMUSALLAM, M. MASLEHUDDIN, M. ABDUL-WARIS, and M.M. KHAN.** Effect of mix proportions on plastic shrinkage cracking of concrete in hot environments. *Construction and Building Materials*, 12 : 353\_358, 1998.
- [45] **S. IGARASHI, A. BENTUR, and K. KOVLER.** Autogenous shrinkage and induced restraining stresses in high-strength concretes. *Cement and Concrete Research*, 30 : 1701\_1707, 2000.
- [46] **T.A. HAMMER.** Cracking susceptibility due to volume changes of self-compacting concrete. In *Proceedings of the Third International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete*. RILEM, 2003.
- [47] **T. A. SAMMAN, W. H. MIRZA, and F. F. Wafa.** Plastic shrinkage cracking of normal and high-strength concrete: a comparative study. *ACI Materials Journal*, 93(1) : 36\_40, January-February 1996.

- [48] **H.E. GRAM and P. PIIPARINEN.** Properties of scc-especially early age and long term shrinkage and salt frost resistance. In Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete. RILEM, 1999.
- [49] Le groupe de travail traitant des "anomalies de comportement rhéologique du béton" du Projet National CALIBRÉ-Opération du Plan Génie Civil.
- [50] Société **CONTROLS**, Catalogue: appareils et matériels d'essais pour le bâtiment et les travaux publics, 2005.
- [51] Société **BERA TEST**, Catalogue laboratoire : instruments de contrôle pour génie civil, Suisse, 2005.
- [52] **J.BARON et J-P.OLLIVIER**, Les bétons: bases et données pour leur formulation, Eyrolles, 1999.
- [53] **GRANITEX**, Fiche technique de MEDAFLOW30.
- [54] **Mlle SAADANI Sabrina.** Comportement des bétons à base de granulats recyclés, université MENTOURI Constantine, thèse de Magistère.
- [55] Dimensionnement des structures en béton. Traité de génie civil de l'école polytechnique fédérale de **LAUSANE**, Volume 8.