

Mise au point d'une méthodologie pour formuler de nouveaux bétons auto-plaçants légers et durables

Latifou Bello

▶ **To cite this version:**

Latifou Bello. Mise au point d'une méthodologie pour formuler de nouveaux bétons auto-plaçants légers et durables. Génie civil. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, 2014. Français. NNT : 2014MON20137 . tel-01683251

HAL Id: tel-01683251
https://theses.hal.science/tel-01683251

Submitted on 13 Jan 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Collège Doctoral du Languedoc-Roussillon

THÈSE

Pour obtenir le grade de

Docteur

Délivré par **UNIVERSITE MONTPELLIER 2**

Préparée au sein de l'école doctorale INFORMATION STRUCTURES SYSTEMES – I2S
Et de l'unité de recherche CENTRE DES MATERIAUX DES MINES D'ALES – C2MA

Spécialité : **MECANIQUE ET GENIE CIVIL**

Présentée par **Latifou BELLO**

MISE AU POINT D'UNE METHODOLOGIE POUR FORMULER DE NOUVEAUX BETONS AUTO-PLAÇANTS LEGERS ET DURABLES

Soutenue le 29/09/2014 devant le jury composé de

M. Bogdan CAZACLIU, Directeur de Recherche, IFSTTAR	Rapporteur
M. Sébastien REMOND, Professeur, Ecole des Mines de Douai	Rapporteur
M. Moulay Saïd EL-YOUSSOUFI, Professeur, Université de Montpellier II	Examinateur
M. Emmanuel ROZIERE, Maitre de Conférence, Ecole Centrale de Nantes	Examinateur
M. Patrick ROUGEAU, Docteur Ingénieur de Recherche, CERIB	Examinateur
M. Eric GARCIA-DIAZ, Professeur, Ecoles des Mines d'Alès	Directeur de thèse

UNIVERSITÉ MONTPELLIER 2
SCIENCES ET TECHNIQUES

Résumé

Les bétons auto-plaçants (BAP) sont des bétons, très maniables, homogènes et stables qui se mettent en place sous le seul effet de la gravité. Grâce à leurs nombreux avantages, les bétons auto-plaçants (BAP) sont aujourd'hui considérés comme étant l'une des innovations les plus marquantes des deux dernières décennies dans le domaine du béton. Aujourd'hui, la plupart des produits à démoulage différé sont réalisés en BAP.

Parallèlement, les bétons légers sont maintenant intégrés dans le contexte normatif et leur utilisation dans l'industrie est croissante du fait notamment de la nouvelle réglementation thermique pour les bâtiments.

Ce contexte ouvre la voie aux bétons auto-plaçants légers (BAPL) dont l'utilisation constitue une solution innovante pour répondre encore mieux, aux problématiques de légèreté, d'efficacité énergétique des bâtiments et de productivité.

Cependant, la différence de densité entre les granulats légers et la pâte d'une part et le pouvoir absorbant des granulats légers d'autre part, compliquent davantage la formulation et la production des bétons auto-plaçants légers. De plus, les méthodes existantes qui sont pour la plupart empruntées aux méthodes de formulation de BAPN restent empiriques.

Cette thèse vise donc la mise au point d'une méthode de formulation plus rationnelle pour composer des bétons auto-plaçants légers et durables. Cette approche de formation des BAPL est construite autour d'un ensemble de données cohérent dont l'indice de serrage de l'empilement et sur la quantification expérimentale des phénomènes tels que l'absorption dans la pâte de ciment et la ségrégation. A partir de cette méthode, différentes gammes de BAPL sont proposées pour répondent aux critères du cahier des charges en termes de masse volumique réelle sèche et de résistance à la compression. Sa mise en œuvre a permis de simuler et de réaliser des formules de bétons auto-plaçants légers de sable normal (BAPLSN) de classes d'étalement allant de SF1 à SF3, de classes de masse volumique D1.8 et D2.0 et de classes de résistance allant de LC35/38 à LC50/55. Elle a également permis d'explorer les bétons auto-plaçants légers de sable léger (BAPLSL) qui peuvent constituer une solution innovante pour l'industrie du béton dans le contexte de la nouvelle réglementation thermique pour les bâtiments.

Mots clés : granulats légers, béton auto-plaçant léger, absorption d'eau dans la pâte, ségrégation, pré-mouillage, méthode de formulation, performance mécanique.

An approach to formulate suitable lightweight self compacting concrete

Abstract

Self compacting concrete (SCC) is generally known as the concrete capable of filling up the given structure only using its self weight without any need for vibration and compaction during pouring process. On the other hand, the structural lightweight concrete (LWC) has emerged due to its lightness and all the advantages related to lower thermal insulating characteristics. The two materials open way to the lightweight self compacting concrete (LWSCC) in order to combine the favorable properties of LWC with those of SCC.

However, the difference in density between the lightweight aggregate and cement paste complicate the mix design and production of LWSCC. Furthermore, existing mix design methods which are mostly borrowed from SCC design methods are empirical.

Therefore, this thesis aims to develop a rational mix design method for suitable lightweight self-compacting concrete. This approach is built around a set of coherent data whose compaction index of granular skeleton and on the experimental data such as water absorption in the cement paste and segregation. From this method, different ranges of LWSCC are proposed to meet the requirements of the specification in terms of dry density and compressive strength. Its implementation was used to simulate and formulate LWSCC of workability classes from SF1 to SF3, density class from D1.8 to D2.0 and resistance class from LC35/38 to LC50/55. The mix design method also explored the total lightweight self compacting concrete (TLWSCC) that may constitute an innovative solution for the concrete industry in the context of the new thermal regulations for buildings.

Keywords: Lightweight aggregates, lightweight self compacting concrete, water absorption in cement paste, segregation, pre-wetting, mix design method, mechanical properties

Centre des Matériaux de l'Ecole des Mines d'Alès (C2MA)

Ecoles des Mines d'Alès
6, avenue de Clavières
30319 Alès Cedex

Centre d'Etudes et de Recherches de l'Industrie du Béton (CERIB)

1, rue des Longs Réages
28231 Epernon Cedex

Je dédie ce travail à :

Mon épouse **Gwladys** pour sa présence continue et son soutien constant tout au long de cette aventure humaine. Reçois ce travail comme le fruit de ta complicité et ton engagement sans cesse renouvelé.

Ma **Maman** pour son tempérament édulcoré, ses bénédictions et son don de soi pour les autres dont elle m'a nourri depuis tant d'années et qui n'est que le reflet de ma personnalité. Reçois à travers cette œuvre, ma profonde gratitude et le sens de nos liens viscéraux.

Mes **nièces et neveu** adorables pour leur joie de vivre communicative.

Remerciements

Je tiens d'entrée à adresser mes vifs remerciements à **Patrick ROUGEAU** pour m'avoir accueilli au CERIB et nourri de son expérience dans le domaine des matériaux. Patrick a été le long de ce travail, mon interlocuteur privilégié. Il a suivi de près ce travail. Sa rigueur intellectuelle et son sens des responsabilités méritent mon respect. Trouve ici, l'expression de la profonde reconnaissance.

Je voudrais sur le même élan remercier très chaleureusement **Eric GARCIA-DIAZ** de sa confiance en m'accueillant dans son laboratoire pour la direction de cette thèse. Eric m'a inculqué la culture scientifique par la profondeur des analyses et par l'honnêteté intellectuelle. Je suis fasciné par son sens du détail, son intelligence, sa curiosité intellectuelle, sa sobriété et sa générosité. Son soutien m'a beaucoup aidé dans les moments où j'étais en proie au doute. C'est pour moi un privilège d'avoir travaillé à tes cotés et d'avoir profité de l'étendue de tes connaissances scientifiques. Eric, trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

Je voudrais avec la déférence requise, remercier Monsieur **Moulay Saïd EL-YOUSSOUFI** qui m'a fait l'honneur de présider le jury de thèse.

J'adresse également mes vifs remerciements à Messieurs **Bogdan CAZACLIU** et **Sébastien REMOND** pour avoir accepté de rapporter mon manuscrit et pour leur participation au jury.

Je remercie Monsieur **Emmanuel ROZIERE** pour son intérêt aux travaux en acceptant d'examiner ma thèse et pour sa participation au jury.

J'adresse mes remerciements à mes collègues de la Direction Matériaux et Technologie du Béton (DMTB) du CERIB. Je veux nommer **Philippe FRANCISCO**, **François JACQUEMOT**, **Sylvain DEHAULT**, **Jonathan MAI-NHU**, **Nicolas FLAHAULT**, **Josette ROUSSEAU**, **Pauline BARTHELEMY**, **Céline COLLARDEAU**, **Marjorie PETITPAIN**, **Patrick SERCOL**, **Florian BODIVIT**, **Kais MEHIRI et Chantal SINEUX** …

Je m'en voudrais de ne pas remercier Monsieur **Edmond COLLOT** pour son intérêt aux travaux et ses encouragements nourris et répétés.

Un clin d'œil chaleureux à **Isabelle GIRBEAU, Bruno BERBEROVIC et Thierry CAMPION** du service informatique du CERIB.

Je remercie tout le **personnel du CERIB** pour la générosité de l'accueil et l'accompagnement tout au long de cette thèse.

Merci au **personnel du Centre des Matériaux des Mines d'Alès (C2MA)** pour leur accueil.

Mes remerciements à **mes amis** qui n'ont de cesse de m'encourager et de me porter dans leur cœur.

Mes pensées vont aussi à **mon épouse, mes parents et mes sœurs** pour leur soutien inconditionnel et leur contribution.

Table des matières

Introduction générale 19

1. Revue bibliographique sur les bétons auto-plaçants légers 23

1 1.Introduction 25

1.2 Granulat légers pour bétons de structure 26
1.2.1 Procédés de fabrication des granulats légers 26
1.2.2 Nature chimique des granulats légers 30
1.2.3 Propriétés physiques des granulats légers 31
1.2.4 Propriétés mécaniques des granulats légers 41
1.2.5 Différents types de granulats légers disponibles sur le marché 44

1.3 Propriétés hydriques des bétons légers 45
1.3.1 Interactions des granulats légers avec la matrice cimentaire 46
1.3.2 Cure interne dans les bétons légers 47

1.4 Bétons auto-plaçants légers 50
1.4.1 Méthodes de formulation des BAPN 50
1.4.2 Méthodes de composition des BAPL 55
1.4.3 Propriétés à l'état frais des BAPL 56
1.4.4 Propriétés mécaniques des BAPL 61
1.4.5 Propriétés de durabilité des BAPL 63

1.5 Conclusion 65

2 Présentation du programme expérimental, des matériaux et des méthodes 67

2.1 Introduction 69

2.2 Constituants des bétons auto-plaçants légers 69
2.2.1 Ciment et filler calcaire 69
2.2.2 Les granulats 71
2.2.3 Synthèse des propriétés des granulats naturels et légers utilisés 73
2.2.4 Adjuvants 74

2.3 Caractérisation des mélanges 74
2.3.1 Essais sur pâte 74
2.3.2 Essais sur les mélanges pâte/gravillons 77
2.3.3 Essais sur les mélanges granulaires 78

2.4 Campagne de caractérisation des bétons 82
2..4.1 Malaxage et conservation des éprouvettes en béton 83
2.4.2 Propriétés physiques à l'état frais 84
2.4.3 Les propriétés d'écoulement 89
2.4.4 Propriétés mécaniques 93
2.4.5 Propriétés de durabilité 95

2.5 Conclusion 97

3 Mise au point d'un protocole d'absorption dans la pâte de ciment 99

3.1 Introduction..... 101

3.2 Absorption des granulats dans une matrice cimentaire..... 101
3.2.1 Protocole de mesure de l'absorption des granulats légers dans la pâte de ciment 102
3.2.2 Résultats et discussions 110

3.3 Effet du degré de saturation initiale sur la perte de maniabilité dans un mélange pâte/granulat 118
3.3.1 Constituants et méthodes 118
3.3.2 Composition des mélanges..... 119
3.3.3 Résultats et discussion..... 120

3.4 Pré-saturation des granulats légers 124
3.4.1 Pré-mouillage des granulats légers 125
3.4.2 Teneur en eau des granulats pré-mouillés..... 125
3.4.3 Absorption dans la pâte des granulats pré-mouillés..... 126

3.5 Conclusion 127

4 Mise au point d'une méthodologie de formulation..... 129

4.1 Introduction..... 131

4.2 Modèle d'empilement compressible 132
4.2.1 Généralités 132
4.2.2 Rappel du modèle d'empilement virtuel 132
4.2.3 Description du modèle d'empilement compressible 137

4.3 Application du modèle d'empilement compressible à des formules exploratoires de BAPL..... 139
4.3.1 Calcul de l'indice de serrage dans le béton frais 139
4.3.2 Critère de contrôle de la stabilité 140

4.4 Modèle de composite gravillons légers/mortier de sable normal pour prévoir la résistance à la compression des bétons légers 144
4.4.1 Description du modèle série/parallèle..... 144
4.4.2 Détermination du module élastique de la pâte de ciment 146
4.4.3 Détermination de la résistance à la compression et du module d'élasticité du mortier de sable normal..... 146
4.4.4 Détermination du module d'élasticité des granulats légers 149
4.4.5 Confrontation des données du modèle série/parallèle aux données expérimentales 149

4.5 Méthode de formulation des BAPL de mortier normal basée sur l'optimisation de la demande en eau des granulats légers 151
4.5.1 Principe de la méthode de composition..... 151
4.5.2 Schéma de synthèse de la méthode 153
4.5.3 Description de la méthode de composition 154
4.5.4 Exemple d'application..... 157

4.6 Conclusion 160

5 Validation expérimentale de la méthode de formulation..... 161

5.1 Introduction..... 163

5.2 Cahier des charges..... 163

5.3 Composition et mise en œuvre des bétons du cahier des charges 165
5.3.1 Validation de la méthode de formulation 165
5.3.2 Formulation des bétons de la famille BAPL I 170
5.3.3 Formulation des bétons de la BAPL II 174
5.3.4 Formulation des BAPL III..... 184

5.4 Confrontation des résultats expérimentaux des BAPLSN avec les modèles de la littérature 188
5.4.1 Rapport entre la masse volumique sèche et la masse volumique réelle à l'état frais 189
5.4.2 Estimation de la résistance à la compression de BAPL..... 191
5.4.3 Estimation du module d'élasticité..... 193

5.5 Formulation des bétons auto-plaçants légers de sable léger (BAPLSL) 195
5.5.1 Particularité des bétons de sable léger 196
5.5.2 Approche de formulation..... 197
5.5.3 Synthèse et analyse des résultats 198

5.6 Conclusion 204

Conclusion générale..... 205

Perspectives..... 208

Références bibliographiques 209

Annexes 221

Table des figures

Chapitre 1

1.1 Processus de fabrication de granulat léger à partir de boue issue de réservoir de décantation (Chen et al. 2012)

1.2 Diagramme de Riley pour la composition limite des argiles expansibles sous traitement thermique (Riley 1950)

1.3 Résultats d'essai d'intrusion par la méthode du porosimètre à mercure sur 3 types de granulats légers dont deux d'argile expansée (C1, C2) et un de schiste expansé (S) (Zhang et al. 2004)

1.4 Porosité de granulats légers de boue de réservoir d'eau expansés a diverses température et contenant diverses proportion en masse de chaux. (a) 0 %, (b) 1 % et (c) 5 % (Liao and Huang 2011)

1.5 Appareillage de mesure de l'absorption d'eau sous vide (Mills-Beale et al. 2009)

1.6 Dispositif de l'essai d'absorption basé sur le déplacement gravitationnel de l'eau libre (Kasemchaisiri and Tangtermsirikul 2007)

1.7 Isothermes de désorption sur un jeu de quinze granulats légers (Castro et al. 2011)

1.8 Description de la résistance à l'écrasement d'un grain de granulat léger (Kockal and Ozturan 2011)

1.9 Relation entre module équivalent et la mass volumique (De Larrard 1995)

1.10 Relation entre la masse volumique réelle et le module d'élasticité dynamique de grains de granulat léger (Bremner and Holm 1986)

1.11 Gamme de masses volumiques réelles sèches des bétons légers avec différentes types de granulats légers (ACI 213 R – 79 1981)

1.12 Mécanismes d'interaction pâte/granulat léger (Zhang and Gjørv 1990)

1.13 Modèle de Powers montrant la répartition des phases dans une pâte contenant du sable léger de schiste expansé (Henkensiefken et al. 2009)

1.14 Évolution du degré d'hydratation du ciment dans une pâte de rapport eau/ciment de 0,30 en fonction du pourcentage volumique de sable léger de schiste expansé (Henkensiefken et al. 2009)

1.15 Effet du facteur de compacité (PF) sur l'ouvrabilité du béton (Su and Miao 2003)

1.16 Rapport entre compacité réelle et indice de serrage pour un mélange binaire

1.17 Etalements de BAPL identifiés dans la littérature

1.18 Temps d'écoulement à l'entonnoir en V de BAPL identifiés dans la littérature

1.19 Représentation schématique de l'effet du type de superplastifiant sur le seuil de cisaillement et la viscosité plastique (Banfill 2011)

1.20 Essai de ségrégation (tiré de Wu et al. 2009)

1.21 Résistance moyenne à la compression de BAPL identifiés dans la littérature

1.22 Expansion de prismes de mortiers avec un rapport eau/ciment égal à 0,55 après immersion dans une solution à 5 % de Na2SO4 pendant 300 jours (Elsharief et al. 2005)

1.23 Corrélation entre profondeur de carbonatation et perméabilité à l'eau de deux bétons pour différentes conditions de cure et exposés pendant 2 ans à une atmosphère marine (Haque and Al-Khaial 1999)

Chapitre 2

2.1 Courbes granulométriques des granulats

2.2 Essai de demande en eau sur une addition calcaire

2.3 Cône de Marsh

2.4 Dosage de saturation du superplastifiant à base d'éther poly-carboxylique modifié

2.5 Mini cône

2.6 Pré-mouillage des granulats légers

2.7 Procédure d'introduction des constituants au cours du malaxage

2.8 Appareils de mesure de masse volumique réelle et de teneur en air

2.9 Comparaison de masse volumique et teneur en air entre l'aéromètre et le roll-a-meter

2.10 Physique de la ségrégation dans les bétons légers

2.11 Essai de ségrégation à la colonne

2.12 Essai d'étalement au cône d'Abrams

2.13 Appareillage de mesure de la capacité de remplissage

2.14 Appareillage de mesure de l'aptitude à l'écoulement

2.15 Moule transparent

2.16 Dispositifs d'essais de résistance et de rigidité

2.17 Cycles de chargement/déchargement

2.18 Absorption et porosité accessible à l'eau

2.19 Dispositif d'essai de carbonatation accélérée

Chapitre 3

3.1 Etats d'évolution d'un grain poreux dans un mélange pâte/granulat au cours de l'essai d'absorption dans la pâte de ciment

3.2 Schéma du protocole de séparation mécanique par tamisage des grains et de la pâte de ciment

3.3 Différents états du mélange au cours de l'essai d'absorption dans une pâte de ciment

3.4 Absorption dans la pâte de ciment et dans l'eau pour un granulat de masse volumique normale

3.5 Absorption entre un granulat léger et un granulat traditionnel dans l'eau et dans une pâte de ciment

3.6 Evolution du rapport e/c calculé en fonction du type de granulats dans un mélange pâte/granulat

3.7 Evolution de l'absorption du granulat d'argile expansée en présence de pâte de différents rapports e/c

3.8 Evolution de l'absorption d'un granulat léger en présence de pâte de différents rapports e/c

3.9 Evolution de la viscosité apparente de différentes pâtes de ciment Portland (Sun et al 2005)

3.10 Evolution de la viscosité apparente du mélange pâte/granulat en fonction de la concentration solide pour différents rapports e/c.

3.11 Evolution de l'étalement relatif au mini-cône d'un LWA de différents degrés de saturation initiale et d'un NWA témoin de e/c = 0.5

3.12 Illustration de l'évolution de l'étalement à cône MBE d'une pâte incorporant des granulats légers secs

3.13 Absorption dans la pâte de ciment du granulat LWA avec différents degrés de saturation initiale

3.14 Interaction entre l'absorption et l'étalement sur le granulat léger LWA et le granulat naturel NWA

Chapitre 4

4.1 Ressuage d'un BAP léger.

4.2 BAP léger homogène et BAPL présentant une ségrégation visuelle

4.3 Indice de serrage de BAPL

4.4 Modèle de composite gravillon léger/mortier de sable normal

4.5 Calage de la valeur du coefficient granulaire Kg sur des mortiers de sable de normal

4.6 Comparaison entre la résistance moyenne mesurée et la prévision du modèle série/parallèle

Chapitre 5

5.1 Distribution des gravillons dans le mortier des bétons B1, B2 et B3

5.2 Distribution des gravillons légers dans les matrices des bétons de la famille BAPL I

5.3 Distribution des gravillons légers dans la matrice des bétons B7, B8 et B9 de la famille BAPL II

5.4 Etalement des bétons B10 et B11 de la famille BAPL II

5.5 Distribution des gravillons légers dans les mortiers des bétons B10 et B11 de la famille BAPL II

5.6 Epaisseur carbonatée sur les bétons B10 et B1 de la famille BAPL II.

5.7 Etalement des BAPLSN B12 et B13 de la famille BAPL III

5.8 Distribution des gravillons légers dans la matrice des BAPLSN B12 et B13 de la famille BAPL III

5.9 Relation entre la masse volumique réelle sèche à l'état durci et la masse volumique réelle à l'état frais

5.10 Rapport entre la perte de masse et la masse volumique réelle à l'état frais

5.11 Comparaison entre modèle et expérience relative à la résistance moyenne à la compression à 28 jours de BAPL

5.12 Rapport entre la résistance moyenne à la compression et la masse volumique apparente sèche de BAPL

5.13 Comparaison des modèles d'estimation de la résistance à compression avec les résultats expérimentaux

5.14 Relation entre le module d'élasticité et la résistance à la compression de BAPLSN

5.15 Comparaison entre les modèles de prédiction du module d'élasticité et les résultats expérimentaux

5.16 Etalement des BAP de sable léger d'argile expansée

5.17 Etalement des BAP de sable léger d'ardoise expansée

5.18 Distribution des granulats légers d'argile expansée dans la matrice cimentaire du béton BS2

5.19 Rapport entre la résistance à la compression à 28 jours et le rapport E_{eff}/L des BAPLSL.

Table des tableaux

Chapitre 1

1.1 Compositions chimiques de quelques granulats légers

1.2 Masses volumiques indicatives de granulats légers

1.3 Absorption en fonction du temps de granulats légers artificiels courants (Castro et al. 2011)

1.4 Propriétés des granulats poreux (Zhang et al. 2003)

1.5 Masses volumiques de quelques granulats légers

Chapitre 2

2.1 Propriétés chimiques et physiques du ciment et de l'addition calcaire

2.2 Résistance de liants

2.3 Modules élastiques des granulats légers calculés à partir des données « fournisseurs »

2.4 Caractéristiques physiques des granulats

2.5 Compacité expérimentale de poudres sans adjuvant

2.6 Compacité du sable naturel

2.7 Compacité des granulats d'argile expansée

2.8 Compacité des granulats d'ardoise expansée

2.9 Pré-mouillage des gravillons légers

2.10 Essais réalisés sur les formules de béton

2.11 Masse volumique réelle et teneur en air mesurées à l'aéromètre et au « roll-a-meter »

2.12 Composition en kg/m^3 de mortiers pour la validation de mesure de teneur en air

2.13 Classes d'étalement

2.14 Classes de viscosité apparente

2.15 Classes d'aptitude à l'écoulement

Chapitre 3

3.1 Composition des mélanges pâte/granulat

3.2 Compositions réelles et absorptions dans la pâte de ciment à diverses échéances

3.3 Evolution théorique du rapport eau efficace/ciment dans un mélange pâte/granulat d'argile expansée

3.4 Valeurs moyennes d'absorption

3.5 Composition initiale des mélanges pâte/granulat

3.6 Evolution de l'étalement du mélange pâte/granulat pour deux types de granulats

3.7 Valeurs moyennes d'étalement et d'absorption dans une pâte de rapport e/c de 0,5 pour différents degrés de saturation initiale

3.8 Pré-mouillage des gravillons légers

3.9 Absorption des granulats pré-mouillés dans une pâte de rapport e/c de 0,5

Chapitre 4

4.1 Compositions réelles en Kg/m^3 de BAPL testées

4.2 Propriétés des BAPL testés

4.3 Indice de serrage des BAPL

4.4 Composition des mortiers

4.5 Résultats de comparaison entre les données calculées et les données mesurées

4.6 Paramètres de composition de BAPLSN

4.7 Propriétés des compositions de BAPLSN

4.8 Paramètres d'entrée de l'outil de calcul

4.9 Récapitulatif de la composition en kg/m^3

Chapitre 5

5.1 Familles de BAPL avec les masses volumiques réelles sèches et les résistances à la compression visées

5.2 Critères et paramètres de validation de la méthode de formulation des BAPL

5.3 Compostions réelles de BAPLSN

5.4 Compositions théoriques des mortiers de BAPLSN

5.5 Compositions théoriques des pâtes de BAPLSN

5.6 Propriété à l'état frais des BAPLSN

5.7 Propriétés physiques et mécaniques des BAPLSN

5.8 Compositions réelles des bétons de la famille BAPLI

5.9 Compositions théoriques des mortiers dans les bétons de la famille BAPL I

5.10 Compositions théoriques des pâtes dans les bétons de la famille BAPL I

5.11 Propriétés à l'état frais des bétons de la famille BAPL I

5.12 Propriétés physiques et mécaniques des BAPL I

5.13 Compositions réelles des bétons de la famille BAPL II

5.14 Compositions théoriques des mortiers des bétons de la famille BAPL II

5.15 Compositions théoriques des pâtes des bétons de la famille BAPL II

5.16 Propriété à l'état frais des BAPL II

5.17 Propriétés physiques et mécaniques à 28 jours des bétons B7, B8 et B9 de la famille BAPL II

5.18 Propriétés de l'état frais des bétons B10 et B11 de la famille BAPL II

5.19 Propriétés des bétons à l'état durci

5.20 Propriétés de durabilité sur les bétons B10 et B11 de la famille BAPL II

5.21 Compositions théoriques après optimisation des compostions B10 et B11en kg/m^3

5.22 Compositions réelles des bétons de la famille BAPL III

5.23 Compositions théoriques des mortiers des bétons de la famille BAPL III

5.24 Compositions théoriques des pâtes des bétons de la famille BAPL III

5.25 Propriétés à 'état frais des BAPLSN B12 et B13 de la famille BAPL III

5.26 Propriétés à l'état durci des BAPLSN B12 et B13 de la famille BAPL III

5.27 Propriétés de durabilité des BAPLSN B12 et B13 de la famille BAPL III

5.28 Compositions réelles des BAPLSL de la famille BAPL I

5.29 Compositions théoriques des mortiers de BAPLSL de la famille BAPL I

5.30 Compositions théoriques des pâtes de BAPLSL de la famille BAPL I

5.31 Propriété à l'état frais des BAPLSL

5.32 Propriétés mécaniques des BAPLSL

Introduction générale

L'utilisation des granulats légers date de l'époque romaine qui se situe entre 27 avant J. C. et 476 après J. C. Plusieurs édifices pour ne citer que le Panthéon et le Colisée de Rome sont réalisés en partie en béton léger (Bremner et al. 1994). Par exemple, le dôme du panthéon d'une portée d'environ 43 mètres a été réalisé avec des matériaux de densités variables dont un contenant de la pierre ponce. Après le déclin de l'empire Romain, l'utilisation des granulats légers naturels tels que la pierre ponce, la pouzzolane, la diatomite etc. a été ralentie jusqu'à l'avènement des granulats légers artificiels tels que l'argile expansée, l'ardoise expansée, cendre volante fritée etc. au XX ^{ième} siècle.

Historiquement, l'ingénieur Hayde Stephen est le premier à fabriquer des granulats légers par l'application d'un traitement thermique sur un matériau expansible (Arnould et Virlogeux 1986) et (Tang et al. 2011). Il déposa un brevet en 1918 pour la technique d'expansion de l'argile, de l'ardoise et du schiste à partir d'un four rotatif. C'est le début de la production et de la commercialisation des granulats légers artificiels. Les granulats légers artificiels sont désormais utilisés aussi bien dans la construction civile que dans la construction navale comme l'illustre la **Figure**. En France, l'intérêt pour les granulats légers artificiels s'est développé au début des années 1970 avec l'implantation de la première usine en 1964 à Watten dans le nord. Selon (Chen et al. 2012), les granulats légers sont aujourd'hui présents dans différents domaines tels que le bâtiment (béton préfabriqué et béton prêt à l'emploi), les travaux publics (remblai), l'horticulture (grainage de jardin), du traitement des eaux (filtre ou lit bactérien). Certains sont peu résistants voire fiables tandis que d'autres sont résistants et durs.

L'introduction des granulats légers dans le béton peut conférer au matériau, une association de qualités telles que la légèreté et l'isolation thermique. Le remplacement des granulats de masse volumique normale par des granulats légers allège le poids propre des produits en béton qui parfois peut constituer un handicap pour le transport. L'allègement de poids propre du béton influe positivement sur le dimensionnement de l'infrastructure et la superstructure d'un édifice. La masse volumique réelle sèche des bétons légers varie entre 400 et 2 000 kg/m^3 contre environ 2 300 kg/m^3 pour un béton traditionnel soit une réduction de poids autour de 15 à 80 % par rapport au béton traditionnel. Selon la masse volumique réelle sèche, on peut distinguer deux familles de bétons légers : les bétons légers isolants et les bétons légers de structure. Les bétons légers isolants dont la masse volumique réelle sèche se situe entre 400 et 1 200 kg/m^3 sont préconisés lorsque les propriétés thermiques sont prépondérantes. Les bétons légers de structure dont la masse volumique varie de 1 200 à 2 000 kg/m^3 sont utilisés lorsque les performances mécaniques deviennent prééminentes.

Selon (Valore 1980) la conductivité thermique du béton dépend principalement de sa masse volumique réelle sèche. Ainsi, la structure alvéolaire des granulats légers confère au béton léger, une conductivité thermique et une dilatation thermique intéressantes. A titre d'exemple, le béton traditionnel a une conductivité thermique de 1,75 W/m. °C tandis que celle du béton léger d'argile expansée ou de schiste expansé se situe entre 0,50 et 0,80 W/m. °C (Couasnet 2007). Ce

qui confère au béton léger une meilleure isolation thermique. Le coefficient de dilatation thermique d'un béton léger de sable léger est approximativement égal à 80 % de celui du béton de masse volumique normale et s'approche des 100 % lorsque le sable léger est remplacé par du sable naturel (Adrian 1968). Par ailleurs, le béton léger a une bonne tenue au feu en raison de sa faible conductivité thermique et son faible coefficient de dilatation thermique (Abrams and Gustaferro 1968).

En pratique, la résistance à la compression des bétons légers de structure se situe entre 25 et 60 MPa. Des résistances à la compression dépassant les 60 MPa sont atteintes avec des granulats légers résistants (tels que l'argile expansée, l'ardoise expansée, le schiste expansé, la cendre volante frittée etc.) et un dosage en ciment plus élevé (de 10 à 50 % plus élevé que celui d'un béton traditionnel). Du point de vue de la rigidité, les bétons légers sont plus souples (moins rigides) que les bétons de masse volumique normale. Leur module représente entre 1/2 et 2/3 de celui du béton de masse volumique normale avec un module d'élasticité compris entre 11 et 21 GPa (Adrian 1968).

Les bétons auto-plaçants (BAP) sont des bétons, très maniables, homogènes et stables qui se mettent en place sous le seul effet de la gravité. Leur serrage ne nécessite pas de vibration interne ou externe même en présence d'un réseau d'armatures dense. Grace à ces nombreux avantages, les bétons auto-plaçants (BAP) sont aujourd'hui considérés comme étant l'une des innovations les plus marquantes des deux dernières décennies dans le domaine du béton. L'idée de ce matériau innovant a été lancée dans les années 1980 par des chercheurs de l'Université de Tokyo. Il a très vite concis les industriels du Japon et du monde au point de connaitre un essor véritable ces dernières années dans l'industrie du béton en France. Les BAP présentent plusieurs avantages. L'intérêt technique se justifie par le remplissage des coffrages très ferraillés sans moyen de serrage, la fabrication de pièces de formes complexes et la qualité du matériau et du parement. L'intérêt économique trouve son essence dans le gain de temps et de main d'œuvre à la mise en place, l'augmentation de la durée de vie des moules. L'intérêt social et environnemental se juge par l'absence de bruit, la réduction de la pénibilité et l'amélioration de la sécurité au travail.

Sur le plan rhéologique, les bétons auto-plaçants sont caractérisés par un seuil de cisaillement inférieur à 100 Pa et une viscosité comprise entre 20 et 100 Pa.s et parfois plus (Wallevik and Wallevik 2011).

L'association de ces deux familles ouvre donc la voie à un nouveau béton qui aurait l'avantage d'être à la fois auto-plaçant et léger (Shi and Wu 2005) et (Cauberg and Kestemont 2009) : le béton auto-plaçant léger (BAPL). Il peut combiner les propriétés mécaniques et thermiques du béton léger de structure et les propriétés rhéologiques intrinsèques du béton auto-plaçant (Wu et al. 2009) et (Kaszynska 2010).

Cependant, la différence de densité entre les granulats légers et la pâte d'une part et le pouvoir absorbant des granulats légers vont compliquer davantage la formulation et la production des bétons auto-plaçants légers (Papanicolaou and Kaffetzakis 2011).

La structure alvéolaire qui confère la légèreté aux granulats légers est à l'origine de deux problématiques à considérer que sont l'absorption et la ségrégation. La grande porosité des

granulats légers engendre une forte absorption en présence d'eau. Cette absorption d'eau peut de façon substantielle modifier les paramètres de formulation notamment le rapport eau efficace/liant et la masse volumique réelle à l'état frais du béton (ACI 211. 2-98 1998). Ce phénomène peut également réduire l'ouvrabilité du béton frais en provoquant un raidissement prématuré des BAPL.

De plus, la légèreté des granulats légers est également la principale cause de ségrégation dans les mélanges incorporant des granulats légers (Kim et al. 2010). La différence de densité entre les granulats légers et la matrice cimentaire peut favoriser la séparation entre les phases et accroitre la propension des BAPL à la ségrégation (Lo et al. 2007).

Il existe plusieurs méthodes de formulation des bétons auto-plaçants (BAP). Elles ont été adaptées pour formuler diverses gammes de bétons auto-plaçants légers (BAPL) (Shi et al. 2005), (Hwang and Hung 2005), (Choi et al. 2006) et (Lo et al. 2007). Ces méthodes conservent pour la plupart une bonne part d'empirisme qu'il conviendra de réduire pour tendre vers des approches plus rationnelles.

Cette thèse porte sur la mise au point d'une méthodologie de formulation plus rationnelle des BAPL. Ce travail est le fruit d'une collaboration entre le Centre d'Etudes et de Recherches de l'Industrie du Béton (CERIB) et le Centre des Matériaux des Mines d'Alès (C2MA). Cette thèse propose une approche de formulation des BAPL construite autour d'un ensemble de données cohérent et sur la quantification des phénomènes tels que l'absorption dans la pâte de ciment et la ségrégation. A partir de cette méthode, différentes gammes de BAPL sont proposées pour répondent aux critères du cahier des charges en termes de masse volumique réelle sèche et de résistance à la compression.

Cette thèse est structurée et présentée en cinq chapitres. Le premier chapitre porte la synthèse bibliographique sur la porosité et l'absorption des granulats légers et montre les conséquences induites par ces caractéristiques sur les propriétés à l'état frais et l'état durci des bétons légers. Ce chapitre met en évidence les problématiques inhérentes à la formulation des bétons auto-plaçants légers (BAPL) et analyse les méthodes de formulation dédiées tout en insistant sur le caractère empirique qu'elles revêtent.

Le deuxième chapitre présente les méthodes de caractérisation utilisées pour qualifier les constituants, les mélanges granulaires et les différentes formules de bétons réalisées.

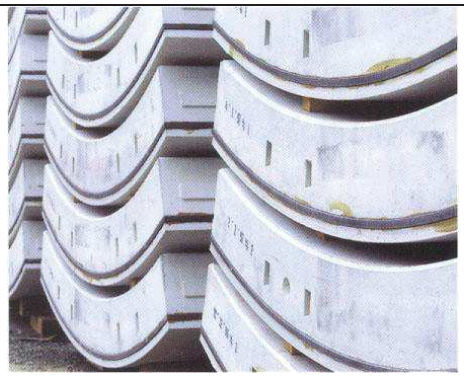
Le troisième chapitre décrit le protocole de quantification des transferts d'eau dans la pâte qui a été mis au point dans cette thèse et montre à travers des cas concrets, sa validité et sa robustesse. Ce chapitre dévoile aussi l'effet du degré de saturation initiale des granulats légers sur l'ouvrabilité des mélanges et quantifie les changements induits sur la consistance du béton à l'échelle macroscopique.

Le quatrième chapitre expose la méthode de formulation proposée et sa mise en œuvre pour assurer le caractère auto-plaçant des bétons, contrôler le risque de ségrégation et atteindre des performances mécaniques appréciables. Ce chapitre tire sa source des chapitres 2 et 3 qui apportent les données d'entrée nécessaires pour faire tourner l'outil de formulation.

Le cinquième chapitre présente et analyse les résultats de validation de la méthode de formulation sur différentes gammes de bétons auto-plaçants légers de sable normal (BAPLSN) et de bétons auto-plaçants de sable léger (BAPLSL). Ce Chapitre fait le lien entre les quatre premiers chapitres et met aussi en avant des relations efficaces entre propriétés à l'état frais et propriétés à l'état durci afin d'aboutir à une approche plus simplifiée de la méthode de formulation.



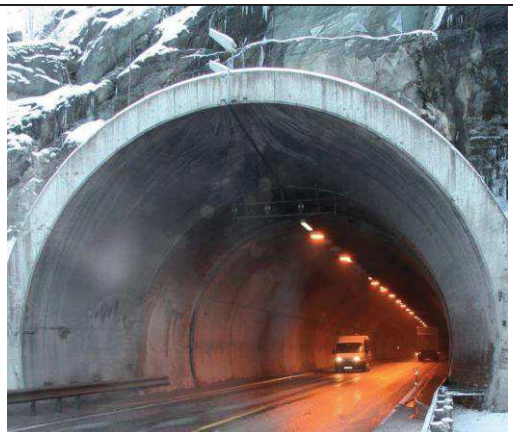
Ossature poteaux-poutres en BAP



Voussoirs en BAP



Navire en béton léger datant de 1943 (Doc Argex)



Tnnuel avec des voussoirs allégs à Oslo en 2004

Figure Structures en béton auto-plaçant et en béton de granulats légers

Chapitre 1

Revue bibliographique sur les bétons auto-plaçants de granulats légers

Sommaire

1.1 Introduction 25
1.2 Granulat légers pour bétons de structure 26
1.2.1 Procédés de fabrication des granulats légers 26
1.2.1.1 Granulats légers naturels 26
1.2.1.2 Granulats légers artificiels 27
1.2.1.3 Expansion des granulats légers 28
1.2.2 Nature chimique des granulats légers 30
1.2.3 Propriétés physiques des granulats légers 31
1.2.3.1 Microstructure et porosité 31
1.2.3.2 Masses volumiques apparentes sèches 33
1.2.3.3 Méthode de caractérisation de l'absorption des granulats 35
1.2.3.4 Quelques données de la littérature sur l'absorption des granulats légers 37
1.2.3.5 Absorption des granulats légers dans la pâte 39
1.2.3.6 Restitution d'eau par les granulats légers saturés 39
1.2.4 Propriétés mécaniques des granulats légers 41
1.2.4.1 Résistance à l'écrasement 41
1.2.4.2 Module élastique 42
1.2.5 Différents types de granulats légers disponibles sur le marché 44

1.3 Propriétés hydriques des bétons légers 45
1.3.1 Interactions des granulats légers avec la matrice cimentaire 46
1.3.1.1 Interaction physique 46
1.3.1.2 Interaction chimique 46
1.3.1.3 Interaction mécanique 47
1.3.1.4 Conséquence des interactions sur la microstructure du béton léger 47
1.3.2 Cure interne dans les bétons légers 47
1.3.2. 1 Effet sur la réduction du retrait endogène 48
1.3.2.2 Effet sur l'accroissement du degré d'hydratation du ciment 49

1.4 Bétons auto-plaçants légers 50
1.4.1 Méthodes de formulation des BAPN 50
1.4.1.1 Méthode d'optimisation du mortier ou méthode « japonaise » 50
1.4.1.2 Méthodes d'optimisation de la pâte 51
1.4.1.3 Méthode d'optimisation du squelette granulaire 54
1.4.2 Méthodes de composition des BAPL 55
1.4.3 Propriétés à l'état frais des BAPL 56
1.4.3.1 Etalement 57
1.4.3.2 Viscosité apparente 58
1.4.3.3 Résistance à la ségrégation 60
1.4.4 Propriétés mécaniques des BAPL 61
1.4.5 Propriétés de durabilité des BAPL 63

1.5 Conclusion 65

1.1 Introduction

Une des techniques d'allègement des structures en béton consiste à remplacer totalement ou partiellement les granulats de masse volumique normale par des granulats légers (Razzouk 1975). Les granulats légers sont des granulats poreux voire très poreux présentant une structure interne alvéolée dont ils tiennent leur légèreté. Cette structure interne est obtenue soit de façon naturelle soit de façon artificielle par l'application d'un traitement thermique. Cette structure particulière est à l'origine des propriétés thermiques et acoustiques dont bénéficient les bétons incorporant des granulats légers.

La porosité et la légèreté des granulats légers bien qu'étant d'un avantage certain pour l'allégement des structures en béton, se révèlent être deux problématiques majeures dans le processus de formulation des bétons de granulats légers. La grande porosité des granulats légers engendre une forte absorption en présence d'eau. Cette absorption d'eau peut de façon substantielle modifier les paramètres de formulation notamment le rapport eau efficace/liant et la masse volumique à l'état frais du béton (ACI 211. 2-98 1998). Ce phénomène peut également réduire l'ouvrabilité du béton frais en provoquant un raidissement précoce du matériau ; ce qui est d'autant plus vrai pour les bétons auto-plaçants légers. Toutefois, l'absorption peut favoriser dans une certaine mesure, l'adhérence entre la matrice cimentaire et les granulats légers et donc améliorer les propriétés de l'interface matrice/granulat.

La légèreté des granulats poreux est également la principale cause de ségrégation dans les mélanges incorporant des granulats légers (Kim et al. 2010). La différence de densité [1]entre les granulats légers et la matrice cimentaire peut favoriser la séparation entre les phases et accroitre la propension des bétons légers à la ségrégation. Cette sensibilité à la ségrégation est plus accrue dans le cas des bétons auto-plaçants légers (Lo et al. 2007).

La formulation des bétons légers nécessite une approche différente de celle des bétons de masse volumique normale. Selon (Choi et al. 2006) l'utilisation d'une approche de formulation similaire à celle du béton traditionnel peut accroitre la propension du béton à la ségrégation et la diminution de la résistance du fait de la légèreté et de la forte absorption des granulats légers. En pratique pour limiter le risque de perte de maniabilité, les granulats légers sont soit pré-mouillés, soit « coatés[2] » ou soit conditionnés à l'état saturé sec en surface avant leur incorporation dans le béton (Zhang and Gjørv 1991), (De Larrard 1999). D'après la norme (ACI 211.2-1998), les granulats légers humides sont préférables aux granulats légers secs parce qu'ils absorbent beaucoup moins d'eau durant le malaxeur et par conséquent réduisent les risques de perte de maniabilité durant le malaxage, le transport et la mise en place du béton.

Il n'existe pas une méthode de formulation spécifique aux bétons auto-plaçants légers (BAPL). Les méthodes de composition existantes découlent de celles traditionnellement admises pour les bétons auto-plaçants de masse volumique normale (BAPN). Les contributions apportées aux

[1]Le contraste de densité indique la différence de masse volumique réelle entre la pâte de ciment et les granulats légers. Le rapport moyen de masses volumiques réelles granulat léger/pâte est compris entre 0,3 et 0,7.

[2]Le « coating » consiste à traiter la surface des grains avec des substances hydrofuges (silicone, paraffine, kérosène, ou polymères) afin d'atténuer l'absorption d'eau des granulats poreux.

méthodes traditionnelles concernent d'une part la saturation des granulats légers pour limiter de leur absorption dans le béton et d'autre part l'optimisation de la qualité et de la quantité de la pâte ou du mortier pour contrôler l'ouvrabilité, la stabilité et les performances mécaniques du béton.

La synthèse comprend trois parties. La première porte sur les propriétés des granulats légers. La deuxième fait le lien entre la nature poreuse des granulats légers et les propriétés hydriques dans des bétons légers. La troisième présente les méthodes de formulation de BAPL et rassemble de façon non exhaustive, les propriétés à l'état frais et à l'état durci de BAPL recensés dans la littérature.

1.2 Granulats légers pour bétons de structure

Les granulats légers sont des matériaux poreux. Avant de présenter ces matériaux, nous allons définir deux grandeurs qui caractérisent leur légèreté : la masse volumique en vrac et la masse volumique réelle. La masse volumique en vrac désigne le rapport de la masse de granulat léger sec pour remplir de façon aléatoire un récipient sur le volume du récipient. La masse volumique réelle exprime le rapport d'une masse donnée de granulat léger sec sur le volume qu'elle occupe dans l'eau.

Selon la norme NF EN 206-1/CN, les granulats utilisés dans le domaine de la construction peuvent être subdivisés en trois catégories :

- le granulat léger : granulat d'origine minérale ayant après séchage à l'étuve, une masse volumique réelle inférieure ou égale à 2 000 kg/m^3 ;
- le granulat courant : granulat minéral et granulaire ayant après séchage à l'étuve, une masse volumique réelle comprise entre 2 000 et 3 000 kg/m^3 ;
- le granulat lourd : granulat minéral et granulaire ayant après séchage à l'étuve, une masse volumique réelle supérieure ou égale à 3 000 kg/m^3.

Il existe deux familles de granulats légers :

- le granulat léger naturel qui ne subit aucune transformation autre que mécanique. C'est par exemple le granulat de pierre ponce, de diatomite de tufs volcaniques etc ;
- le granulat léger artificiel résultant d'un procédé industriel comprenant des modifications thermiques ou autre. C'est par exemple le granulat d'argile expansée, de schiste expansé, de cendre volante frittée etc.

1.2.1 Procédés de fabrication des granulats légers

1.2.1.1 Granulats légers naturels

Les granulats légers naturels sont des granulats d'origine minérale issus de la transformation mécanique de roches naturellement alvéolées. Ils proviennent pour la plupart de roche d'origine volcanique ou sédimentaire présentant une structure interne alvéolée. Ils sont obtenus à l'issue de diverses transformations mécaniques. Le dynamitage de la roche va donner de gros blocs. Ces gros blocs sont ensuite concassés et criblés pour donner différentes tailles de grains.

1.2.1.2 Granulats légers artificiels

Les granulats légers artificiels sont des granulats d'origine minérale dont l'expansion nécessite un traitement thermique préalable pour donner la structure alvéolée qui caractérise les granulats légers. En général, les méthodes d'expansion utilisées pour la fabrication des granulats sont à haute température (entre 1 100 et 1 500 °C). Il existe différents procédés qui dépendent de la matière première utilisée, du mode de préparation et du système de cuisson. Il s'agit entre autre du procédé par :

- four rotatif ;
- four à grille pour le frittage ;
- lit fluidisé ;
- autoclave.

Un procédé utilisant une ligne de micro-ondes est apparu récemment (www.idco-france.com/). Les fours équipés de brûleur sont remplacés par des fours alimentés aux micro-ondes (magnétons) pour l'expansion et la cuisson des granulats légers.

Les différents procédés sont fondés sur les mêmes principes et visent la formation de grains avant la cuisson et l'élimination lente de l'eau de façonnage pour éviter l'éclatement des grains.

La valorisation des sédiments, des co-produits et des déchets industriels ouvre la voie à la production des granulats légers à partir des résidus tels que les boues de décantation et de dragage. La **Figure 1.1** illustre les différentes phases du processus de fabrication d'un granulat léger à partir de boue issue d'un bassin de décantation.

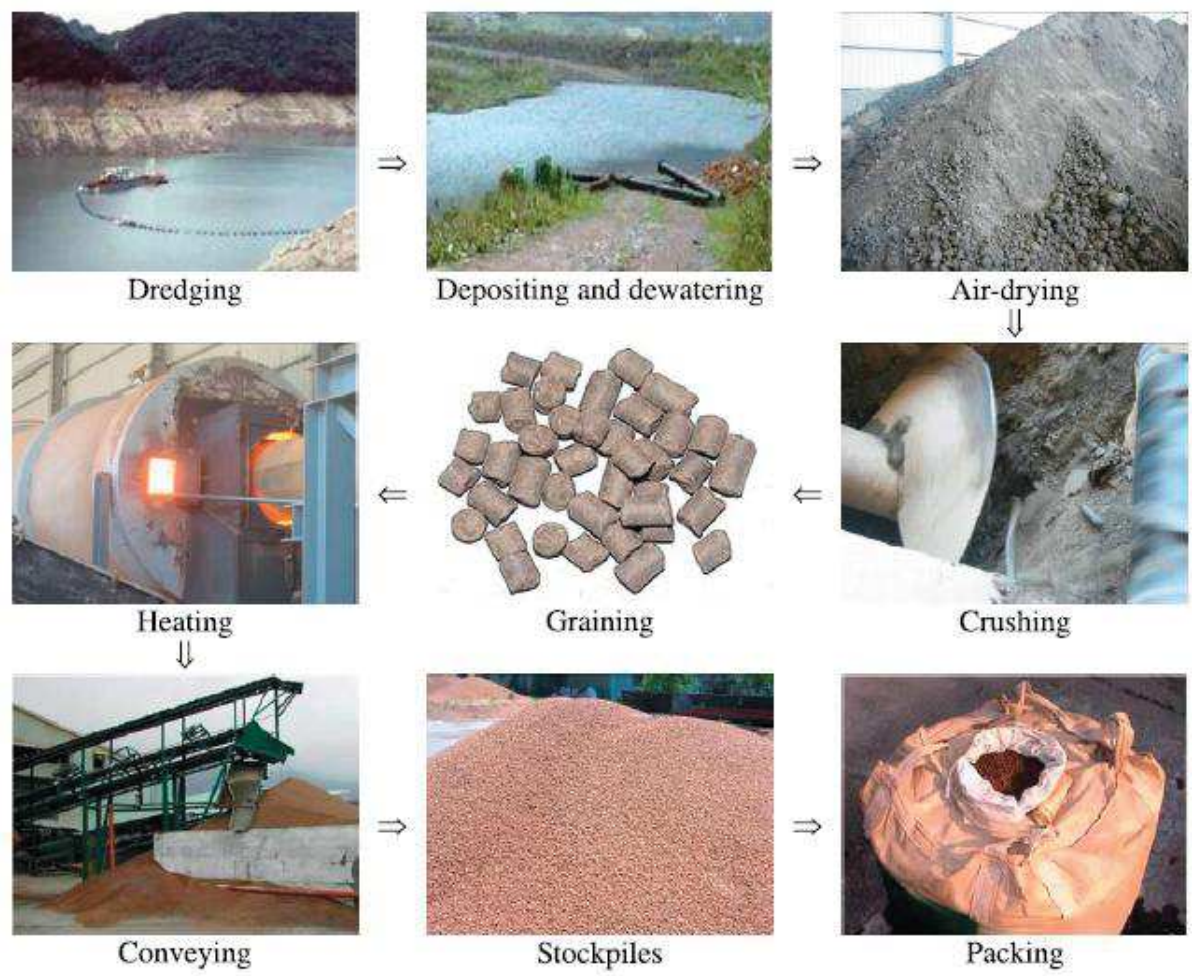


Figure 1.1 Processus de fabrication de granulat léger à partir de boue issue de réservoir de décantation (Chen et al. 2012)

1.2.1.3 Expansion des granulats légers

a) Description du phénomène

L'expansion caractérise l'augmentation de volume d'un matériau expansible sous l'effet d'un traitement thermique. D'après (EIPPCB 2005), l'expansion est influencée par plusieurs facteurs tels que la composition chimique de la matière première, la température de cuisson et la taille des granules.

Elle repose sur le phénomène d'alvéolage (qui consiste à créer un réseau d'alvéoles au sein du matériau) et nécessite la concomitance de deux actions :

- le développement du caractère pyroplastique qui rend le matériau déformable ;
- les dégagements gazeux à la température de grésage qui déforment le matériau.

La phase essentielle de l'expansion réside dans la synchronisation parfaite, dans une plage de température donnée, du développement du grésage et des dégagements gazeux.

Les travaux concernant la nature des gaz provoquant l'expansion font état de la présence non seulement de CO, CO_2, SO_2, SO_3 mais aussi de O_2, N_2 et de H_2O (Everhart et al. 1958), (Scheumann and Fastabend 1963). Toutefois, les composés dont les rôles sont les mieux connus et les plus importants sont le carbone, le soufre et l'oxyde ferrique. Les deux premiers ont une action de combustible et le troisième joue le rôle de comburant en apportant l'oxygène nécessaire à la combustion.

Dans le cas de l'argile expansée, la matière première est constituée de composés organiques et minéraux.

Au cours de la phase de préchauffage, le craquage thermique des matières organiques (telles que l'amidon, la cellulose, les glucides ou encore les acides gras) conduit à la libération du carbone. Le carbone ainsi libéré va se fixer sur les particules argileuses.

La décarbonatation des composés minéraux notamment des carbonates, produit des oxydes fondants dans une plage température comprise entre 300 et 900 °C. Ces oxydes contribuent pour la plupart à élargir le palier de fusion. Les différentes réactions sont explicitées par les équations ci-après :

$CaCO_3 \longrightarrow CaO + CO_2$ (température de réaction : 825 °C)
$MgCO_3 \longrightarrow MgO + CO_2$ (température de réaction : 350 °C)
$Na_2CO_3 \longrightarrow Na_2O + CO_2$ (température de réaction : 851 °C)
$K_2CO_3 \longrightarrow K_2O + CO_2$ (température de réaction : 891 °C)

A partir de 900 °C, les oxydes métalliques notamment les oxydes ferriques (de couleur rouge) présents dans les argiles ferrugineuses sont réduits par oxydoréduction en présence du carbone. Cette réaction produit des oxydes ferreux (de couleur noir) suivi d'un dégagement de monoxyde de carbone comme l'indique la réaction ci-après :

$C + Fe2O3 \longrightarrow 2\,FeO + CO$.

Par ailleurs, la présence de sulfure de fer (III) plutôt instable va se dissocier en soufre et en sulfure de fer (II). L'oxydation du sulfure de fer (II) produit de l'oxyde ferreux avec un dégagement de dioxyde de soufre comme l'indiquent les équations ci-dessous :

$Fe2S3 \longrightarrow 2\,FeS + S$

$2\,FeS + 3\,O2 \longrightarrow 2\,FeO + 2\,SO2$

D'autres gaz tels que le diazote jouent un rôle « source » dans le processus d'expansion.

Concomitamment, à la température d'expansion entre 1 100 et 1 300 °C, les silicates et les oxydes de fer formés sont portés à fusion et donnent un bain silicaté de viscosité finie qui encapsule les différents gaz produits.

Le refroidissement brutal fige la matière dans son état et donne in fine des grains parcourus par un réseau d'alvéoles qui confère aux grains leur légèreté.

b) Indice d'expansion

L'indice d'expansion est un paramètre adimensionnel qui caractérise l'aptitude à l'expansion de la matière première utilisée pour la fabrication des granulats légers. D'après (Ozguven and Gündüz 2012), l'indice d'expansion d'un matériau peut s'exprimer la relation suivante:

$$I_E = \frac{\rho_{int}}{\rho_{exp}} \tag{1-1}$$

I_E indice d'expansion
ρ_{int} masse volumique réelle des granules avant expansion
ρ_{exp} masse volumique réelle des granules après expansion

Selon les auteurs, les résultats obtenus sur trois différents types d'argile indiquent que l'indice d'expansion peut varier entre 1,1 et 5,5 (c'est-à-dire que le volume final des granules peut atteindre entre 1,1 et 5,5 fois le volume initial) selon la nature de l'argile, la taille initiale des granules et la température de cuisson. L'indice d'expansion est autour de 1,67 pour l'ardoise expansée et peut atteindre 30 pour la vermiculite par exemple.

1.2.2 Nature chimique des granulats légers

D'après les travaux de (Riley 1950), la composition chimique des argiles expansibles appartient au domaine délimité sur le diagramme ternaire à la **Figure 1.2**.

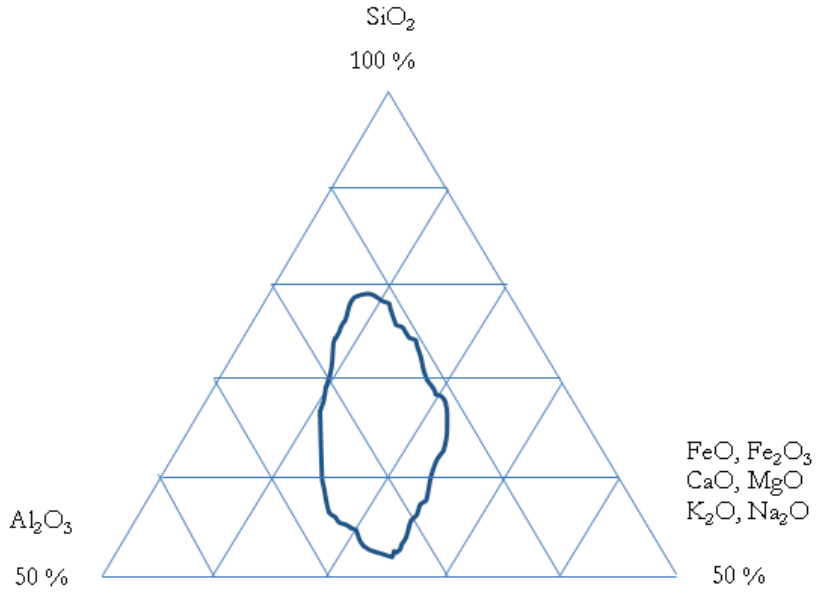


Figure 1.2 Diagramme de Riley pour la composition limite des argiles expansibles sous traitement thermique (Riley 1950)

La composition chimique des granulats légers dépend de la matière première utilisée. En général, ils sont constitués de silice, d'alumine, de chaux, d'oxydes métalliques et d'alcalins. Le **Tableau 1.1** présente la composition minérale de quelques granulats légers usuels.

Tableau 1.1
Compositions chimiques de quelques granulats légers

Producteurs	**Type de granulats**	**Proportions de Composés chimiques (%)**												
		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Mn2O3	SO_3	FeO	MnO	K_2O	Na_2O	TiO2	S
Argex	Argile expansée	55-65	15-19	12-16	1-3	1-2	0,15-0,25	-	-	-	1,5-3,5	0,3-0,7	0,8-1	0,7-1,3
Liapor	Argile expansée	55	24	14	5	-	-	-	-	-	2	2	-	-
Granulex-GEM	Ardoise expansée	63	21	8,5	0,5	1	-	-	-	-	3,6	1,5	-	-
Liaver	Verre expansé	72,5	1,5	0,3	8,8	2,1	-	0,1	-	0,044	0,7	13,7	0,06	-
Euro Pomice	Pierre ponce	62,5	17,5	2,6	2,5	0,4	-	-	-	-	9,5	2,2	0,5	-

1.2.3 Propriétés physiques des granulats légers

1.2.3.1 Microstructure et porosité

Les granulats légers sont des matériaux poreux caractérisés par une porosité totale beaucoup plus importante que celle des granulats de masse volumique normale. La structure poreuse des grains est dessinée par la texture de la carapace périphérique et la distribution des pores au cœur. D'après (Wasserman and Bentur 1997), les gros pores se situent au cœur dès le début de l'expansion des granulats tandis que les petits pores se retrouvent sur la carapace dont l'épaisseur est estimée entre 500 et 1 000 μm. Selon les travaux de (Gonzàlez-Corrochano et al. 2010) sur la microstructure et la minéralogie de granulats légers fabriqués à partir d'un mélange de boue et cendre volante, la distribution des pores est hétérogène et le diamètre maximal d'un pore peut atteindre 7000 μm. Malgré, les différences dans la distribution et la taille, les pores sont en général non connectés entre eux.

La distribution capillaire de deux types de granulat d'argile expansée et d'un type de granulat de schiste expansé montre la variabilité de la taille des pores au sein d'un même type de granulat léger (**Figure 1.3**).

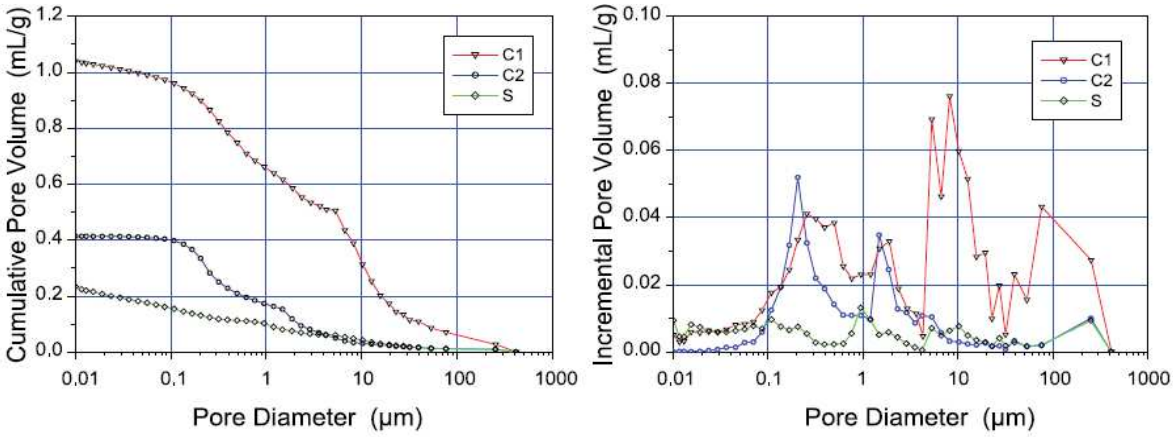


Figure 1.3 Résultats d'essai d'intrusion par la méthode du porosimètre à mercure sur 3 types de granulats légers dont deux d'argile expansée (C1, C2) et un de schiste expansé (S) (Zhang et al. 2004)

Les travaux récents de (Liao and Huang 2011) montrent que la teneur en chaux et la température d'expansion peuvent significativement modifier la distribution capillaire des granulats légers fabriqués à partir de boue de réservoir d'eau. La **Figure 1.4** indique que la taille des pores des grains au coeur augmente avec la teméprature et la teneur en chaux.

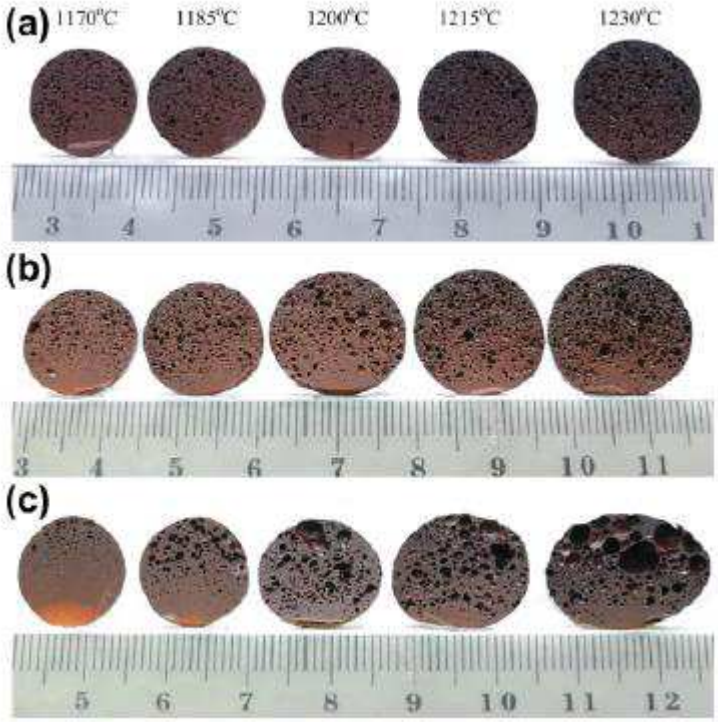


Figure 1.4 Porosité de granulats légers de boue de réservoir d'eau expansés a diverses température et contenant diverses proportion en masse de chaux. (a) 0 %, (b) 1 % et (c) 5 % (Liao and Huang 2011)

La structure caverneuse des grains leur confère une grande porosité et une masse volumique réelle faible. Les travaux de (Zhang and Gjørv 1991) sur des granulats légers résistants d'argile expansée et de cendre volante frittée indiquent que la porosité ouverte peut occuper entre 80 et 90 % de la porosité totale qui elle-même peut avoisiner 50 % voire plus du volume réel des grains.

La taille et la distribution des pores influencent la masse volumique en vrac et la résistance des granulats légers artificiels, mais déterminent surtout les propriétés d'absorption d'eau (Swamy and Lambert 1981). La porosité ouverte des granulats poreux affecte les propriétés à l'état frais et à l'état durci du béton léger.

1.2.3.2 Masses volumiques apparentes

La légèreté des granulats légers peut être caractérisée soit par la masse volumique en vrac ou soit par la masse volumique réelle.

a) Masse volumique en vrac

La masse volumique en vrac d'un granulat léger est sa caractéristique la plus fondamentale (Arnauld et Virlogeux 1986). Elle désigne le rapport de la masse de granulats légers secs remplissant de façon aléatoire et sans compactage un contenant spécifié sur le volume du contenant. Elle peut être déterminée par la procédure de la norme NF EN 1097-3.

La masse volumique en vrac intervient dans le choix du granulat léger pour un type donné de béton léger (béton isolant ou béton de structure). Pour la confection de bétons isolants on s'orienta vers des granulats légers de faible masse volumique en vrac et pour la réalisation de bétons de structure, on choisira des granulats légers de masse volumique en vrac plus élevée. Les ordres de grandeurs de masse volumique en vrac pour les principaux granulats légers sont indiqués au **Tableau 1.2**.

Tableau 1.2
Masses volumiques en vrac indicatives de granulats légers

Nature	Type de transformation	Description	Masse volumique en vrac (kg/m³)	Masse volumique réelle sèche du béton (kg/m³)
Argile expansée	Thermique	Expansion et cuisson de granules d'une argile grasse à plus de 1 100 °C	350 à 750	800 à 1 900
Schiste expansé	Mécanique et thermique	Expansion et cuisson de schistes houillers à haute température autour de 900 °C	500 à 800	800 à 1 900
Ardoise expansée	Mécanique et thermique	Fragment de schiste ardoisier expansé à une température de 1 130 °C	500 à 1 000	800 à 1 900
Pierre ponce	Mécanique	Les pierres ponces proviennent du refroidissement de lave volcanique en éruption à des températures de 500 à 600 °C	560 à 1 300	800 à 1 800
Cendre volantes frittée	Thermique	Expansion et cuisson à 1 250 °C de granules de cendres volantes obtenues par formage	600 à 1 100	1 100 à 1 900
Laitier expansé	Thermique	Laitier de fonderie en fusion mis en contact avec l'eau	600 à 1 100	1 100 à 1 900
Pouzzolane	Mécanique	Roche volcanique naturelle	650 à 1 000	1 100 à 1 900
Polystyrène expansé	Thermique	Ramollissement sous chaleur de granulés de polystyrène provoquant leur expansion	10 à 20	300 à 1 200

b) La masse volumique réelle

Elle exprime le rapport de la masse d'un échantillon de granulats légers secs sur le volume qu'il occupe dans l'eau. Elle peut être déterminée selon la norme NF EN 1097-6. La masse volumique réelle est un paramètre prééminent dans le processus de détermination des proportions des constituants granulaires entrant dans la composition du béton. Selon (Arnauld et Virlogeux 1986),

la corrélation entre la masse volumique en vrac ($\mathrm{MV_{Vrac}}$) et la masse volumique réelle ($\mathrm{MV_{Réelle}}$) peut s'établir par la relation suivante :

$$MV_{Réelle} = \frac{7}{4} MV_{Vrac} \quad (1\text{-}2)$$

Il est à noter que cette relation permet en bonne approximation, d'estimer la masse volumique réelle des granulats légers utilisés dans les bétons légers de structure dont le coefficient d'absorption d'eau n'excède pas 15 %.

1.2.3.3 Méthodes de caractérisation de l'absorption des granulats légers

La capacité d'absorption et la masse volumique réelle sont deux paramètres importants dans la formation et la prescription des compositions (Mills-Beale et al. 2009). La capacité d'absorption d'un granulat est estimée à partir du coefficient d'absorption à pression atmosphérique ou sous vide. Toutes les méthodes d'estimation du coefficient d'absorption d'un granulat sont développées en présence d'eau.

a) Méthode du pycnomètre

La méthode du pycnomètre est décrite dans la norme NF EN 1097-6. Elle consiste à immerger une prise d'essai préalablement séchée dans un pycnomètre rempli d'eau afin de mesurer l'augmentation de masse de l'échantillon du fait de la pénétration d'eau dans les pores accessibles à l'eau. Le coefficient d'absorption après 24 heures d'immersion dans l'eau (WA_{24}) est calculé à partir de la relation suivante :

$$WA_{24} = \frac{(M_{sss} - M_{sec})}{M_{sec}} * 100 \quad (1\text{-}3)$$

M_{SSS} masse des granulats saturés et superficiellement secs dans l'air
M_{Sec} masse de la prise d'essai séchée à l'étuve dans l'air

La méthode du pycnomètre est la méthode usuelle pour caractériser l'absorption d'eau des sables et gravillons. Cependant, elle est controversée pour la caractérisation des sables fillerisés et les sables légers. Dans des sables riches en fines, la méthode du pycnomètre ne permet de prendre en compte la demande en eau des fines. Par ailleurs, dans le cas des sables légers, cette méthode ne permet pas de définir de façon satisfaisante l'état saturé sec en surface.

b) Méthode basée sur la saturation sous vide

(Mills-Beale et al. 2009) ont proposé un appareillage (**Figure 1.5**) adapté à la mesure sous vide de la masse volumique réelle et l'absorption d'eau des gravillons naturels, artificiels et recyclés. L'objectif est de réduire l'échéance des 24 heures préconisée dans la norme de référence en l'occurrence la norme NF EN 1097-6 pour caractériser l'absorption d'eau des granulats. L'idée est d'établir une corrélation entre le coefficient d'absorption dans les conditions atmosphériques à 24 heures et le coefficient d'absorption sous vide à 10, 20 et 30 minutes.

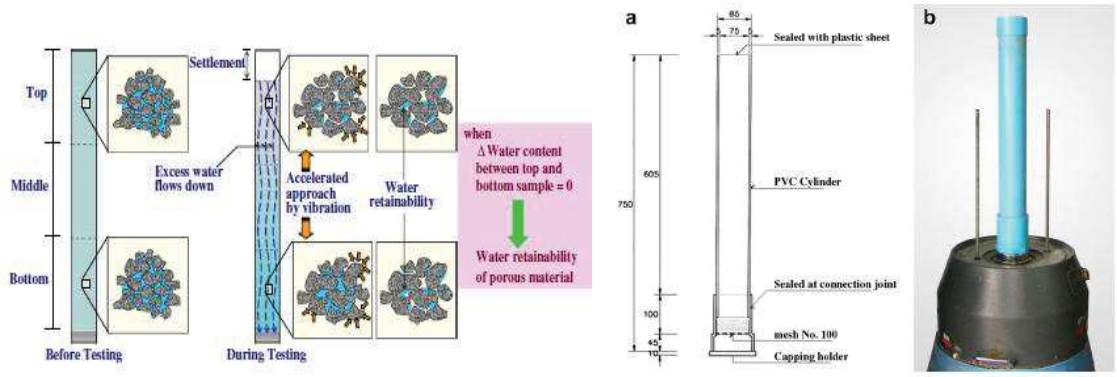
Le principe consiste à maintenir le pycnomètre sous vide lors de l'essai d'absorption en appliquant une pression constante de 4 kPa respectivement pendant 10, 20 et 30 minutes. Les résultats ont montré que le coefficient d'absorption sous vide à 10 minutes est équivalent au coefficient d'absorption à pression atmosphérique selon le mode opératoire décrit par la norme suscitée.



Figure 1.5 Appareillage de mesure de l'absorption d'eau sous vide (Mills-Beale et al. 2009)

c-) Méthode basée sur le déplacement gravitationnel de l'eau libre

L'état saturé sec en surface (S S S) est requis pour la détermination du coefficient d'absorption des granulats. Dans le cas des granulats poreux, il est difficile d'atteindre cet état par les méthodes usuelles en raison de la friction développée entre les grains. La difficulté de la mesure est donc palpable pour les sables légers, recyclés ou encore pour les granulats recevant un traitement minéralisant. (Kasemchaisiri and Tangtermsirikul 2007) ont proposé une approche qui consiste à éliminer progressivement l'eau libre par gravitation en mode statique ou en mode dynamique selon le dispositif présenté à la **Figure 1.6**.



(a) Schéma de principe *(b) Dispositif statique* *(c) Dispositif dynamique*

Figure 1.6 Dispositif de l'essai d'absorption basé sur le déplacement gravitationnel de l'eau libre (Kasemchaisiri and Tangtermsirikul 2007)

L'essai consiste à suivre l'évolution de la différence de masse entre l'échantillon en partie supérieure et l'échantillon en partie inférieure. La différence de masse s'annule lorsque l'eau libre est entièrement éliminée des deux échantillons. Cet état proche de l'état saturé sec en surface permet d'estimer la teneur en eau de l'échantillon non saturé en partie supérieure par l'expression :

$$w_i = \frac{B-A}{A} * 100 \quad (1\text{-}4)$$

W_i teneur du l'échantillon ;
B masse de l'échantillon non saturé en partie supérieure ;
A masse de l'échantillon en partie supérieure après séchage à masse constante à l'étuve à 105 ± 5 °C.

Le mode dynamique permet d'accélérer l'élimination de l'eau libre par centrifugation.

1.2.3.4 Quelques données de la littérature sur l'absorption des granulats légers dans l'eau

L'absorption des granulats légers pendant le malaxage et la mise en place du béton dépend :

- des caractéristiques des granulats ;
- de la teneur en eau initiale des granulats ;
- du rapport Eau/Liant ;
- de la viscosité apparente de la pâte.

Cette caractéristique est l'une des propriétés prépondérantes des granulats légers puisqu'elle influe notablement sur la formulation, le procédé de fabrication et sur l'équilibre hygrométrique interne du béton. Elle peut avoir des conséquences sur l'ouvrabilité et sur les performances des bétons légers (Gündüz 2008).

La cinétique d'absorption des granulats légers est relativement rapide dans les 30 premières minutes (Swamy and Lambert 1981). Selon (Neville 1995), le coefficient d'absorption à 24 heures des granulats légers (argile expansée, schiste expansé, laitier expansé etc.) utilisés pour les bétons de structure peut atteindre 15 % (en masse) et même plus.

Les travaux récents de (Castro et al. 2011) sur l'absorption et la désorption d'une dizaine de granulats légers artificiels provenant de sources diverses, sont présentés dans le **Tableau 1.3**. Ces résultats montrent que l'absorption varie selon la nature du granulat léger. L'absorption d'eau à 24 heures des granulats d'ardoise expansée se situe entre 6 et 12 % en masse. L'absorption d'eau à 24 heures des granulats de schiste expansé oscille entre 10 et 20 % en masse alors que celle des granulats d'argile expansée se trouve entre 15 et 31 % en masse.

La capacité d'absorption des granulats est liée à la distribution capillaire et au phénomène de capillarité. D'après (Vaquier 1986) le volume des capillaires de diamètres supérieurs à 2 µm est

très proche de la quantité maximale d'eau que peuvent absorber les granulats légers à pression atmosphérique.

(Castro et al. 2011) ont constaté que l'absorption d'eau décroit lorsque la taille des grains diminue. Les petits grains ont un indice d'expansion plus faible que les gros grains. Ils sont donc moins poreux et absorbent moins d'eau que les gros grains. Cependant, la demande en eau de mouillage des petits grains reste plus importante que celle des gros grains en raison d'une surface spécifique plus importante.

Tableau 1.3
Absorption en fonction du temps de granulats légers artificiels courants (Castro et al. 2011)

Types de granulats	Masse volumique réelle (kg/m³)	Coefficient d'absorption d'eau (%)			
		6h	24h	48h	Sous vide à 24h
Argile	1 290	13,2	16,0	17,6	26,8
Argile	1 490	13,1	15,0	16,7	27,0
Argile	1 100	25,4	30,5	32,6	35,5
Argile	1 390	15,3	17,7	18,4	19,1
Schiste	1 450	15,6	17,5	18,3	22,5
Schiste	1 500	12,4	14,1	14,6	24,9
Schiste	1 560	7,4	10,0	11,1	20,0
Schiste	1 400	12,9	15,6	16,5	18,6
Schiste	1 510	12,5	15,0	16,1	22,0
Schiste	1 380	16,4	19,1	20,5	25,2
Schiste	1 460	14,9	17,9	19,1	24,9
Schiste	1 480	15,9	18,9	20,1	24,6
Schiste	1 490	15,6	18,5	19,4	23,0
Ardoise	1 620	9,9	12,2	13,1	18,6
Ardoise	1 510	5,2	6,0	6,5	11,4

(Zhang et al. 2004) ont montré à partir d'essais d'absorption par immersion à pression atmosphérique et d'absorption sous vide, que l'absorption mobilisée sous vide est très éloignée de l'absorption par simple immersion à pression atmosphérique. Cet écart est dû à la présence d'air emprisonné dans les pores. Dans le cas des granulats d'argile expansée par exemple, la capacité d'absorption sous vide est environ 7 fois plus importante que celle par immersion à pression atmosphérique comme l'indique le **Tableau 1.4**.

Tableau 1.4
Propriétés des granulats poreux (Zhang et al. 2004)

Types de granulats	Masse volumique (g/cm^3)	Porosité totale par porosimètre à mercure (%)	Absorption d'eau sous vide (%)	Absorption d'une solution butylique sous vide (%)	Absorption d'eau par immersion (%)
Argile expansée 1	0,76	75,6	72,5	68,0	11,0
Argile expansée 2	1,25	41,9	42,5	15,0	5,9
Schiste expansé	1,39	33,8	15,0	6,7	4,1

(Zhang et al. 2004) ont également étudié l'influence de la viscosité d'un fluide sur la capacité d'absorption des granulats poreux. Les auteurs ont mesuré l'absorption de trois types de granulats légers après immersion sous vide dans deux liquides de viscosité différente. Les granulats sont immergés respectivement dans une solution d'acide butylique de viscosité à 25 °C égale à 7 centipoises (10^{-3} Pa.s) et dans une eau à 20 °C de viscosité égale à 1 centipoise. Les résultats ont montré que la capacité d'absorption des granulats légers est une fonction décroissante de la viscosité apparente du milieu.

1.2.3.5 Absorption des granulats légers dans la pâte

La plupart des méthodes identifiées dans la littérature pour quantifier l'absorption des granulats légers reposent sur l'absorption dans l'eau. Il n'existe pas à notre connaissance de méthode permettant de quantifier l'absorption dans la pâte de ciment.

Même si l'absorption des granulats légers dans un liquide est assez bien comprise, l'absorption des granulats légers dans une matrice cimentaire reste à explorer. (Zhang and Gjørv 1991) ont étudié la pénétration des grains de ciment et de fumée de silice dans le réseau poreux d'un granulat léger. Les auteurs ont montré que la quantité de pâte dans le réseau poreux des gravillons d'argile expansée dépend de la microstructure de la croûte extérieure, de la finesse du liant et de la viscosité de la pâte. Par analogie aux résultats de (Zhang et al. 2004), l'absorption d'un granulat léger dans la pâte de ciment devrait dépendre en partie de la viscosité apparente de la pâte. Elle devrait être d'autant plus importante que la viscosité de la pâte cimentaire est faible.

1.2.3.6 Restitution d'eau/Désorption par les granulats légers saturés

Dès l'incorporation des granulats légers secs dans le béton, les pores se remplissent progressivement d'eau sous l'effet de la capillarité. Leur degré de saturation croit rapidement dans les premiers instants et ralentit fortement dès que les gros pores sont remplis.

Au début de la prise, sous l'effet du retrait chimique[3], de la poursuite de l'hydratation et du retrait de dessiccation, l'humidité relative interne du béton frais diminue. En présence de granulats poreux saturés en eau, cette modification hygrométrique conduit à un relarguage progressif d'eau par les pores remplis d'eau. Les travaux (Henkenseifken et al. 2009) sur deux sables légers de schiste expansé (d'une masse volumique réelle de 1 560 kg/m^3, de module de finesse de 2,7 et 3,1 et d'un coefficient d'absorption de 10,5 % et 5,8 % rapportée en masse) ont montré à partir d'isothermes de désorption que la quasi-totalité de l'eau retenue dans les granulats légers (soit 98 % de l'eau préalablement absorbée) est restituée au fur et à mesure que l'humidité relative interne du mortier diminue (en passant de 100 à 87 %).

Les travaux de (Liu et al. 2010) ont également montré que l'eau en réserve dans les granulats légers est restituée progressivement dès que l'humidité relative interne du béton descend à 98 %. Le degré de saturation des granulats diminue régulièrement pour se stabiliser lorsque 95 % de l'eau emmagasinée est restituée. Ces granulats légers assurent ainsi le rôle de « réservoirs d'eau ». Ce phénomène est connu dans la littérature sous l'anglicisme « internal curing » ou « cure interne » en français. La **Figure 1.7** présente l'isotherme de désorption de quinze granulats légers comprenant des granulats d'argile expansée, d'ardoise expansée et de schiste expansé provenant de différentes usines. Les auteurs observent que la quasi-totalité de l'eau absorbée en 24 heures est restituée dès que l'humidité relative interne à atteint 85 % au bout de 150 heures.

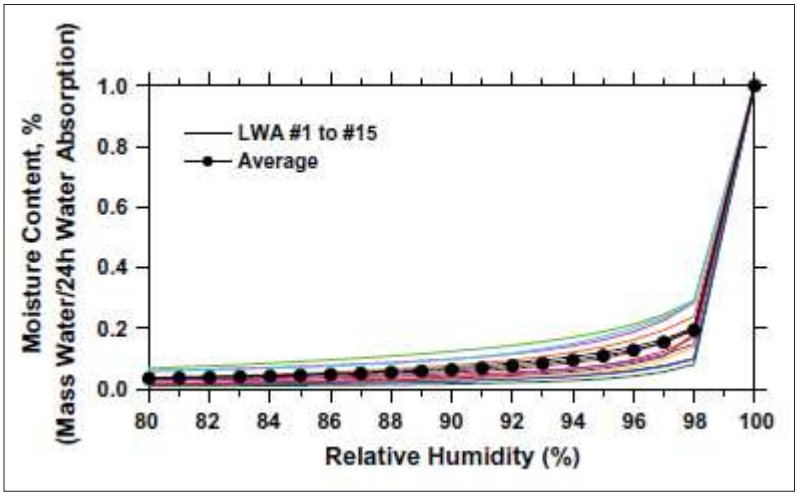


Figure 1.7 Isothermes de désorption sur un jeu de quinze granulats légers (Castro et al. 2011)

L'eau en réserve dans les granulats légers est donc disponible et peut être relarguée dans les premières heures qui suivent la mise en œuvre, c'est-à-dire dès la diminution de l'humidité relative interne du béton ; ce qui est un avantage pour l'hydratation du liant. De même, cette eau peut être restituée dans une ambiance d'exposition défavorable pour limiter une dessiccation excessive du béton après démoulage.

[3] Le retrait chimique est un processus qui se produit lors de l'hydratation du ciment. Il décrit la réduction totale de volume de la pâte de ciment. En effet, le volume des produits d'hydratation est plus faible que le volume des réactifs (ciment et eau). Il est la première cause du retrait endogène et de l'auto-dessiccation.

1.2.4 Propriétés mécaniques des granulats légers

Il est difficile de déterminer avec précision la résistance à l'écrasement et le module d'élasticité des granulats légers compte tenu de la variabilité qui existe entre chaque particule prise de façon isolée (porosité, densité, forme, dimension, irrégularités, etc.). Cependant, il existe plusieurs essais permettant d'approcher les performances mécaniques des grains.

1.2.4.1 Résistance à l'écrasement

Plusieurs essais permettent de caractériser la résistance à l'écrasement des granulats légers. Il s'agit entre autres de :

- l'essai d'écrasement au pot mis au point par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) qui caractérise la résistance conventionnelle des grains. Le principe de ce essai a été repris par la norme européenne EN 13055-1 pour mesurer la résistance à l'écrasement en vrac ;
- l'essai au fil mis au point par le Laboratoire de l'École des Mines de Paris (ARMINES) qui donne la résistance à la traction par fendage du grain ;
- l'essai de compression hydrostatique mené par le Centre Technique des Tuiles et Briques (CTTB) qui caractérise la résistance à la rupture du grain ;
- l'essai d'écrasement à la « plaque » mis au point par (Kockal and Ozturan 2011) qui donne la résistance à l'écrasement d'un grain considéré comme sphérique. La **Figure 1.8** décrit l'essai. La résistance à l'écrasement du granulat est donnée par l'équation ci-dessous :

$$\sigma = \frac{2.8 * P}{\pi * X^2} \tag{1-5}$$

σ : Résistance à l'écrasement
P : Charge à la rupture du grain
X : Diamètre du grain

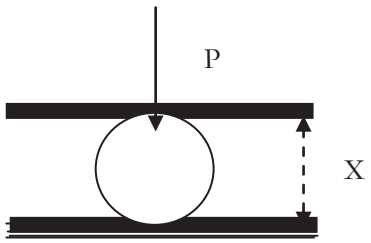


Figure 1.8 Description de la résistance à l'écrasement d'un grain de granulat léger (Kockal and Ozturan 2011)

Les résistances conventionnelles des granulats légers peuvent varier de 1 à 15 MPa en moyenne et parfois plus notamment pour les granulats légers artificiels. Elles dépendent de la nature de la matière première et de la quantité de chaleur appliquée pour les granulats légers artificiels. Le **Tableau 1.5** ci-dessous donne la résistance à l'écrasement de quelques granulats légers.

Tableau 1.5
Masses volumiques et résistances à l'écrasement de quelques granulats légers

Fabricants	Type	Classe granulaire (d/D)	Facteur de forme	Masse volumique en vrac (kg/m³)	Masse volumique réelle (kg/m³)	Résisitance à l'écrasement (MPa)
Argex	Argile expansée	4/8	Concassé	552-748	1 200	6,8-11,4
	Argile expansée	4/8	Rond	650-850	1 300	10-20
	Argile expansée	4/10	Rond	468-632	850	4,4-8,5
Maxit-Saint Gobain	Argile expansée	1/5	Rond	430	870	1,8
	Argile expansée	4/12,5	Rond	330	560	1,0
Terréal	Argile expansée	4/10	Rond	455	860	6,0
Granulex	Ardoise expansée	3/9	Concassé	700	1 200	9,3
Liaver	Verre expansé	2/4-rond	Rond	190	310	2,2
EuroPomice	Pierre ponce	7/12	Concassé	350-430	1 000	10
Lafarge	Pierre ponce	0/6	Concassé	837	1 340	-
	Pierre ponce	2/10	Concassé	599	1 230	4,9

1.2.4.2 Module élastique

Le module élastique équivalent des granulats légers usuels varie entre 2 et 17 GPa tandis que pour les granulats alluvionnaires, la variation est entre 30 et 100 GPa (Rochholz 1979). Par analyse inverse et à partir du modèle trisphère, (De Larrard 1995) établit un rapport de linéarité entre le module d'élasticité et la masse volumique réelle des granulats légers comme l'illustre la **Figure 1.9**.

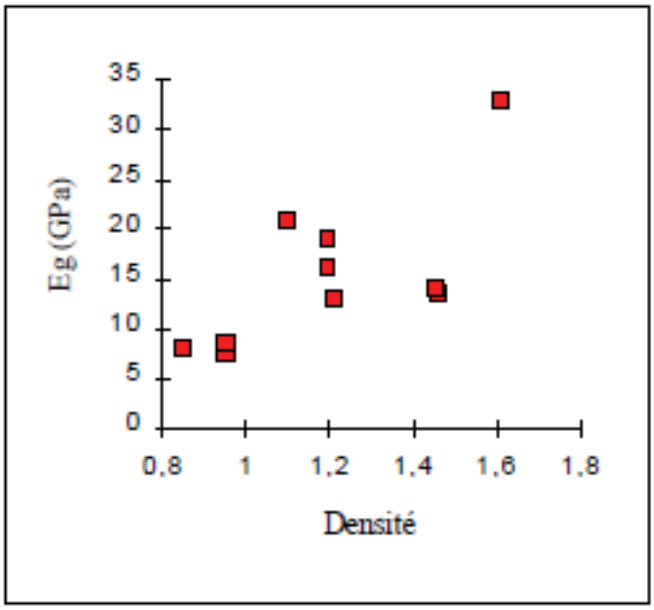


Figure 1.9 Relation entre module équivalent et la mass volumique (De Larrard 1995)

Le modèle proposé par (Bremner and Holm 1986) et illustré par la **Figure 1.10** est le modèle communément admis pour décrire le module d'élasticité dynamique[4] des granulats légers. Il s'exprime par la relation suivante :

$$E_g = 0{,}008 * {\rho_g}^2 \qquad (1\text{-}6)$$

E_g : Module d'élasticité dynamique (MPa)

ρ_g : Masse volumique réelle du granulat (kg/m^3)

[4] Module dynamique est obtenu à partir d'essai non destructif qui consiste à mesurer le module d'Young pour une excitation sinusoïdale d'une certaine fréquence

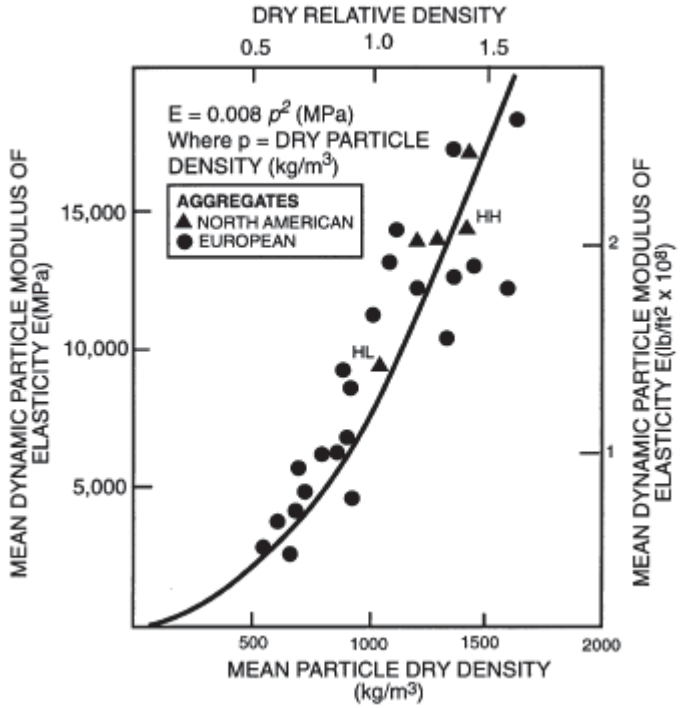


Figure 1.10 Relation entre la masse volumique réelle et le module d'élasticité dynamique de grains de granulat léger (Bremner and Holm 1986)

1.2.5 Différents types de granulats légers disponibles sur le marché

Les performances mécaniques du béton léger dépendent en partie du type de granulats légers. Lorsque les critères de résistance doivent prendre le pas sur les propriétés thermiques, les granulas légers artificiels sont plus appropriés. La **Figure 1.10** montre les catégories de bétons légers associées aux types de granulats légers. Les principaux granulats légers d'origine minérale utilisés dans les matrices cimentaires sont les suivants :

- les pouzzolanes ;
- les granulats de diatomite ;
- les granulats de perlite et de vermiculite ;
- l'argile expansée ;
- le schiste expansé ;
- les cendres volantes frittées ;
- les granulats de laitiers bouletés expansés ;
- les granulats de verre expansé ;
- la pierre ponce.

Les objectifs industriels de la thèse visent les bétons légers de structure dont la masse volumique réelle sèche est comprise entre 1 500 et 2 000 kg/m^3. Les travaux expérimentaux portent donc logiquement sur des granulats d'argile expansée et d'ardoise expansée comme le suggère la **Figure 1.11**.

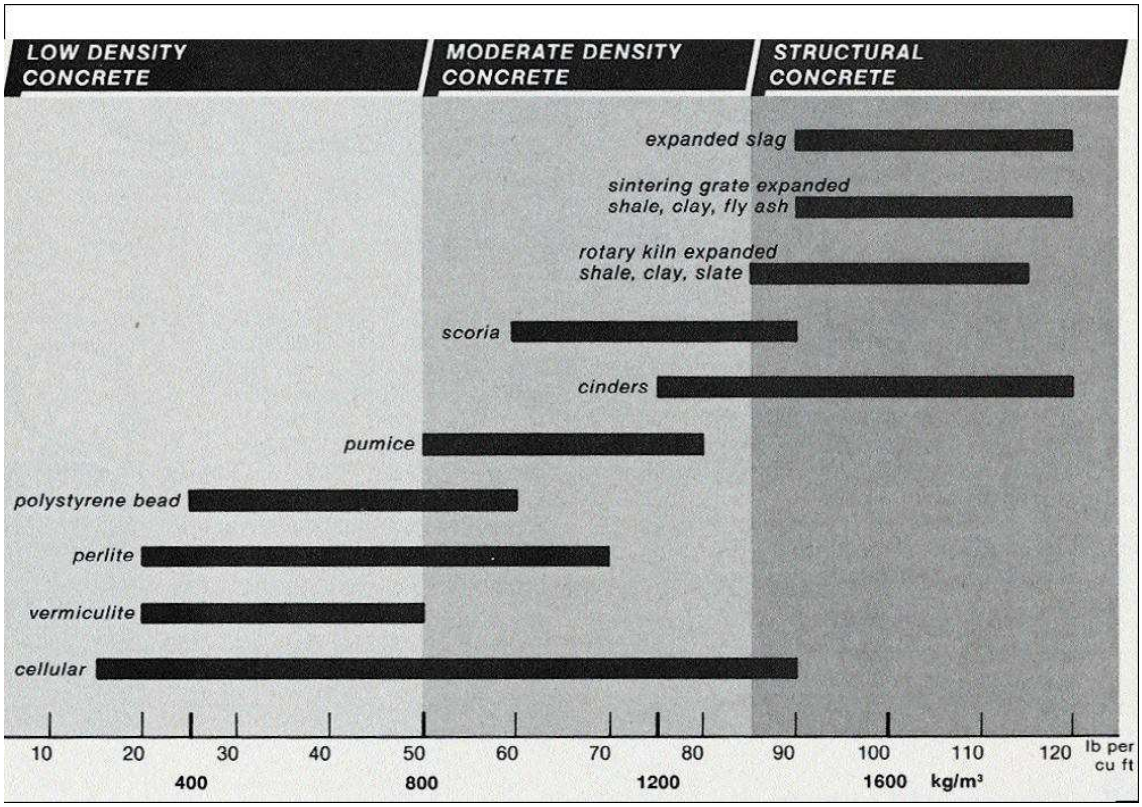


Figure 1.11 Gamme de masses volumiques réelles sèches des bétons légers avec différentes types de granulats légers (ACI 213 R – 79 1981)

La porosité des granulats légers est à l'origine des phénomènes de transfert d'eau de la pâte vers les granulats légers et vice versa. Selon la teneur en eau initiale des granulats légers, leur incorporation dans le béton peut engendrer à l'état frais et à l'état durci des mouvements d'eau. Ces mouvements d'eau pilotent les propriétés hydriques des bétons légers que nous exposons dans le paragraphe suivant.

1.3 Propriétés hydriques des bétons légers

Les bétons de granulats légers trouvent de nombreuses applications dans le domaine du bâtiment et des ouvrages d'art. Ils sont utilisés notamment pour alléger les structures telles que les poutres, les poteaux, les planchers, les tabliers de ponts etc. Les bétons légers sont également connus pour améliorer l'isolation thermique de l'enveloppe des bâtiments ou l'absorption acoustique des écrans acoustiques protégeant les riverains des nuisances sonores. Ils sont utilisés dans les structures préfabriquées ou réalisées sur chantier. Dans l'industrie du béton, cette famille de bétons est utilisée pour les produits de structure destinés aux bâtiments ou aux ouvrages de génie civil qu'ils soient en béton armé ou précontraint. Les bétons légers pour les produits de structure présentent des masses volumiques réelles sèches comprises entre 1 200 et 2 000 kg/m^3 et des résistances à la compression comprises entre 25 et 80 MPa.

En plus de la légèreté que peut apporter leur incorporation dans le béton, les granulats légers développent des interactions favorables du point de vue de la durabilité du béton. Le rôle de cure

interne attribué aux granulats légers est abondamment cité dans la littérature (Philleo 1991), (Maruyama et al. 2009), (Bentz 2009) et (Henkensiefken et al. 2009). L'absorption des granulats légers améliore les propriétés à l'interface pâte/granulat et favorise une bonne adhérence pâte/granulat (Elsharief et al. 2005) et (Bentz 2009).

1.3.1 Interactions des granulats légers avec la matrice cimentaire

Plusieurs auteurs (Holm et al. 1984), (Zhang and Gjørv 1990), (Sarkar et al. 1992), (Wasserman and Bentur 1997), (Bentz 2009) ont montré que l'interface autour des granulats légers est plus dense que celle autour des granulats de masse volumique normale du fait de leur plus grande absorption. L'absorption d'eau favorise donc une bonne adhérence pâte/granulat. Selon (Zhang and Gjørv 1990), l'interface pâte/granulats légers est le siège de mécanismes physiques, chimiques et mécaniques qui expliquent cette affinité. La **Figure 1.12** décrit les trois ordres d'interaction identifiés par les auteurs.

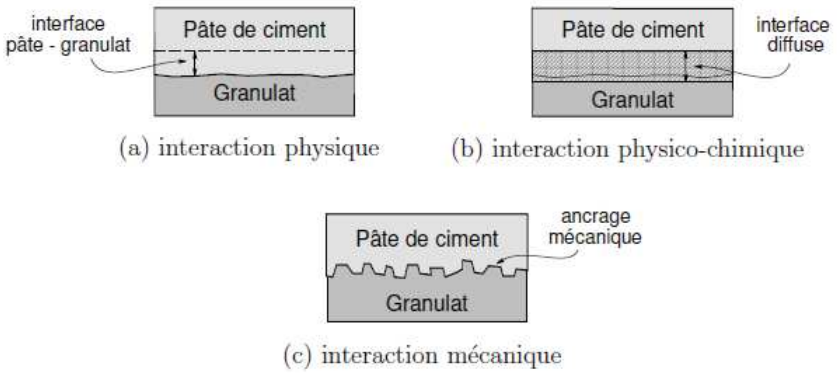


Figure 1.12 Mécanismes d'interaction pâte/granulat léger (Zhang and Gjørv 1990)

1.3.1.1 Interaction physique

L'interaction physique est liée à l'absorption d'eau par les granulats légers poreux dans la matrice cimentaire. À l'échelle microstructurale, ce phénomène physique va se traduire par une réduction du rapport eau/ciment dans la sphère d'influence de la succion par rapport au cœur de la pâte. Les résultats de (Elsharief et al. 2004) indiquent que cette réduction du rapport eau/ciment explique la faible porosité de l'auréole de transition autour des granulats légers.

1.3.1.2 Interaction chimique

L'interaction chimique met en avant la pouzzolanicité des granulats légers traités thermiquement. Selon (Arnould et Virlogeux 1986), le traitement thermique utilisé pour l'expansion de certains granulats légers (les granulats légers artificiels notamment), peut leur conférer une réactivité pouzzolanique proportionnelle à la quantité de chaleur appliquée. La réaction pouzzolanique des granulats légers va conduire à la formation de C-S-H plus denses. (Wasserman and Bentur 1997) ont mis en évidence la réactivité pouzzolanique des granulats légers de cendre volante frittée après avoir observé une réduction du rapport calcium/silice dans la région de l'auréole de transition autour des granulats à une échéance de 90 jours.

1.3.1.3 Interaction mécanique

L'interaction mécanique est une conséquence des deux premières. La rugosité de la croûte des granulats légers va favoriser la pénétration de la pâte de ciment dans les interstices à la surface et améliorer de fait l'adhérence pâte/granulat.

1.3.1.4 Conséquence des interactions sur la microstructure du béton léger

a) Épaisseur de l'interface autour des granulats légers

Les résultats de (Elsharief et al. 2004) montrent que l'épaisseur de l'interface observée autour d'un grain de sable léger de schiste expansé était de l'ordre de 10 à 15 μm contre 35 à 40 μm autour d'un grain de sable traditionnel. Ces résultats sont confortés par les observations de (Bentz 2009). L'auteur montre que l'incorporation de sable léger de schiste expansé pré-humidifié améliore la densité de l'auréole de transition ce qui réduit la connectivité du réseau poreux.

b) Porosité de l'interface autour des granulats légers

Les travaux de (Bentz 2009) ont également porté sur l'examen de la microstructure d'un mortier contenant différentes proportions de granulats légers. Les résultats indiquent que l'auréole de transition autour des granulats légers est significativement plus dense. Ces résultats confortent l'analyse de (Bamforth 1987) et confirment les observations faites par (Zhang and Gjørv 1989), (Zhang and Gjørv 1990) en se basant sur l'examen de la microstructure de l'auréole de transition autour des granulats d'argile expansée et de cendre volante frittée. Les résultats de (Sarkar et al. 1992) et de (Wasserman and Bentur 1997) vont également dans le même sens. (Holm et al. 1984) ont examiné la microstructure de carottes issues de navires et de structures marines en béton léger. Selon les auteurs, l'auréole de transition autour des granulats légers est aussi dense que le cœur de la pâte.

1.3.2 Cure interne dans les bétons légers

La cure désigne l'ensemble des traitements appliqués au béton pour limiter ou arrêter la dessiccation. D'après la norme (ACI 308R-01 2001), la cure interne est un processus par lequel l'hydratation du ciment s'opère par la disponibilité d'eau additionnelle autre que l'eau de malaxage. La fonction d'un constituant apportant la cure interne est de servir de stockage d'eau dans le matériau cimentaire. La cure interne est apparue comme une des solutions pour réduire voire annuler le retrait endogène dans les composites cimentaires à faible rapport eau efficace/ciment. Plusieurs constituants peuvent être utilisés comme agent de cure interne (Bentz et al. 2005), (Liu and Zhang 2010), (Zhutovsky et al. 2011) et (Wyrzykowski et al. 2011). Il s'agit entre autre de :

- granulats légers pré-mouillés ;
- adjuvants réducteurs de retrait ;
- polymères super-absorbants ;
- granulats recyclés poreux.

(Philleo 1991) a été l'un des précurseurs qui a suggéré l'incorporation des granulats légers saturés d'eau pour réduire le retrait au jeune âge des bétons à très haute performance (BTHP) et limiter la

fissuration précoce des composites cimentaires à faible rapport eau efficace/ciment. Les granulats légers saturés en eau sont incorporés dans un béton ou dans un mortier pour apporter une cure supplémentaire après la prise du liant. On dit que les granulats légers pré-saturés jouent un rôle de réserve d'eau.

(Bentz et al. 2005) ont développé une méthode d'estimation du volume d'eau nécessaire pour limiter le retrait endogène dans les matériaux cimentaires. Cette estimation a donné lieu à la détermination de la masse de granulats légers pré-humidifiés nécessaire pour réguler l'humidité interne du béton. Cette masse est déterminée par la relation suivante :

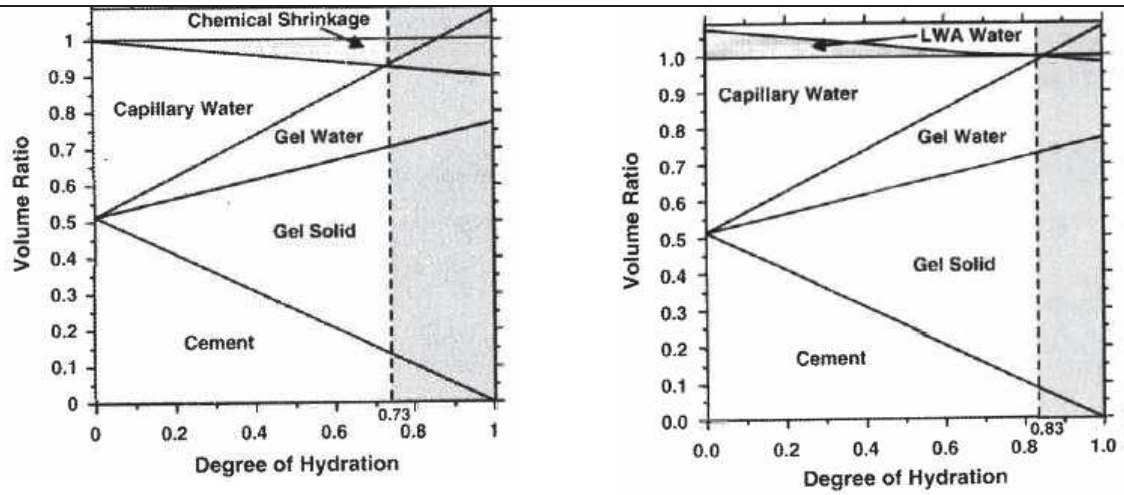
$$M_{LWA} = \frac{C_f * CS * \alpha_{max}}{S * \phi_{LWA}} \quad (1\text{-}7)$$

M_{LWA} masse sèche de granulats légers nécessaire par unité de volume de béton (kg/m^3) ;
C_f dosage en ciment du mélange (kg/m^3) ;
CS représente le retrait chimique du ciment (g d'eau/g de grains solide du ciment). Il peut être pris égal à 0,065 g d'eau/g de ciment pour CEM I selon les auteurs ;
α_{max} degré d'hydratation maximal du ciment. Il peut être pris égal à 1 pour un rapport eau/ciment de 0,38 d'après les auteurs ;
S degré de saturation des granulats. Il varie entre 0 et 1. Il peut être pris égal à 85 %, correspondant à la désorption estimée de l'eau absorbée en 24 h ;
ϕ_{LWA}coefficient d'absorption d'eau des granulats (kg d'eau/kg de granulat sec).

Plusieurs auteurs (Philleo 1991), (Jensen and Hansen 2001), (Henkensiefken et al. 2009), (Akcay et al. 2010) et (Liu and Zhang 2010) ont montré l'effet positif des granulats légers pré-humidifiés sur le retrait total des composites cimentaires et sur l'hydratation du ciment dans les bétons de granulats légers.

1.3.2. 1 Effet sur la réduction du retrait endogène

Les travaux de (Henkensiefken et al. 2009) ont montré sur la base du modèle de Powers, la répartition des différentes phases au cours de l'hydratation du ciment dans une pâte contenant du sable léger de schiste expansé (**Figure 1.13**).



(a) pâte de rapport eau/ciment de 0.30 sans sable léger

(b) pâte contenant 23,7 % en volume de sable léger de schiste expansé

Figure 1.13 Modèle de Powers montrant la répartition des phases dans une pâte contenant du sable léger de schiste expansé (Henkensiefken et al. 2009)

Les résultats montrent que la substitution de 23,7 % en volume de sable normal par du sable léger de schiste expansé annihile le retrait chimique et par conséquent, réduit de façon notable, le retrait total du matériau. Cette conclusion est corroborée par les travaux de (Akcay et al. 2010) et de (Liu and Zhang 2010).

1.3.2.2 Effet sur l'accroissement du degré d'hydratation du ciment

Les travaux de (Henkensiefken et al. 2009) montrent également que la substitution de 11 % en volume de sable de masse volumique normale par du sable léger de schiste expansé dans une pâte de rapport eau/ciment de 0,30 a fait évoluer le degré d'hydratation du ciment de 0,73 à 0,77 (**Figure 1.14**) soit un accroissement de 5 %. Les auteurs ont conclu que le taux d'incorporation optimal est de 23,7 % pour un degré d'hydratation maximal de 0,83. Ces résultats vont dans le même sens que ceux de **(**Bentz 2009).

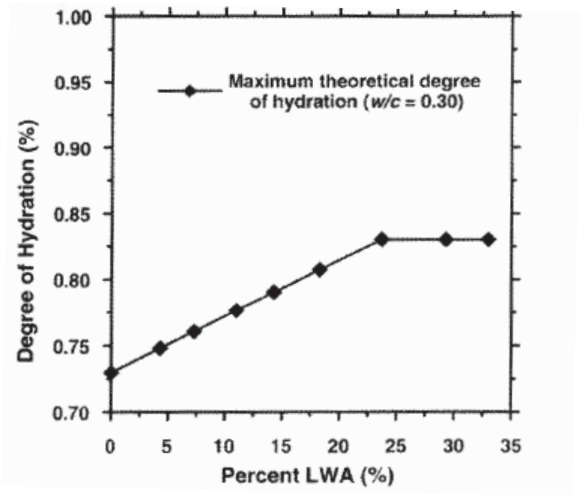


Figure 1.14 Évolution du degré d'hydratation du ciment dans une pâte de rapport eau/ciment de 0,30 en fonction du pourcentage volumique de sable léger de schiste expansé (Henkensiefken et al. 2009)

1.4 Bétons auto-plaçants légers

1.4.1 Méthodes de formulation des bétons auto-plaçants traditionnels

Les méthodes traditionnelles de formulation des bétons auto-plaçants de masse volumique normale (BAPN) ont été adaptées à la formulation des bétons auto-plaçants légers (BAPL) pour tenir compte de l'absorption et de la légèreté des granulats légers. Ces méthodes reposent pour la plupart sur une approche empirique et privilégient l'optimisation des différentes phases (pâte, mortier ou squelette granulaire) du béton. Elles peuvent être regroupées en trois catégories.

1.4.1.1 Méthode d'optimisation du mortier ou méthode « japonaise »

(Okamura and Ozawa 1995) sont les pionniers dans le développement des bétons auto-plaçants de masse volumique normale (BAPN). Leur méthode de formulation considère le béton comme un composé diphasique constitué de gravillons et de mortier. Elle est basée sur l'approche volumique et vise à augmenter l'étalement et la viscosité apparente du béton en utilisant une grande quantité de fines et une adjuvantation adaptée.

La méthode dite « japonaise » préconise un rapport volumique gravillons/sable autour de 1 pour limiter la quantité des gros granulats et suggère que les gravillons occupent 50 % de la densité volumique compactée du béton. De même, les auteurs fixent la quantité de sable dans le mortier à 40 % de la densité compactée du mortier afin d'assurer une ouvrabilité suffisante au mortier.

Les propriétés de la pâte (rapport eau/poudre et quantité de superplastifiant) sont ensuite optimisées et caractérisées à l'aide d'essais sur mortiers. Ces mortiers sont caractérisés conjointement par un essai d'étalement au cône et un essai d'écoulement à l'entonnoir dont découlent deux grandeurs adimensionnelles que sont :

- l'étalement relatif (Γ_m) déterminé à l'aide de l'essai au mini-cône et qui s'exprime par la relation $\Gamma_m = \frac{d^2 - d_0^2}{d_0^2}$;
- la vitesse relative d'écoulement (R_m) déterminée par un essai à l'entonnoir en V pour mortier et qui s'exprime par la relation $R_m = \frac{10}{t}$

d diamètre final de la galette de mortier (mm)
d_0 diamètre de base du cône pour mortier (100 mm)
t temps d'écoulement à l'entonnoir en V du mortier (s)

Selon les auteurs, l'étalement relatif caractérise la fluidité du mortier tandis que la vitesse relative d'écoulement renseigne sur la viscosité apparente. Il faut simultanément $\Gamma_m = 5\ et\ R_m = 1$ pour obtenir un béton auto-plaçant.

Cette méthode qui repose sur une approche expérimentale présente l'intérêt d'être simple dans sa mise en œuvre. Elle permet de formuler des BAPN pour une large gamme d'applications, depuis les bétons à faible résistant, tels que les bétons destinés aux ouvrages massifs jusqu'aux bétons à

haute performance. Toutefois, la méthode dite « japonaise » conduit à des bétons trop riches en fines et par conséquent plus couteux d'un point de vue industriel du fait du sous-dosage en gravillons pour garantir l'absence de blocage en présence d'obstacle. Dans un souci d'économie d'autres auteurs ont donc cherché à optimiser la quantité de pâte.

1.4.1.2 Méthodes d'optimisation de la pâte

a) Méthode suédoise

Plusieurs auteurs ont proposé différentes approches qui reposent sur le confinement des granulats pour réduire le volume de pâte dans le mortier ou dans le béton (Ozawa et al. 1992) et (Tangtermsirikul and Van 1995). Cette démarche consiste à définir le volume critique de granulat V_{crit} en dessous duquel le risque de blocage est nul.

(Tangtermsirikul and Van 1995) ont travaillé sur l'évaluation du risque de blocage de béton au cours de l'essai de la boite en L. Sur la base des résultats, les auteurs définissent le volume critique de granulats V_{crit} dans un béton à partir de la relation suivante :

$$V_{crit} = \frac{\rho_g + (\rho_s - \rho_g) * N_g}{\sum_{i=1}^{m} \frac{P_{g,i} * N_g * \rho_s}{V_g} + \sum_{i=1}^{n} \frac{P_{s,i} * (1 - N_g) * \rho_g}{V_s}} \quad (1\text{-}8)$$

ρ_g masse volumique réelle des gravillons ;
ρ_s masse volumique réelle du sable ;
N_g proportion massique de gravillons dans le squelette granulaire ;
$P_{g,i}$ proportion volumique de la classe de diamètre d_i pour les gravillons avec i allant de 1 à m ;
$P_{s,i}$ proportion volumique de la classe de diamètre d_i pour le sable avec i allant de 1 à n
V_m volume compacté des gravillons ;
V_n volume compacté du sable.

Le risque de blocage R_b est définit à partir de la relation :

$$R_b = (1 - V_P) \sum_{granulats} \frac{y_i}{V_{crit}} \quad (1\text{-}9)$$

y_i proportion volumique du granulat i rapportée au volume total de granulat
V_P volume de pâte dans le béton

En écrivant $R_b = 1$ on peut déduire, pour chaque rapport gravillons/sable, le volume minimal de pâte pour éviter le blocage. Nous rappelons qu'il s'agit d'un volume de pâte par défaut qui ne détermine point les propriétés d'écoulement du béton frais.

La notion de volume minimal de pâte pour contrer le blocage des granulats est associée quelques années plus tard à la notion de volume de pâte nécessaire pour assurer l'écoulement du matériau. (Bui and Montgomery 1999) proposent alors une approche complémentaire qui définit le volume

minimal de pâte susceptible de garantir le caractère auto-plaçant du béton à partir de la relation suivante :

$$V_{pâte,mini} = 1 - \frac{1 - V_{vide}}{\left(\frac{e_{min}}{D_{moyen}} + 1\right)^3} \quad (1\text{-}10)$$

V_{vide} volume de vide du squelette granulaire ;
e_{min} distance minimale entre grains pour permettre l'écoulement du béton ;
D_{moyen} diamètre moyen des granulats.

Il faut toutefois noter que cette valeur est une valeur par défaut puisque le volume de pâte réel doit être supérieur au volume de pâte indiqué pour écarter les granulats et garantir un étalement suffisant du béton.

b) Méthode chinoise

(Su and Miao 2003) ont introduit une nouvelle approche d'optimisation du volume de pâte à partir du facteur de compacité qui exprime le rapport de la masse volumique réelle sur la masse volumique en vrac du squelette granulaire dans le béton. Cette approche dite « méthode chinoise » considère le béton comme un matériau diphasique constitué d'un squelette granulaire (gravillon et sable) dont la porosité est remplie par la pâte. Elle repose sur l'adaptation du niveau de serrage du squelette granulaire dans le béton à partir du facteur de compacité qui s'exprime par la relation :

$$PF = \frac{\rho^d}{\rho^l} \quad (1\text{-}11)$$

PF facteur de compacité ;
ρ^d masse volumique réelle du squelette granulaire dans le béton auto-plaçant ;
ρ^l masse volumique en vrac du squelette granulaire dans le béton auto-plaçant.

Selon les auteurs, le facteur de compacité est un paramètre qui permet de contrôler la quantité de pâte et donc l'ouvrabilité. Ce paramètre est toujours supérieur à 1. Une valeur élevée du facteur de compacité conduit à une quantité de granulats (gravillons et sable) plus importante et donc à un volume de pâte plus réduit. A contrario, une valeur faible du facteur de compacité peut conduire à une quantité de pâte plus élevée et engendrer une plus grande ouvrabilité. Comme l'indique la **Figure 1.15**, l'étalement du béton auto-plaçant augmente de 220 à 700 mm lorsque le facteur de compacité diminue de 1,22 à 1,14.

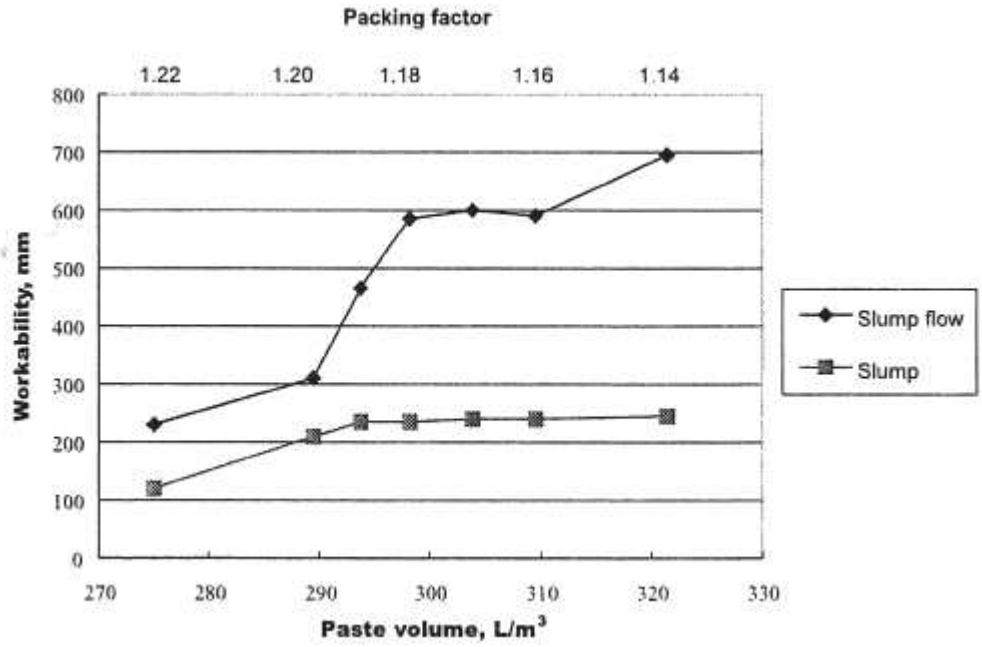


Figure 1.15 Effet du facteur de compacité (PF) sur l'ouvrabilité du béton (Su and Miao 2003)

Les auteurs indiquent que le choix de ce paramètre est primordial pour atteindre la fluidité requise du béton car il détermine le volume de pâte et permet d'en déduire le dosage des granulats d'après les relations ci-après :

$$M_s = PF * \rho_{vrac,s} * \frac{V_s}{V} \tag{1-12}$$

$$M_g = PF * \rho_{vrac,g} * \left(1 - \frac{V_s}{V}\right) \tag{1-13}$$

M_S masse de sable par unité de volume de béton ;
M_g masse de gravillons par unité de volume de béton ;
$\rho_{vrac,s}$ masse volumique en vrac du sable ;
$\rho_{vrac,g}$ masse volumique en vrac des gravillons ;
$\frac{V_S}{V}$ proportion volumique de sabler apportée au volume total de granulat.

Cependant, ils ne précisent pas comment ce paramètre est obtenu. Par ailleurs, l'application de cette méthode conduit à un surdosage en granulats puisque qu'elle vise un niveau de serrage élevé et donc un dosage en superplastifiant proche de la saturation pour assurer la fluidité du béton. La méthode mène en général à un dosage en ciment faible (autour de 200 kg/m^3) et à des résistances moyennes à la compression à 28 jours limitées (entre 30 et 35 MPa). Les auteurs reconnaissent d'ailleurs, la difficulté de concilier ouvrabilité et performance mécanique du béton à partir de la méthode.

(Brouwers and Radix 2005) indiquent qu'à affaissement équivalent, le dosage en sable est plus élevé dans la méthode dite « chinoise » que dans celle dite « japonaise ».

1.4.1.3 Méthode d'optimisation du squelette granulaire

Dans un souci d'optimisation du squelette granulaire constitué d'un nombre quelconque de granulats, (Sedran et De Larrard 1994) ont développé le modèle d'empilement compressible (MEC). Ce modèle exprime la dépendance entre de la compacité atteinte et l'énergie de serrage fournie au système. Par analogie au modèle de viscosité de (Mooney 1951), la viscosité d'un mélange sec est remplacée par l'indice de serrage noté K qui est considéré comme une description du degré de serrage du système, inhérente au mode de mise en place. Le modèle met en avant la notion de compacité réelle en complémentarité avec celle de la compacité virtuelle. La compacité réelle est associée à un procédé physique de construction de l'empilement alors que la compacité virtuelle définit la compacité maximale théorique inatteignable dans la réalité.

La compacité réelle d'un mélange de grains polydispersés dépend de trois paramètres principaux :

- la taille des grains considérés (décrite par la courbe granulométrique) ;
- la forme des grains (morphologie, état de surface) ;
- la façon dont l'empilement est réalisé.

L'indice de serrage pour une compacité réelle donnée peut être calculé à partir de la relation suivante :

$$K = \sum_{i=1}^{n} K_i = \sum_{i=1}^{n} \frac{{}^{y_i}/_{\beta_i}}{\frac{1}{\emptyset} - \frac{1}{\gamma_i}} \tag{1-14}$$

y_i proportion volumique des classes de diamètre d_i
β_i compacité résiduelle des classes de diamètre d_i
ϕ compacité réelle du mélange
γ_i compacité virtuelle du mélange avec la classe i est dominante

La **Figure 1.16** montre l'évolution de la compacité réelle d'un mélange granulaire binaire pour différentes valeurs d'indice de serrage. (Ferraris and De Larrard 1998) recommandent un indice de serrage de 7,0 pour les bétons auto-plaçants qui constituent des mélanges superplastifiés.

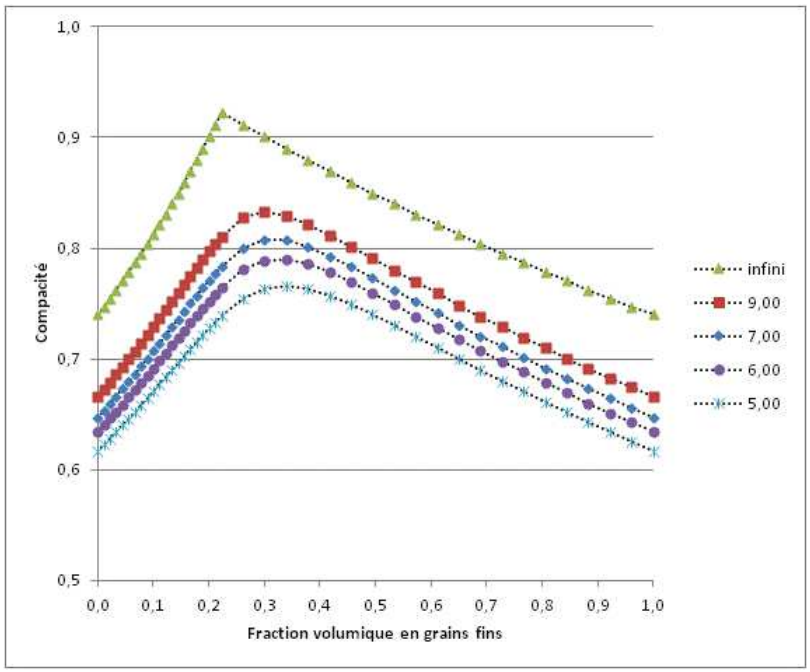


Figure 1.16 Rapport entre compacité réelle et indice de serrage pour un mélange binaire

Le modèle implémenté dans le logiciel RENE LCPC (www.lcpc.fr/fr/produits/lcpc-produits-betonlabpro/) et qui constitue la base scientifique du logiciel d'aide à la formulation BétonLabPro a été appliqué pour optimiser le squelette granulaire d'une composition de béton auto-plaçant par (Sedran 1999) dans sa thèse.

Ces différentes méthodes ont été développées pour la formulation des BAPN. Bien qu'avérées, elles ne prennent pas avec suffisamment de précision la spécificité des bétons auto-plaçants légers. Les granulats légers sont caractérisés par une absorption différée 10 à 100 fois plus importante que celle des granulats de masse volumique normale. De même, la différence de densité entre les constituants amplifie la ségrégabilité de ces mélanges.

1.4.2 Méthodes de composition des BAPL

Les auteurs ont proposé des adaptations des méthodes de formulation courantes pour la composition des bétons auto-plaçants (BAP) légers. Les contributions portent notamment sur la prise en compte de l'absorption et la légèreté des granulats légers (Helland et al. 2000). La forte absorption d'eau des granulats légers peut dans certains cas modifier les paramètres de compostions tels que le rapport E_{eff}/L et la masse volumique réelle.

Au sens la norme NF EN 206-1/CN, la teneur en eau efficace est la différence entre la quantité d'eau totale contenue dans le béton frais et la quantité d'eau absorbable par les granulats. Dans le cas des granulats traditionnels l'eau absorbable est marginale (entre 0,1 et 2 % en proportion massique). En revanche, l'eau absorbable par les granulats légers est plus importante et peut atteindre 15 % et plus en proportion massique selon (Neville 1995) et (Zhang et al. 2004). Dans la pratique, l'absorption différée du granulat léger peut se traduire par une chute brutale de l'ouvrabilité du béton en présence de granulats légers secs ou pré-humidifiés (Papanicolaou and Kaffetzakis 2011).

La légèreté qui est l'un des principaux avantages des granulats légers est considérée comme une des principales difficultés dans la formulation des BAPL. En général, les bétons incorporant des granulats légers ont une forte propension à la ségrégation en raison du contraste de densité pâte/granulats (Kim et al. 2010). Cette singularité augmente le risque de ségrégation durant le malaxage, le transport et la mise en place du béton léger frais (Chia et al. 2005). Elle est d'autant présente qu'il s'agit de BAPL. Même si, l'auto compactibilité des BAP tend à diminuer le risque de séparation entre la matrice et les granulats pouvant subvenir lors de la vibration, elle n'assure de facto, ni l'homogénéité ni la stabilité du mélange à l'état frais en particulier des BAPL selon (Uygunoglu 2008) et (Wu et al. 2009). La ségrégation dynamique ou statique se caractérise par une séparation pâte/granulats marquée par une orientation préférentielle des granulats légers vers la face de coulage (Neville 1995) et (Wall 2005). Une autre conséquence de la ségrégation des BAPL va être une variation spatiale des propriétés mécaniques et de durabilité à l'état durci.

(Yanai et al. 2000) a adapté la proportion du granulat léger en adoptant un rapport volumique G/S de 1,2 et le rapport E_{eff}/L de 0,39 obtenir pour des bétons auto-plaçants légers de sable normal (BAPLSN) homogènes et stables. Le choix de granulat léger résistant pour limiter la différence de rigidité entre la matrice cimentaire et les granulats légers a permis d'améliorer les performances mécaniques du béton.

(Michtcherine et al. 2001) ont adapté les propriétés de la pâte et du mortier de sable normal en incorporant un agent de viscosité pour formuler des BAPL de granulats d'argile expansée et d'ardoise expansée présentant des propriétés à l'état frais similaire au BAP traditionnel en termes d'étalement et de viscosité apparente. (Muller and Haust 2004) abordent dans le même sens et montrent que l'optimisation du dosage en liant et des paramètres rhéologiques du mortier de sable (seuil de cisaillement et viscosité) permet de formuler des BAPL de masse volumique réelle à l'état frais comprise entre 1 500 et 2 000 kg/m^3. Cette approche consiste à définir un mortier dont les propriétés rhéologiques sont suffisamment faibles pour faciliter l'écoulement du matériau mais suffisamment élevées pour limiter le risque de blocage des granulats légers.

En somme les méthodes de formulation traditionnelles de bétons auto-plaçants de masse volumique normale (BAPN) sont adaptées pour la formulation des BAPL. Pour tenir compte de la forte absorption et de la légèreté des granulats légers, les auteurs ont recours :

- au pré-mouillage pour atténuer l'absorption dans la pâte ;
- à l'utilisation d'agent de viscosité pour optimisation la viscosité de la pâte afin de limiter les risques de ségrégation ;
- à l'optimisation du volume de pâte pour limiter le risque de blocage des granulats légers.

1.4.3 Propriétés à l'état frais des BAPL

La caractérisation des BAPL au même titre que les BAPN passe par la détermination des propriétés génériques que sont :

- la capacité de remplissage qui donne l'aptitude du mélange à se mettre en place sous l'effet de sa gravité et à remplir le volume offert ;

- la capacité de passage qui détermine l'aptitude du matériau à résister au blocage dans un milieu confiné ;
- la résistance à la ségrégation qui évalue la capacité du mélange à résister à une séparation entre les phases sous l'effet d'interactions dissipatives.

Les propriétés à l'état frais sont déterminées à partir d'essais d'écoulement et d'essais de résistance à la ségrégation. Les essais d'écoulement tels que l'étalement au cône, le temps de passage à l'entonnoir en V et le taux de remplissage à la boite en L permettent d'évaluer la capacité de remplissage et de passage. Les essais de stabilité tels que l'essai au tamis et l'essai à la colonne permettent de caractériser la résistance à la ségrégation du béton.

1.4.3.1 Etalement

L'essai d'étalement permet de mesurer la mobilité du béton auto-plaçant en l'absence d'obstacles. L'étalement peut être déterminé selon la norme NF EN 12350-8. Différents bétons auto-plaçants légers contenant des granulats légers d'origine minérale (rhyolite expansée, argile expansée, ardoise expansée, cendre volante frittée, perlite expansée) et des granulats de polystyrène sont recensés dans la littérature. Les étalements de 26 compositions de bétons auto-plaçants légers tirées de 13 articles sont présentés sur la **Figure 1.17**.

Nous constatons que pour la plupart des compositions, l'étalement se trouve dans la plage de référence 550 et 850 mm malgré la présence de granulats légers poreux. Ce constat s'explique par l'anticipation du raidissement précoce par un pré-mouillage des granulats poreux et la prise en compte du risque de ségrégation par l'utilisation d'un superplastifiant et d'un agent de viscosité pour adapter la qualité de la pâte. L'ajout d'un entraineur d'air permet selon les auteurs, d'améliorer l'écoulement de certains bétons avec le risque à forte dose de réduire les performances mécaniques. Dans les différentes formules présentées, les granulats légers poreux sont pré-humidifiés de diverses façons afin d'avoir une teneur eau initiale adaptée. Les différents états de saturation initiale des granulats légers sont :

- état saturé sec en surface après immersion dans l'eau pendant 24 heures ;
- état de surface sec à l'issue de l'égouttage après immersion dans l'eau pendant 24 heures ;
- état de surface sec à l'issue de l'égouttage après immersion dans l'eau pendant 30 minutes ;
- état de surface humide obtenu à l'issue du malaxage des granulats légers avec une partie de l'eau de malaxage pendant 1 à 30 minutes ;
- état de surface sec obtenu par un arrosage régulier pendant plusieurs jours.

(Hubertova and Hela 2007) ont observé l'influence de la pré-humidification sur l'écoulement et le maintien de rhéologie des BAPL. L'étude comparative a porté sur les propriétés à l'état frais de deux types de BAP de granulats légers d'argile expansée dont l'un incorpore les gravillons secs et l'autre des gravillons pré-humidifiés. Les résultats montrent que la pré-humidification des granulats d'argile expansée a favorisé l'écoulement et le maintien de rhéologie du BAPL. Les résultats de (Cauberg et Kestemont 2009) sur la formulation de BAPL d'argile expansée ont montré que le pouvoir absorbant des granulats légers est significativement réduit lorsque l'essai d'absorption d'eau est réalisé avec des granulats d'argile expansée de teneur en eau initiale comprise 15 et 20 % en masse.

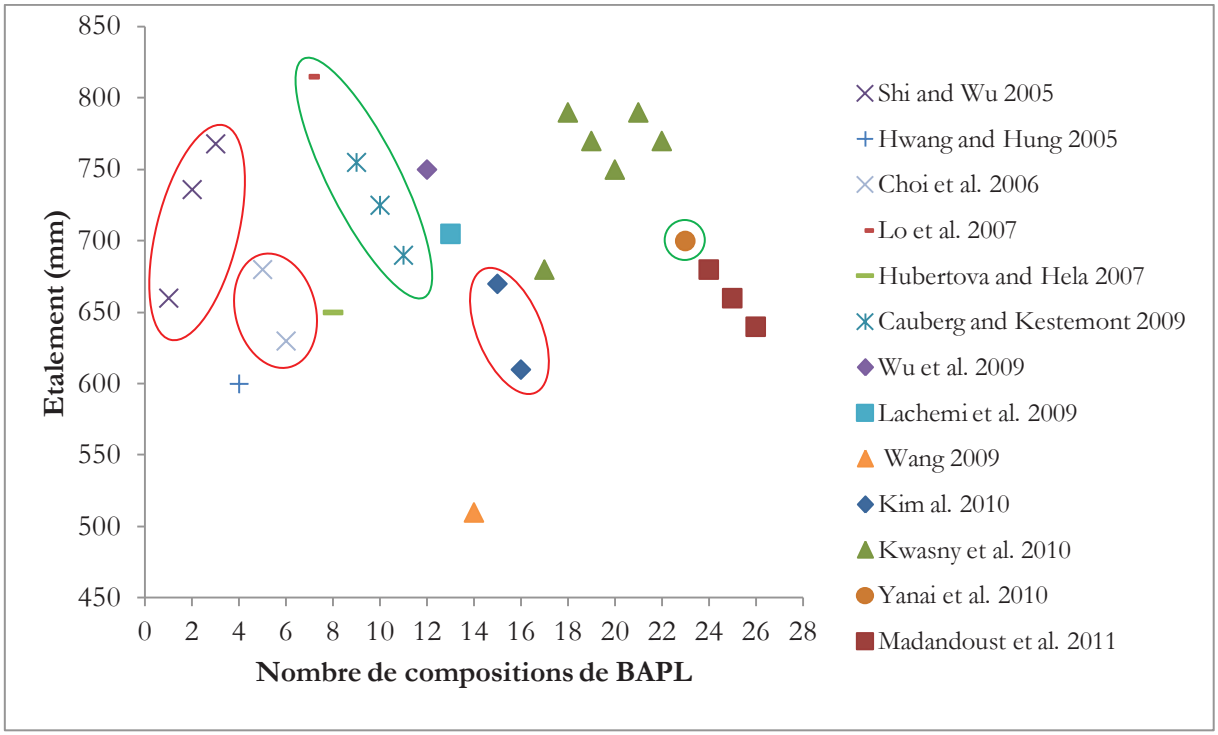


Figure 1.17 Etalements de BAPL identifiés dans la littérature

L'adjuvantation des bétons auto-plaçants légers joue aussi un rôle important. Le superplastifiant est combiné avec un agent de viscosité et même parfois avec un entraîneur d'air pour améliorer la mobilité du béton léger. Sur la **Figure 1.17**, les compositions encerclées de vert contiennent un superplastifiant et un agent de viscosité tandis que les compositions encerclées en rouge contiennent un superplastifiant et un entraîneur d'air.

Pour valider l'aptitude à l'écoulement du béton auto-plaçant, l'essai d'étalement est complété par l'essai de la boite en L qui caractérise la mobilité en présence d'obstacle. Le taux de remplissage à la boite en L des bétons auto-plaçants légers tirées de la littérature est supérieur à 0,80 comme pour les bétons auto-plaçant traditionnels.

1.4.3.2 Viscosité apparente

La capacité de remplissage du béton auto-plaçant est associée à sa viscosité apparente. L'essai d'écoulement à l'entonnoir en V régit par la norme la NF EN 1350-9 est l'un des essais permettant d'évaluer la viscosité apparente du béton frais. Il donne une indication sur la viscosité apparente au même titre que le T500. La viscosité apparente est d'autant plus grande que le temps d'écoulement est grand.

L'examen de 25 formules de bétons auto-plaçants légers tirées de 10 articles et présentées à la **Figure 1.18** indique que le temps d'écoulement à l'entonnoir en V se situe entre 3 à 24 secondes pour ce type de matériau.

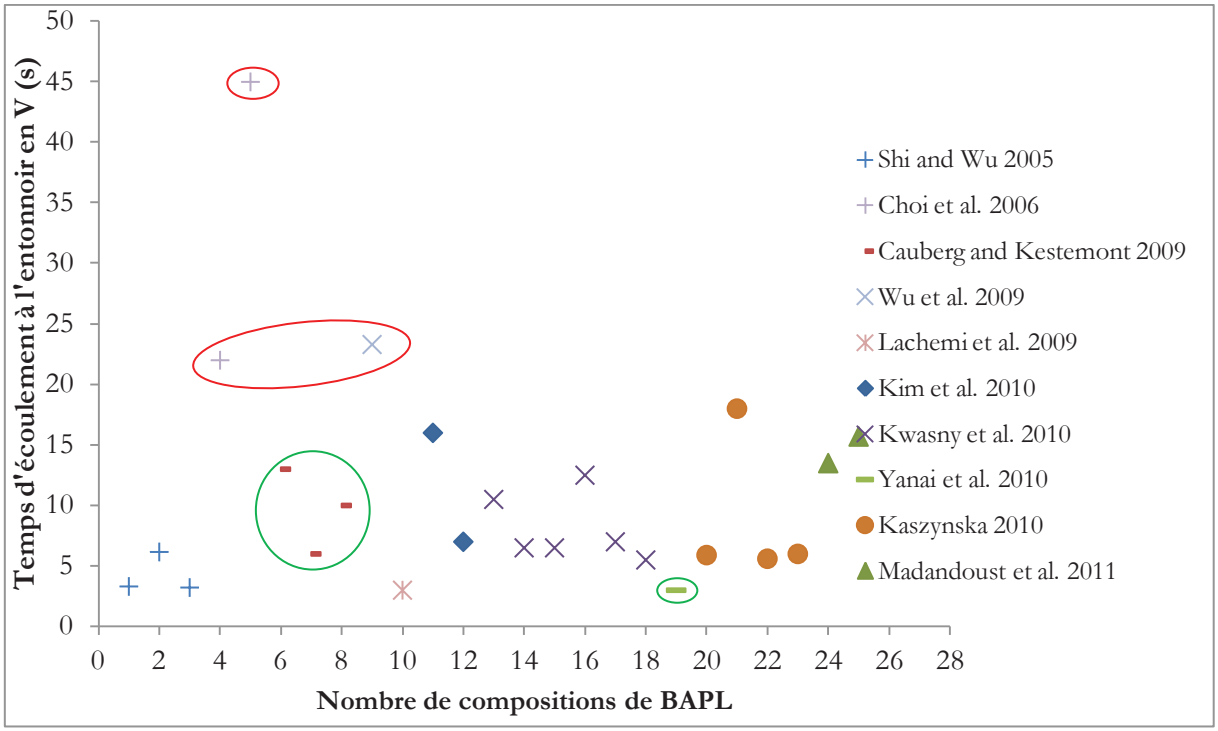
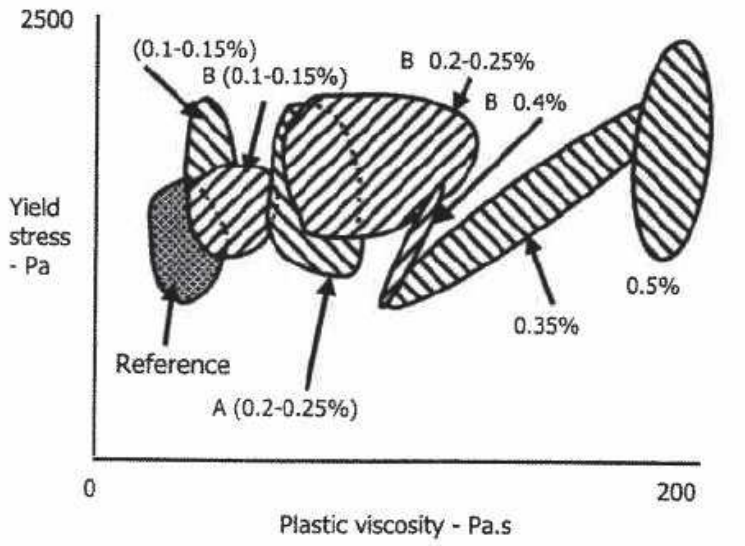


Figure 1.18 Temps d'écoulement à l'entonnoir en V de BAPL identifiés dans la littérature

Nous constatons que les compositions contenant un agent de viscosité et encerclées en vert ne sont pas les plus visqueux. Les compositions encerclées en rouge qui sont les plus visqueux, doivent leur grande viscosité apparente au dosage élevé en superplastifiant avoisinant les 2 % d'extrait sec rapporté à la masse de ciment. Les travaux de (Banfill 2011) montrent que l'effet des superplastifiants (à base de poly-carboxylates) s'accompagne selon le dosage, d'une augmentation du seuil de cisaillement et la viscosité du béton comme l'indique la **Figure 1.19**.



Type A : Fonctions stérique et entropique (longue chaîne) Type B : Fonction stérique (courte chaîne)

Figure 1.19 : Représentation schématique de l'effet du type de superplastifiant sur le seuil de cisaillement et la viscosité plastique (Banfill 2011)

1.4.3.3 Résistance à la ségrégation des BAPL

La ségrégation est un paramètre très important pour la validation d'un béton auto-plaçant (Lo et al. 2007). Pour les BAPL, il faut un seuil de cisaillement suffisamment faible pour assurer l'écoulement du matériau et une viscosité suffisamment grande pour maintenir les granulats légers dans la pâte et préserver de la ségrégation.

L'état de l'art sur les propriétés des BAPL présenté par (Papanicolaou and Kaffetzakis 2011) indique deux méthodes pour caractériser la ségrégation de ce matériau. Il s'agit de l'essai à la colonne et de l'essai au tamis.

a) Essai à la colonne

(Assaad et al. 2004) ont proposé un essai à la colonne proche du celui proposé auparavant par (Lowke et al. 2003). La colonne est constituée d'un tube PVC de 20 cm de diamètre et de 66 cm de long prédécoupé en 4 sections identiques. L'essai consiste à déverser le béton dans la colonne et à laisser repos durant 15 minutes. Chaque section est pesée et lavée sur un tamis pour retenir les gravillons pesés à l'état saturé sec en surface. Le coefficient de variation de la distribution le long de la colonne noté I_{seg}est déterminé. La résistance à la ségrégation est appropriée si I_{seg} est inférieur à 4 %. L'essai à la colonne réalisé sur un béton frais est complété par un essai de fendage à l'état durci.

(Mouret et al. 2011) indiquent que l'essai à la colonne, sous réserve d'une exploitation correcte des résultats s'avère être un outil d'optimisation et de contrôle fiable. (Wu et al. 2009) ont montré que la combinaison de l'essai à la colonne et de l'essai du fendage d'éprouvette cylindre (**Figure 1.20**) donne un bon indicateur pour caractériser l'aptitude à la ségrégation des BAPL.



(a) Colonne de 20 cm de diamètre et 66 cm de long *(b) Fendage d'éprouvettes*

Figure 1.20 Essai de ségrégation (tiré de Wu et al. 2009)

b) Essai au tamis

L'essai de stabilité au tamis est régit par la norme NF EN 206-9 et permet d'évaluer la résistance à la ségrégation du béton auto-plaçant. Il consiste après prélèvement à déverser une masse donnée de béton frais sur un tamis de maille 5 mm et à consigner la masse de matière qui s'est écoulée à travers le tamis. Le pourcentage de laitance SR est donné par la relation :

$$SR = \frac{m_{PS} - m_p}{m_C} * 100 \quad (1\text{-}15)$$

SR laitance en pourcentage
m_{PS} masse du fond de tamis plus masse de la laitance écoulée
m_P masse du fond du tamis
m_C masse initiale du béton placé sur le tamis

La stabilité du béton est satisfaisante si le pourcentage de laitance SR est inférieur ou égale à 95 %. Les données tirées de (Papanicolaou and Kaffetzakis 2011) indiquent que le volume de pâte dans les formules de BAPL se situe entre 350 et 420 l/m^3 et donc est au-delà des 350 l/m^3 admis pour les BAPN dans l'industrie du béton. La stabilité des BAPL conduit généralement à une quantité de fines plus importante pour adapter la viscosité de la pâte et améliorer la cohésion entre la pâte et les granulats légers. Ainsi, la mise en œuvre de l'essai de stabilité au tamis conduit à un pourcentage de laitance plus élevé qui ne satisfait pas au critère de ségrégation exigé. C'est pourquoi l'essai au tamis n'est pas recommandé pour qualifier la stabilité des bétons auto-plaçants légers.

Selon (Wu et al. 2009), l'observation visuelle de la galette à l'état frais, l'essai à la colonne ou l'essai d'uniformité de la distribution granulaire par fendage à l'état durci sont les méthodes utilisées pour caractériser la stabilité des BAPL.

1.4.4 Propriétés mécaniques des BAPL

Les propriétés mécaniques des bétons légers sont intimement liées aux performances mécaniques et élastiques des granulats légers utilisés (Zhang and Gjørv 1991) et (Arnould et Virlogeux 1986). D'après (Papanicolaou and Kaffetzakis 2011), les résistances à la compression des BAPL présentées dans la littérature se situent entre 15 et 60 MPa. Par ailleurs, les auteurs indiquent que la résistance à la compression rapportée à la masse volumique réelle sèche des BAPL est positivement corrélée avec le dosage en ciment.

(Lo et al. 2007) ont fait une étude comparative de la rhéologie et des propriétés mécaniques entre un BAPL de schiste expansé et un BAPN. Les résultats montrent les propriétés à l'état frais (l'étalement au cône et le T400) des BAPL sont proches de celles des BAPN. En revanche, les auteurs notent que la résistance à la compression et le module d'élasticité des BAPL sont respectivement de 25 % et 20 % inférieurs aux valeurs du BAPN à dosage de ciment équivalent. Cette diminution des propriétés mécaniques des BAPL est soulignée par d'autres auteurs (Choi et al. 2006), (Kaszynska 2010) et (Kim et al. 2010).

Les valeurs de résistance moyenne à la compression de 20 compositions issues de 12 articles recensés dans la littérature sont présentées à la **Figure 1.21**. Nous constatons que la résistance moyenne des bétons auto-plaçants légers est comprise entre 30 et 60 MPa à l'exception des trois compositions de granulats de polystyrène expansé encerclées sur la **Figure 1.21**. Cette plage de résistances à la compression correspond à la gamme de résistances utilisée dans l'industrie du béton pour les produits de structure.

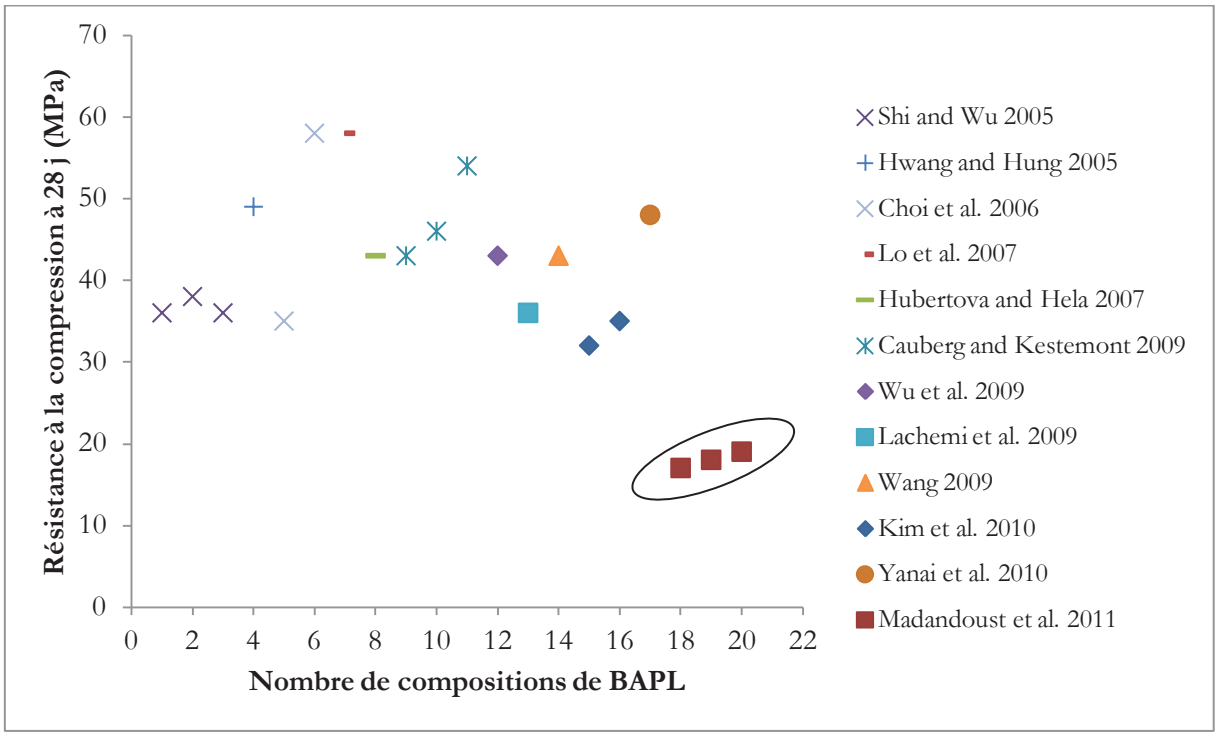


Figure 1.21 Résistance moyenne à la compression de BAPL identifiés dans la littérature

Par ailleurs, (Papanicolaou and Kaffetzakis 2011) mentionnent que la masse volumique réelle sèche des bétons auto-plaçants légers se situent entre 1 330 et 1 990 kg/m^3 soit une réduction de poids propre entre comprise entre 10 et 40 % comparée à un béton traditionnel de masse volumique réelle sèche de 2 200 kg/m^3.

L'introduction de granulats légers dans le béton allège non seulement le matériau mais aussi donne des performances mécaniques proches de celles du béton traditionnel. Cette association de qualité en dépit de la faible rigidité des granulats légers comparée à celle de la matrice cimentaire est en partie liée à la porosité et à l'absorption des granulats légers. Les granulats légers développent des interactions physiques et mécaniques (confère **Paragraphe 1.3.1**) qui favorisent les propriétés à l'interface pâte/granulat et améliorent les propriétés à l'état durci telles que la résistance et la durabilité.

1.4.5 Propriétés de Durabilité des BAPL

Il existe peu de travaux sur la durabilité des bétons auto-plaçants légers (BAPL). Cependant, l'effet positif de la cure interne apportée par les granulats légers pré-saturés est abondamment cité dans la littérature. La cure interne consiste à substituer partiellement les granulats traditionnels par des granulats légers pré-saturés dans les bétons à faible rapport eau/ciment comme une source d'eau additionnelle afin d'améliorer le degré d'hydratation du ciment dans la matrice durcie. Elle s'effectue pour la plupart sur des bétons de masse volumique normale à faible rapport eau/ciment dans lesquels une partie seulement des gravillons traditionnels est remplacée par des gravillons légers gorgés d'eau. Selon (Maruyama et al. 2009), **(**Bentz 2009) et (Henkensiefken et al. 2009), ce phénomène a des effets positifs sur la fissuration au jeune âge et la durabilité des bétons contenant des granulats légers pré-saturés.

(Philleo 1991) a montré que l'incorporation des granulats légers pré-saturés dans les bétons à très hautes performances (BTHP) permet de réduire la fissuration précoce et par conséquent de limiter la diffusion et la migration des agents agressifs tels que les chlorures et les sulfates. (Henkensiefken et al. 1991) ont indiqué que la substitution partiellement des gravillons traditionnels par des gravillons légers pré-saturés en eau contribue à améliorer le degré d'hydratation de la matrice et à densifier l'interface autour des granulats légers. Selon les auteurs, cette densification de l'interface pâte/granulat conduit d'une part à une réduction de l'absorption d'eau et de la perméabilité à l'eau et d'autre part, à un accroissement de la résistivité électrique du béton. Les résultats sur l'augmentation de la résistivité électrique des bétons contenant des granulats légers sont confirmés par (Hwang and Hung 2005) dont les travaux ont montré que la réduction de la quantité d'eau de gâchage (quantité d'eau de gâchage comprise entre 140 et 190 l/m^3) permet de proposer des bétons auto-plaçants légers (BAPL) avec une résistivité électrique supérieure à 20 kΩ.cm (résistivité électrique sur BAPL âgé de 28 jours comprise entre 30 et 120 kΩ.cm); ce qui limiterait la corrosion des armatures d'après (Buenfeld et al. 1986).

Plus récemment, (Liu and Zhang 2010) et (Paul and Lopez 2011) ont montré que l'incorporation de granulats légers totalement saturés à l'eau réduire de façon significative le retrait total, l'auto-dessiccation et le retrait endogène au cours du durcissement du béton.

(Bentz 2009) et (Liu and Zhang 2010) conclurent que les effets bénéfiques de la cure interne tels que l'amélioration du degré d'hydratation du ciment et la densification de l'interface pâte/granulat réduisent la profondeur de pénétration des chlorures dans le béton contenant des granulats légers pré-saturés. A titre d'exemple, Les travaux de (Liu and Zhang 2010) montrent que la profondeur de pénétration des chlorures du béton contenant 35 % en volume de granulats légers pré-saturés est de 17,6 ± 0,6 mm tandis que celle du béton traditionnel est de 18,4 ± 1,1 mm. De même, (Bentz 2009) montre que le remplacement de 31 % en volume de sable normal par du sable léger de schiste expansé pré-saturés peut réduire de 25 % la diffusivité du mortier.

Par ailleurs, (Elsharief et al. 2005) montrent que la substitution du sable normal par du sable léger de schiste expansé réduit considérablement l'expansion du mortier comme l'illustre la **Figure 1.22**. Ces résultats montrent qu'après 300 jours d'immersion dans une solution de sulfate de sodium (Na_2SO_4), les corps d'épreuve de mortier de sable léger ne présentent pas d'expansion significative tandis que l'expansion de ceux de mortier de sable normal est proche de 1 %. Les

auteurs expliquent ces résultats par la densification de l'auréole de transition autour des grains de sable léger de schiste expansé. Ce constat est confirmé par les travaux de (Liu and Zhang 2010) sur des bétons légers contenant des granulats d'argile expansée. Cependant, il n'est pas possible de généraliser cette tendance à toutes les compositions de bétons légers car la résistance aux sulfates est intimement liée de la composition chimique du liant.

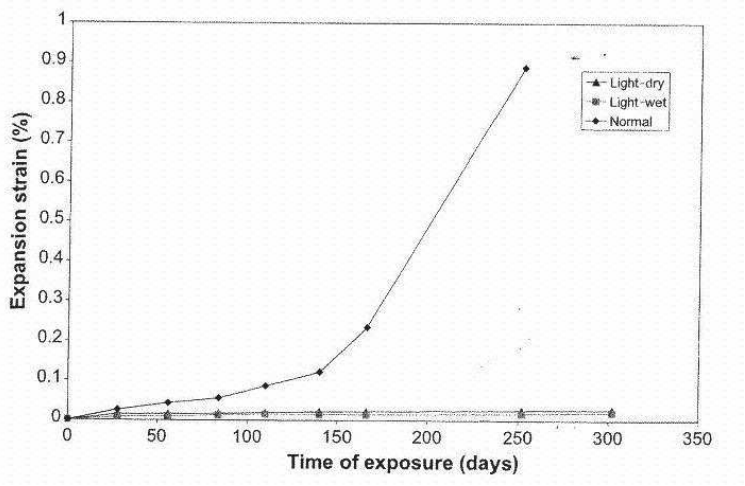


Figure 1.22 Expansion de prismes de mortiers avec un rapport eau/ciment égal à 0,55 après immersion dans une solution à 5 % de Na_2SO_4 pendant 300 jours (Elsharief et al. 2005)

Dans le cas des bétons « tout léger » dans lesquels les granulats traditionnels (sable et gravillons) sont totalement remplacés par des granulats légers, le comportement vis-à-vis de la durabilité est défavorable comparé au béton traditionnel. Les travaux de (Haque and Al-Khaial 1999) montrent que la profondeur de pénétration d'eau des bétons « tout léger » est deux fois plus importante que celle des bétons traditionnels testés dans les mêmes conditions opératoires. Ces résultats vont dans le même sens que les conclusions de (Baronio et al. 1996). De même, (Haque and Al-Khaial 1999) montrent qu'à résistance équivalente, le béton « tout léger » se carbonate plus que le béton traditionnel indépendamment des conditions de cure du fait de sa perméabilité plus importante. Ces résultats se traduisent par une pente plus accentuée de la droite de corrélation entre la profondeur de carbonatation et la perméabilité à l'eau du béton « tout léger » comme l'illustre la **Figure 1.23**. Toutefois, les travaux de (Osborne and Al-Khaiat 1995) ont montré auparavant qu'après cinq ans d'exposition à une ambiance atmosphérique normale, la profondeur de carbonatation mesurée sur des corps d'épreuve de bétons « tout léger » et de bétons traditionnels est inférieure à 1 mm.

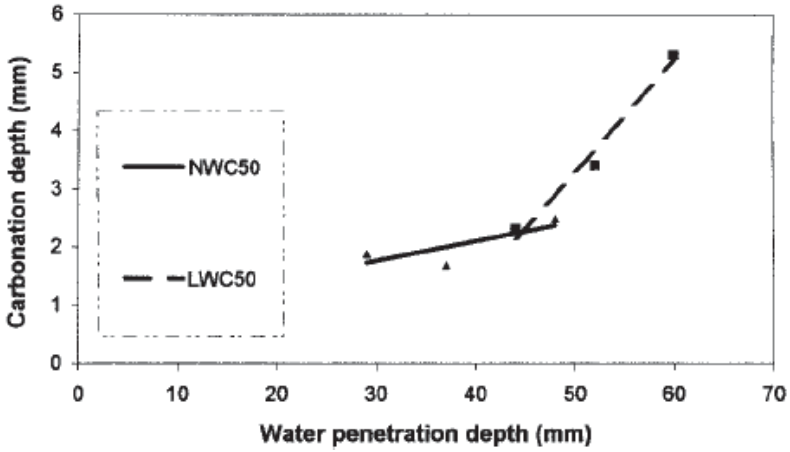


Figure 1.23 Corrélation entre profondeur de carbonatation et perméabilité à l'eau de deux bétons pour différentes conditions de cure et exposés pendant 2 ans à une atmosphère marine (Haque and Al-Khaial 1999)

1.5 Conclusion

La synthèse bibliographique s'est intéressée aux granulats légers, aux phénomènes de transfert hydrique pâte/granulat ainsi qu'à l'impact de ces phénomènes de transfert d'eau en termes de conséquences sur la formulation et les propriétés des bétons légers. Cette synthèse a permis d'identifier l'absorption des granulats légers et la ségrégation des bétons légers comme étant les problématiques majeures dans le processus de formulation.

La synthèse montre l'importance de l'absorption et de la désorption des granulats légers sur l'ouvrabilité et les performances mécaniques et de durabilité des bétons légers. L'absorption du granulat léger dans la pâte réduit l'ouvrabilité du béton frais alors qu'elle améliore les propriétés à l'interface pâte/granulat. La cure interne illustre parfaitement l'intérêt des granulats légers saturés d'eau comme une source d'eau additionnelle pour améliorer l'hydratation du ciment et réduire le retrait des bétons à faible rapport eau/ciment.

Par ailleurs, la synthèse montre que les méthodes de composition dédiées aux bétons auto-plaçants légers conservent encore une grande part d'empirisme sans doute en l'absence d'outil permettant de quantifier par exemple les transferts d'eau de la pâte vers le granulat léger et vice versa.

L'objectif de la thèse est de quantifier l'absorption dans la pâte de ciment et de la comparer à l'absorption dans l'eau afin d'estimer avec plus de précision le rapport eau efficace /liant dans les bétons légers.

La thèse vise également à proposer une approche de formulation plus rationnelle qui repose sur des grandeurs quantifiables telles que le volume de pâte, la concentration du liant, l'indice de serrage, l'indice de ségrégation, l'absorption dans la pâte de ciment. Cette méthode de formulation sera ensuite validée et mise en œuvre pour proposer des gammes de bétons auto-plaçants légers dont les critères en termes de masse volumique réelle sèche et de résistance à la compression sont conformes au cahier des charges.

Chapitre 2

Présentation du programme expérimental, des matériaux et des méthodes

Sommaire

2.1 Introduction **69**

2.2 Constituants des bétons auto-plaçants légers **69**
2.2.1 Ciment et filler calcaire 69
2.2.2 Les granulats 71
2.2.2.1 Sable naturel 71
2.2.2.2 Sables légers 71
2.2.2.3 Gravillons légers 71
2.2.3 Synthèse des propriétés des granulats naturels et légers utilisés 73
2.2.4 Adjuvants 74

2.3. Caractérisation des mélanges **74**
2.3.1 Essais sur pâte 74
2.3.1.1 Demande en eau des fines 74
2.3.1.2 Essai d'écoulement au cône de Marsh : dosage de saturation du couple liant/superplastifiant 76
2.3.2 Essais sur les mélanges pâte/gravillons 77
2.3.2.1 Essai d'absorption dans la pâte de ciment 77
2.3.2.2 Essai d'étalement sur des mélanges pâte/gravillons 78
2.3.3 Essais sur les mélanges granulaires 78
2.3.3.1 Essai de compacité des fractions granulaires à la table à secousses 78
2.3.3.2 Pré-mouillage des granulats légers 80

2.4 Campagne de caractérisation des bétons **82**
2..4.1 Malaxage et conservation des éprouvettes en béton 83
2.4.2 Propriétés physiques à l'état frais 84
2.4.2.1 Masse volumique réelle et teneur en air occlus 84
2.4.2.2 Indice de ségrégation statique 87
2.4.3 Les propriétés d'écoulement 89
2.4.3.1 Essai d'étalement au cône d'Abrams 89
2.4.3.2 Essai d'écoulement à l'entonnoir en V 90
2.4.3.3 L'essai à la boite en L 91
2.4.4 Propriétés mécaniques 93
2.4.4.1 Résistance à la compression 93
2.4.4.2 Traction par fendage 93
2.4.4.3 Module d'élasticité 94
2.4.5 Propriétés de durabilité 95
2.4.5.1 Absorption et porosité accessible à l'eau 95
2.4.5.2 Carbonatation 96

2.5 Conclusion **97**

2.1 Introduction

La méthode développée pour la formulation de bétons auto-plaçants légers (BAPL) est présentée en détail au **Chapitre 4**. Elle repose l'adaptation du niveau de serrage du béton frais grâce au modèle d'empilement compressible (MEC). Le caractère auto-plaçant est piloté par l'indice de serrage via le volume de pâte tandis que la performance mécanique repose sur la concentration du liant. L'estimation de la résistance des BAPL est rendue possible par l'application du modèle analytique série/parallèle. La demande en eau des granulats légers est estimée à partir d'un protocole d'absorption dans la pâte de ciment développé dans la thèse.

La mise en œuvre de la méthode de formulation nécessite des données liées aux caractéristiques des constituants telles que la granulométrie, la masse volumique réelle, la compacité etc. La validation de la méthode a également nécessité des outils de caractérisation des compositions.

L'objectif de ce chapitre est dans un premier temps de présenter les principales caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des différents constituants entrant dans la composition des BAPL qui vont être mis au point dans cette thèse. Puis seront passées en revue, différentes caractéristiques des mélanges (pâte fraîche et empilement sec) qui sont pour l'essentiel des données d'entrée et de calage du modèle d'empilement compressible et la teneur en superplastifiant. La dernière partie du chapitre concerne la présentation de la campagne expérimentale d'essais sur béton pour évaluer la pertinence de la méthode de formulation proposée.

2.2 Constituants des bétons auto-plaçants légers

2.2.1 Ciment et filler calcaire

Le ciment utilisé est un ciment Portland de type CEM I 52.5 N de classe vraie égale à 62 MPa et de diamètre médian égal à 12,1 µm. Une addition calcaire est utilisée comme filler pour augmenter le volume de pâte en conservant un dosage de ciment convenable. Le filler calcaire se présente sous forme de poudre de calcite. La proportion d'éléments fins de diamètre inférieur à 63 µm est de 96,7 %. Les propriétés chimiques et physiques du ciment et de l'addition calcaire sont présentées dans le **Tableau 2.1**.

Tableau 2.1
Propriétés chimiques et physiques du ciment et de l'addition calcaire

Propriétés	Ciment	Addition calcaire
Composition chimique (%)		
SiO_2	22,40	0,4
Al_2O_3	2,96	-
Fe_2O_3	2,33	-
CaO	66,60	-
MgO	0,95	-
SO_3	3,45	-
Na_2O	0,10	0,008
K_2O	0,15	-
Perte au feu	1,56	-
$CaCO_3$	-	98,5
Insolubles	0,20	
CO_2	1	-
CaO libre	0,50	
Alcalins actifs	0,77	0,015
Caractéristiques physiques		
Finesse Blaine (cm^2/kg)	3 920	4 570
Masse volumique (kg/m^3)	3 160	2 700

Les résistances de liants constitués de ciment et d'addition calcaire sont déterminées expérimentalement selon les méthodes d'essais des ciments de la norme NF EN 196-1. Trois mélanges de liant à base de ciment Portland contenant respectivement 0, 20 et 30 % (en proportion volumique) d'addition calcaire sont testés à 1 et 28 jours. Les résistances moyennes à la compression des éprouvettes de mortiers confectionnées à partir de ces différents liants et conservées dans l'eau sont présentées dans le **Tableau 2.2**.

Tableau 2.2
Résistance de liants

N° compo	Proportion volumique (%)		Résistance moyenne à la compression (MPa)	
	Ciment	Addition calcaire	1j	28j
1	100	0	16	62
2	80	20	11,6	52
3	70	30	8,7	44,1

Les résistances du mortier à 1 et 28 jours diminuent lorsque la proportion volumique d'addition calcaire augmente. Ce résultat va permettre d'adapter la résistance du liant à la résistance du béton afin d'optimiser le dosage en ciment. La proportion volumique d'addition calcaire dans le liant sera comprise entre 20 et 30 %. Plus la résistance désirée sera élevée moins sera la proportion d'addition calcaire dans le liant.

2.2.2 Les granulats

Les distributions granulométriques des différents sables et gravillons sont représentées à la **Figure 2.1** reprise à la fin du paragraphe. Les normes mises en œuvre pour caractériser les constituants et les bétons sont présentées au **Tableau 2.4** du **Paragraphe 2.2.3**.

2.2.2.1 Sable naturel

Le sable naturel provient d'une roche calcaire riche en silice. La classe granulaire du sable de masse volumique normale est de 0/4 avec 10 % d'éléments fins de diamètre inférieur à 63 µm. Il est lavé et constitué de grains concassés. Le sable naturel (SIL 0/4) est caractérisé par un module de finesse de 3,4, une masse volumique réelle de 2 660 kg/m^3 et un coefficient d'absorption d'eau à 24 heures de 0,6 %. La prédiction de la résistance à la compression de bétons auto-plaçants légers de sable normal (BAPLSN) nécessite la connaissance du module élastique du sable naturel. En s'appuyant sur les données de la littérature (Neville 1995), le module élastique du sable normal d'origine calcaire est pris arbitrairement égal à 60 GPa. Le sable siliceux est principalement utilisé dans les formules de BAPLSN et dans une moindre mesure dans les formules de bétons auto-plaçants légers de sable léger (BAPLSL).

2.2.2.2 Sables légers

Les sables légers sont essentiellement utilisés pour la confection des BAPLSL. Deux types de sables légers sont choisis : le sable d'argile expansée et le sable d'ardoise expansée. Le sable d'argile expansé (ARG 0/4-650) a une classe granulaire de 0/4 et un module de finesse de 4,4. Le pourcentage d'éléments fins de diamètre inférieur à 63 µm est égal à 1,6 % (en masse) avec un coefficient d'absorption d'eau à 24 heures de 24,9 % (en masse). Sa masse volumique réelle est égale à 880 kg /m^3.

Le sable d'ardoise expansée (SCH 0/4-850) a une étendue granulaire entre 0/4 et un module de finesse de 3,40. Sa masse volumique réelle est de 1 400 kg/m^3. Le pourcentage d'éléments fins de diamètre inférieur à 63 µm est de 3,6 % (en masse). Le coefficient d'absorption d'eau à 24 heures du SCH 0/4-850 est de 13,2 % (en masse).

Nous rappelons que le coefficient d'absorption des sables légers est déterminé selon la procédure de la norme NF EN 1097-6 qui ne tient pas compte de la demande en eau des fines de diamètre inférieur à 63 µm.

2.2.2.3 Gravillons légers

Deux familles de granulats légers sont choisies pour réaliser les BAPL de structure. Il s'agit des gravillons d'argile expansée et d'ardoise expansée. Les gravillons d'argile expansée (ARG 4/8-750) de classe granulaire 4/8 sont constitués de grains de forme quasi sphérique. La masse volumique réelle de ce granulat léger est de 1 250 kg /m^3 avec un coefficient d'absorption à 24 heures de 12,8 % (en masse). Le pourcentage de grains de diamètre inférieur à 4 mm est de 1 % (en masse).

Les gravillons d'ardoise expansée (SCH 4/8-780) sont constitués d'un mélange de grains nodulaires et concassés de diamètre compris entre 4 et 8 mm. Le pourcentage de grains de

diamètre inférieur à 4 mm est de 29 % (en masse). La masse volumique réelle de ce granulat léger est de 1 280 kg/m^3 et son coefficient d'absorption d'eau à 24 heures est de 7,6 % (en masse).

Il convient de souligner que la masse volumique réelle et le coefficient d'absorption dans l'eau à 24 heures des gravillons légers, déterminés selon la norme NF EN 1097-6, se situent dans les plages de valeurs définies par les fournisseurs de granulats légers.

Le module élastique des gravillons légers est un des paramètres d'entrée du modèle série/parallèle. Le module d'un grain isolé de granulat léger ou module équivalent $\mathbf{E_g}$ peut être estimé à l'aide de la relation proposée par (Bremner and Holm 1986) qui dépend de la masse volumique réelle du granulat et qui s'écrit :

$$E_g = 0.0008\rho_g^2 \tag{2-1}$$

Pour tenir compte de la variabilité des grains au sein d'un même échantillon, le module élastique des gravillons légers est calculé à partir des données de masses volumiques réelles « fournisseurs » qui résultent d'un plus grand nombre de mesures. Les plages de masses volumiques réelles des granulats légers et celles des modules élastiques associés sont présentées au **Tableau 2.3**.

Tableau 2.3
Modules élastiques des granulats légers calculés à partir des données « fournisseurs »

Type de gravillons légers	Masse volumique réelle des grains (kg/m^3)			Module élastique du granulat (GPa)		
	Min	Moyenne	Max	Min	Moyenne	Max
ARG 4/8-750	1 160	1 327	1 460	11	14	17
SCH 4/8-780	1 230	1 380	1 530	12	15	19

2.2.3 Synthèse des propriétés des granulats naturels et légers utilisés

Le **Tableau 2.4** résume les caractéristiques physiques essentielles des granulats utilisées dans la mise en œuvre de la méthode de formulation.

Tableau 2.4
Caractéristiques physiques des granulats

Paramètres	Normes	Sable naturel	Sables légers		Gravillons légers	
Dénomination		SIL 0/4	ARG 0/4-650	SCH 0/4-800	ARG 4/8-750	SCH 4/8-780
Fines<63 µm (%)	-	10	1,6	3,6	1	29
Forme	-	Concassé	Concassé	Concassé	Rond	Concassé
Module de finesse		3,38	4,37	3,4	-	-
Absorption à 24h (%)	NF EN 1097-6	0,6	12,2	2,8	12,8	7,6
Masse volumique réelle (kg /m³)	NF EN 1097-6	2 660	1 000	1 500	1 250	1 280
Module élastique (GPa)	-	60	-	-	15	15

La **Figure 2.1** donne la répartition granulométrique des sables et des gravilons utilisés.

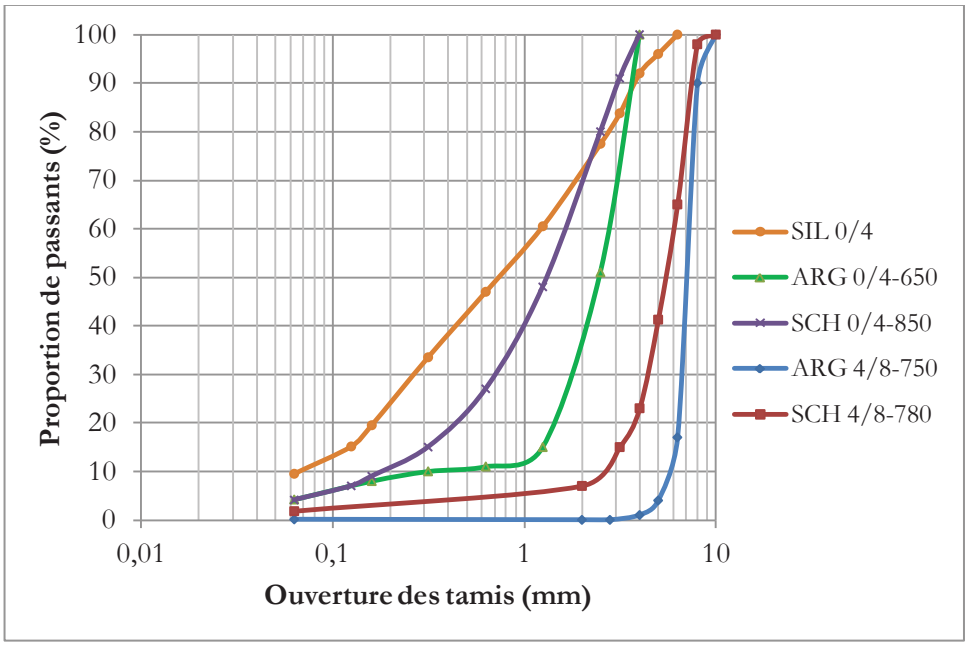


Figure 2.1 Courbes granulométriques des granulats

2.2.4 Adjuvants

Un superplastifiant haut réducteur d'eau est utilisé. C'est un adjuvant à base d'éther poly-carboxylique modifié contenant 19,9 % d'extrait sec. Le superplastifiant est dosé dans la limite du dosage de saturation qui se situe autour de 1 % d'extrait sec (soit 5 % d'extrait liquide) rapporté à la masse de liant (confère **Paragraphe 2.6.2**). Le dosage en superplastifiant est déterminé expérimentalement pour atteindre l'ouvrabilité souhaitée. Ainsi, le dosage en superplastifiant des bétons formulés se situe entre 0,10 et 1,95 % d'extrait liquide ; ce qui donne des mélanges faiblement adjuvantés.

Pour agir sur la texture de la pâte de ciment notamment dans les compositions de bétons auto-plaçants légers de sable léger (BAPLSL), un agent de viscosité est parfois rajouté au mélange. L'utilisation de l'agent de viscosité est parfois nécessaire pour améliorer la viscosité apparente de la pâte afin de limiter le risque de ségrégation. L'agent de viscosité est dosé entre 0,4 et 0,7 % d'extrait liquide rapporté à la masse de liant.

2.3. Caractérisation des mélanges

La caractérisation des mélanges vient en complément aux données sur les constituants pour déterminer les paramètres nécessaires à la mise en œuvre de la méthode de formulation. Elle regroupe des essais sur pâte de ciment, sur des mélanges pâte/gravillons et sur des mélanges granulaires.

2.3.1 Essais sur pâte

Les essais sur pâte vont permettre de déterminer la compacité des poudres et le dosage de saturation du superplastifiant afin d'optimiser la composition de la pâte de ciment.

2.3.1.1 Demande en eau des fines

La compacité des poudres est déterminée selon l'essai de demande en eau développé par (Sedran 1999). L'essai consiste à malaxer une masse donnée P_p de poudre avec une quantité d'eau croissante. La masse d'eau P_e juste nécessaire pour faire passer le mélange d'un état de terre humide à un état de pâte homogène est considérée comme la quantité remplissant la porosité de l'empilement des grains de la poudre (voir **Figure 2.2**). La compacité C ou demande en eau de la poudre est déterminée par l'équation suivante :

$$C = \frac{1000}{1000 + M\frac{P_e}{P_p}} \qquad (2\text{-}2)$$

M est la masse volumique réelle de la poudre en kg/m^3

L'essai de demande en eau est réalisé sur des échantillons non adjuvantés de ciment Portland et d'addition calcaire. Pour tenir compte de l'ajout d'addition calcaire comme filler dans la pâte,

l'essai est également réalisé sur un liant constitué respectivement de 80 % et 20 % en proportion volumique de ciment et d'addition calcaire. Cette proportion d'addition calcaire dans le liant va permettre d'atteindre des résistances compatibles avec le cahier des charges (voir **Tableau 2.2**) tout en assurant l'auto-plaçabilité des BAPL. Pour chaque poudre, cinq essais sont réalisés dans les conditions opératoires identiques. La compacité de la poudre est calculée à partir de la moyenne des cinq prises d'essai. Les résultats sont présentés dans le **Tableau 2.5**.

Tableau 2.5
Compacité expérimentale de poudres sans adjuvant

N°	Ciment (g)	Filler calcaire (g)	Eau P_e (g)	Compacité C		
				Valeur	Moyenne	Ecart type
1	350		97,8	0,5287		
2	350		98,7	0,5264		
3	350		98,4	0,5272	0,529	0,0056
4	350		99,7	0,5239		
5	350		94,0	0,5386		
1		350	74,3	0,636		
2		350	73,5	0,638		
3		350	73,4	0,639	0,638	0,0020
4		350	72,6	0,641		
5		350	73,6	0,638		
1	280	70	92,0	0,5527		
2	280	70	62,4	0,5517		
3	280	70	91,9	0,5530	0,552	0,0023
4	280	70	91,6	0,5538		
5	280	70	93,8	0,5480		



Humidification progressive du mélange



Pâte homogène

Figure 2.2 Essai de demande en eau sur une addition calcaire

La demande en eau du ciment est plus élevée que celle de l'addition calcaire dans les mêmes conditions opératoires. L'addition calcaire est donc plus compacte que le ciment portland. Sa

finesse Blaine qui est 1,2 fois plus élevée que celle du ciment pourrait expliquer ce résultat. L'ajout d'addition calcaire au ciment améliore la compacité du liant et confirme l'effet filler de l'addition calcaire.

2.3.1.2 Essai d'écoulement au cône de Marsh : dosage de saturation du couple liant/superplastifiant

Le dosage de saturation du superplastifiant est déterminé par la méthode de l'AFREM (De Larrard et al. 1996). L'essai consiste à mesurer le temps d'écoulement au cône de Marsh (voir **Figure 2.3**) d'un mortier pour différents dosages de superplastifiant et d'en déduire la proportion d'adjuvant pour laquelle le temps d'écoulement du mortier adjuvanté devient invariant. L'évolution du temps d'écoulement en fonction du dosage en extrait sec permet de repérer le point de tangence de la courbe et la droite de référence de pente 2/5. L'abscisse du point de tangence représente le dosage de saturation du couple ciment/adjuvant.

L'essai est réalisé avec un liant constitué en proportion volumique de 80 % de ciment Portland et 20 % d'addition calcaire pour les mêmes raisons que celles énoncées précédemment. Les résultats présentés sur la **Figure 2.4** indiquent que le dosage de saturation du superplastifiant à base d'éther poly-carboxylique modifié est autour de 1 % d'extrait sec soit 5 % d'extrait liquide.



Figure 2.3 Cône de Marsh

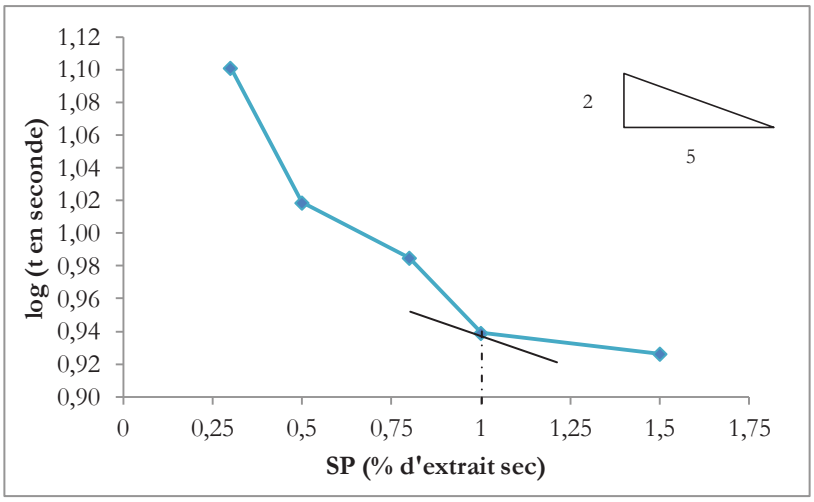


Figure 2.4 Dosage de saturation du superplastifiant à base d'éther poly-carboxylique modifié

L'agent de viscosité n'a pas fait l'objet d'un dosage de saturation. Son emploi a été utile pour stabiliser les formules de BAPLSL et améliorer leur résistance à la ségrégation. Le dosage en agent de viscosité a donc été prescrit au cas par cas en se référant aux informations fournies par le fabricant. Toutefois, le dosage en agent de viscosité n'a pas excédé 1 % d'extrait liquide rapporté à la masse du liant.

2.3.2 Essais sur les mélanges pâte/gravillons

Les essais réalisés sur les mélanges pâte/gravillons visent à caractériser le comportement hydrique des granulats légers dans la pâte de ciment afin d'ajuster la demande en eau des granulats légers dans la formulation des BAPL. Ces caractérisations vont permettre in fine de minimiser l'impact de l'absorption différée des granulats légers dans le béton frais sur les paramètres de composition (masse volumique réelle et teneur en eau efficace) et les propriétés des BAPL. Les essais sur les mélanges pâte/gravillons regroupent les essais d'absorption d'eau dans la pâte de ciment et les essais d'étalement au mini cône.

2.3.2.1 Essai d'absorption dans la pâte de ciment

La caractérisation de l'absorption d'eau des granulats légers dans la pâte de ciment a nécessité la mise au point d'un protocole d'essai spécifique. L'essai consiste à mélanger des gravillons partiellement saturé ou non avec la pâte de ciment ayant un rapport eau/ciment donné. A une échéance de la période dormante (inférieure ou égale à 2 heures), les granulats enrobés de pâte fraîche et la pâte de ciment sont mécaniquement séparés par tamisage. Les granulats enrobés de pâte fraîche sont ensuite pesés avant et après un traitement thermique pour évaporer l'eau chimiquement liée. Les détails du protocole d'essai et le calcul du coefficient d'absorption d'eau dans la pâte sont détaillés au **Chapitre 3**. Une étude comparative entre l'absorption d'un granulat léger et celle d'un granulat naturel est réalisée afin de valider le protocole. Pour mieux contrôler les problématiques d'absorption sur l'ouvrabilité, des essais d'étalement sont également réalisés.

2.3.2.2 Essai d'étalement sur des mélanges pâte/gravillons

L'essai d'étalement consiste à mesurer au mini cône (voir **Figure 2.5**) l'étalement d'un mélange pâte/granulat. Les essais sont réalisés sur les mêmes granulats que ceux utilisés pour l'absorption dans la pâte de ciment. Différentes valeurs de teneur en eau initiale de granulats sont testées pour optimiser l'ouvrabilité du mélange pâte/granulat associée à un temps de maintien de rhéologie donné. Les détails du mode opératoire et des résultats sont également présentés au **Chapitre 3**.



Figure 2.5 Mini cône

2.3.3 Essais sur les mélanges granulaires

Les essais sur les mélanges granulaires regroupent l'essai de compacité sur le squelette granulaire sec et l'essai de pré-mouillage des granulats légers. Ces caractérisations ont pour vocation d'optimiser la compacité et l'ouvrabilité du béton dans la mise en route de la méthode de formulation.

2.3.3.1 Essai de compacité des fractions granulaires à la table à secousses

Les compacités mesurées selon ce protocole sont des données d'entrée de l'outil RENE LCPC (Sedran et De Larrard 1999) basé sur le modèle des empilements compressibles (De Larrard 1999).

L'essai de compacité à la table à secousses est réalisé selon le protocole LPC 61 (Lédée et al. 2004). L'essai consiste à placer un échantillon de granulat dans un moule sous la contrainte d'un piston et à appliquer à l'ensemble, des secousses mécaniques provoquant un réarrangement des grains, et donc un compactage de l'échantillon. La mesure réalisée est alors celle de la masse volumique apparente de l'échantillon qui permet de calculer la compacité C du granulat selon la relation :

$$C = \frac{\rho_a}{\rho_{rd}} \qquad (2\text{-}3)$$

ρ_a masse volumique apparente selon le protocole LPC 61

ρ_{rd} masse volumique réelle déterminée selon la norme NF EN 1097-6

Chaque granulat est subdivisé en plusieurs classes granulaires selon sa granularité. La tranche granulaire est définie telle que le rapport diamètre maximum (D_{max}) sur diamètre minimum (d_{min}) soit inférieur ou égal à 4. La compacité de chacune des classes granulaires qui composent le granulat est ensuite déterminée selon ladite procédure. Pour éviter des inégalités liées à la représentativité des classes dans la constitution du diagramme de remplissage d'un granulat, les classes granulaires dont la proportion est inférieure à 15 % ne sont pas prises en compte. A titre d'exemple le granulat léger ARG 4/8-750 est considéré comme un granulat unimodal puisque sa granularité est serrée (82 % de refus cumulés) autour du diamètre 6,3 mm. Les autres granulats sont considérés comme multimodaux (constitués chacun de trois classes granulaires). L'essai est répété deux fois pour chaque granulat. Les valeurs moyennes de compacité sont présentées dans les **Tableaux 2.6, 2.7** et **2.8**.

Tableau 2.6
Compacité du sable naturel

Type de Granulat	Classe granulaire	d_{min} (µm)	D_{max} (µm)	Proportion (%)	Compacité
Sable naturel SIL 0/4	A1	63	1 250	60	0.738
	A2	1 250	2 500	17	0.565
	A3	2 500	4 000	23	0.563
	Granulat	63	4 000	100	0.733

Tableau 2.7
Compacité des granulats d'argile expansée

Type de Granulat	Classe granulaire	d_{min} (µm)	D_{max} (µm)	Proportion (%)	Compacité
Sable léger ARG 0/4-650	A1	63	1 250	15	0.648
	A2	1 250	2 500	35	0.653
	A3	2 500	4 000	50	0.559
	Granulat	63	4 000	100	0.685
Gravillons légers ARG 4/8-750	A4	4 000	5 000	5	0.640
	A5	5 000	6 300	13	0.636
	A6	6 300	8 000	82	0.667
	Granulat	4 000	8 000	100	0.677

Tableau 2.8
Compacité des granulats d'ardoise expansée

Type de Granulat	Classe granulaire	d_{min} (µm)	D_{max} (µm)	Proportion (%)	Compacité
Sable léger SCH 0/4-850	A1	63	1 250	48	0.711
	A2	1 250	2 500	32	0.641
	A3	2 500	4 000	20	0.662
	Granulat	63	4 000	100	0.784
Gravillons légers SCH 4/8-780	A4'	3 150	5 000	45	0.529
	A5	5 000	6 300	35	0.539
	A6	6 300	8 000	20	0.577
	Granulat	3 150	8 000	100	0.578

La compacité des sables légers est proche de la compacité du sable naturel tandis que la compacité des gravillons d'argile expansée est plus élevée que celle des gravillons d'ardoise expansée. La granularité étalée des sables conduit à des mélanges « sable » plus denses que les mélanges « gravillons ».

2.3.3.2 Pré-mouillage des granulats légers

Pour minimiser les problématiques d'absorption sur l'ouvrabilité du béton, un protocole de pré-mouillage a été proposé. La combinaison du pré-mouillage et de l'essai l'absorption dans la pâte de ciment va conduire à la définition d'un nouveau paramètre pour optimiser la demande en eau des granulats légers dans le béton frais.

Le pré-mouillage des granulats légers avant incorporation dans le béton vise d'une part, d'avoir une teneur en eau initiale homogène et reproductible pour les différentes fabrications et d'autre part, de limiter l'absorption d'eau dans la pâte de ciment au cours du malaxage et lors de la mise en place du béton. En d'autres termes, le pré-mouillage va permettre de ramener l'absorption d'eau des granulats légers dans la pâte et dans le béton à des valeurs proches de celles des granulats naturels comprises entre 0 et 2 % (en masse).

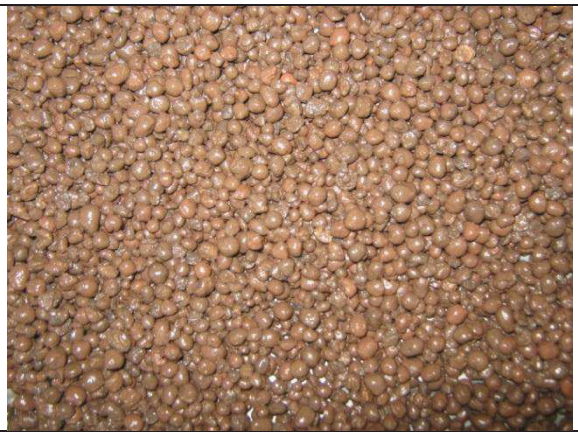
La technique de pré-mouillage consiste à sécher à 105 °C pendant 48 heures le granulat léger puis le laisser refroidir à température ambiante. Une masse donnée du granulat sec est pesée et mise dans un conteneur étanche. La masse d'eau correspondant à la quantité d'eau absorbable par le granulat à 24 heures est ajoutée au granulat de masse connue. Le conteneur hermétiquement fermé est agité manuellement pendant 5 minutes (voir **Figure 2.6-a**) pour homogénéiser le contenu. A l'issue d'un pré-mouillage réussi, il ne reste pas d'eau au fond du conteneur et les grains sont enrobés de façon homogène d'un film d'eau (voir **Figure 2.6-b**). La teneur en eau des granulats pré-mouillés (voir **Figure 2.6-c et d**) est déterminée à la poêle à frire.



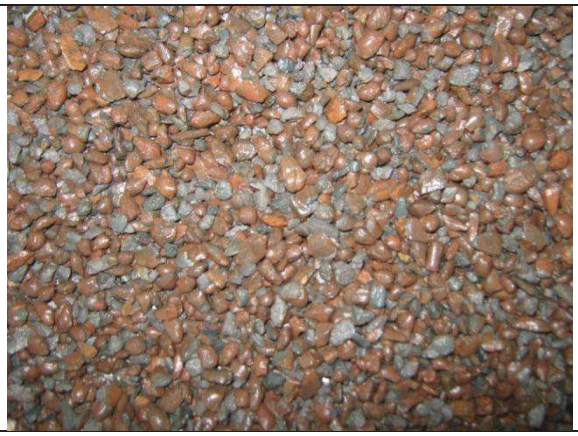
(a) Agitation du mélange



(b) Fond du contenant après agitation



(c) Gravillons ARG après pré-mouillage



(d) Gravillons SCH après pré-mouillage

Figure 2.6 Pré-mouillage des granulats légers

Pour chaque granulat léger, l'essai de pré-mouillage est réalisé sur deux échantillons dans des conditions opératoires identiques. La teneur en eau du granulat notée w est donnée par la relation suivante:

$$w(\%) = \frac{M_{hum} - M_{sec}}{M_{sec}} \quad (2\text{-}4)$$

M_{hum} masse humide du granulat ;
M_{sec} masse sèche après passage à la poêle à frire.

Le détail des résultats est présenté au **Tableau 2-9**.

Tableau 2.9
Pré-mouillage des gravillons légers

Paramètres	**Pré-mouillage**			
	Argile expansée		Ardoise expansée	
	1	2	1	2
Coefficient d'absorption à 24 h (%)	12,8	12,8	7,6	7,6
Masse de granulat sec (g)	3 000	3 000	3 000	3 000
Masse d'eau ajoutée (g)	384	384	228	228
	Détermination de la teneur en eau			
Masse sèche (g)	270	314	301	370
Masse humide (g)	299,9	350,3	321,5	393,4
Teneur en eau (%)	11,07	11,56	6,81	6,32

Les granulats pré-mouillés sont ensuite soumis à l'essai d'absorption dans la pâte détaillé dans le **Chapitre 3**. Pour se conformer aux méthodes d'essai ciments, les essais d'absorption sont réalisés dans une pâte de rapport eau/ciment égal à 0,5. L'absorption d'eau des granulats légers pré-mouillé dans le béton frais est obtenue à 1 heure et déterminée selon de l'essai d'absorption dans la pâte de ciment. Le coefficient d'absorption d'eau dans la pâte de ciment à 1 heure devient le nouveau paramètre pour ajuster la demande en eau des granulats légers dans le béton frais.

2.4 Campagne de caractérisation des bétons

Les bétons légers obtenus à partir de la méthode de formulation sont caractérisés à l'état frais et l'état durci. Les essais sur bétons sont répartis en quatre catégories comme l'indique le **Tableau 2.10**. Les propriétés physiques sur bétons frais regroupent les essais de masse volumique réelle, de teneur en air et d'indice de ségrégation. Les propriétés d'écoulement sont évaluées par des essais technologiques tels que l'étalement au cône d'Abrams, l'écoulement à l'entonnoir en V et l'essai de remplissage de la boîte en L. Les propriétés mécaniques à l'état durci regroupent la résistance à la compression, la traction par fendage et le module d'élasticité. Les propriétés de durabilité rassemblent la porosité accessible à l'eau, l'absorption et la carbonatation accélérée. Les essais sur bétons sont réalisés à divers âges et sur différents types de corps d'épreuve.

Tableau 2.10
Essais réalisés sur les formules de béton

Catégorie d'essais	Paramètres	Échéances (jours)	Conditions de cure	Dimensions des corps d'épreuve	Nombre	Référence normative
Propriétés physiques	Densité réelle (A)	-	-	-	1	NF EN 12350-6
	Teneur en air (A)	-	-	-	1	NF EN 12350-7
	Densité réelle et teneur en air (R)	-	-	-	1	ASTM C173
	Indice de ségrégation	-	-	-	1	-
Propriétés d'écoulement	Etalement au cône	-	-	-	1	NF EN 12350-2
	Temps d'écoulement à l'entonnoir V	-	-	-	1	NF EN 12350-9
	Taux de remplissage à la boite en L	-	-	-	1	NF EN 12350-10
Propriétés physiques et mécaniques	Résistance en compression	1, 28 et 90	En salle humide	Cubes 10*10 et 15*15	16	NF EN 12390-3
	Traction par fendage	28	En salle humide	Cylindre 11*22	3	NF EN 12390-5
	Masse volumique apparente sèche	28	En salle humide	Cylindre 11*22	1	NF EN 12390-7
	Module d'élasticité	28	En salle humide	Cylindre 11*22	3	ISO DIS 1920-10
Propriétés de durabilité	Absorption d'eau	28	En salle humide	Cylindre 11*22	2	NF EN 13369
	Carbonatation accélérée	28	En salle humide	Parallélépipède 7*7*28	8	XP P 18-458
	Porosité accessible à l'eau	28	En salle humide	Cylindre 11*22	1	NF P 18-459

2..4.1 Malaxage et conservation des éprouvettes en béton

Les bétons sont fabriqués dans un malaxeur à cuve fixe et à train valseur d'une capacité utile de 80 litres. Les conditions de fabrication sont proches des conditions ambiantes. Deux techniques de malaxage sont utilisées. La première consiste à incorporer les gravillons légers dans le malaxeur après avoir préparé le mortier. La seconde consiste à mélanger les gravillons légers et le sable dans un premier temps pour ensuite rajouter les autres constituants tels que le liant, l'eau et l'adjuvant. Les deux techniques conduisent à un temps de malaxage assez proche même si la première offre l'avantage de contrôler la fluidité du mortier avant l'incorporation des gravillons légers. L'ajout de l'adjuvant se fait en une ou deux étapes selon la technique choisie.

Le temps de malaxage est d'environ 30 minutes. Dans le cas des gravillons légers pré-mouillés, le temps de malaxage peut être plus long. La procédure de malaxage d'après la première technique d'introduction des constituants est décrite à la **Figure 2.7**.

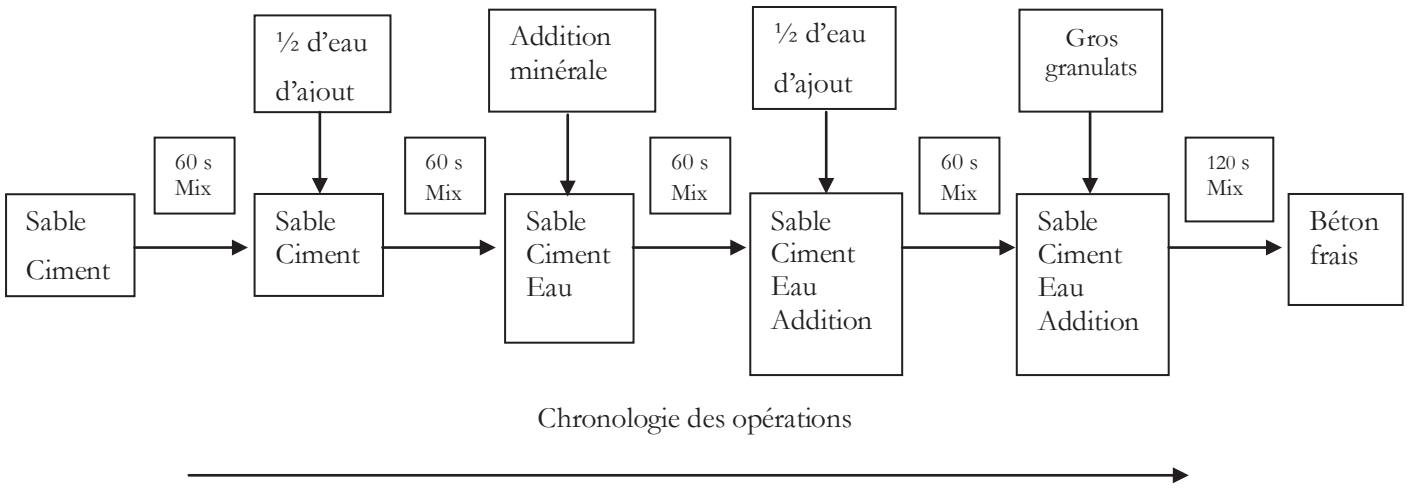


Figure 2.7 Procédure d'introduction des constituants au cours du malaxage

Le remplissage des moules est exempt de toute vibration et tout choc extérieur. Les moules remplis de béton sont entreposés dans une salle régulée à 20 °C pendant 24 heures. Les corps d'épreuves sont recouverts en partie supérieure de film polyane afin de prévenir la dessiccation précoce au jeune âge. Après démoulage, les corps d'épreuves sont transférés dans une salle humide régulée à 20 °C avec une humidité relative supérieure à 95 % et conservés jusqu'à l'échéance des essais. Au total, plus de six cents corps d'épreuves ont été confectionnés et testés.

2.4.2 Propriétés physiques à l'état frais

2.4.2.1 Masse volumique réelle et teneur en air occlus

La masse du béton frais après malaxage est mesurée et rapportée au volume d'un récipient rigide et étanche dont le volume et la masse sont connus. Le serrage à refus dans le cas des bétons auto-plaçants est naturel par essence et ne nécessite pas de vibration additionnelle. La masse volumique réelle du béton est déterminée selon deux procédures distinctes : la procédure décrite dans la norme NF EN 12350-6 à l'aide de l'aéromètre (d'un volume de 8 litres) et le mode opératoire de la norme ASTM C173 à l'aide du roll-a-meter (d'un volume de 2,1 litres). La masse volumique réelle des bétons légers à l'état frais, n'excède pas à 2 200 kg/m^3 d'après la norme NF EN 1992-1- 1.

La teneur en air occlus est mesurée par la méthode du manomètre (aéromètre) décrite par la norme NF EN 12350-7 et par la méthode volumétrique (roll-a-meter) selon la norme ASTM C 173. La méthode du manomètre utilise la compressibilité de l'air selon le principe de la loi de Boyle-Mariotte qui relie la pression (p) et le volume (V) d'un gaz réel à température constante. Cette loi s'exprime entre deux états (1) et (2) par la relation :

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 \tag{2-5}$$

L'essai à l'aéromètre (voir **Figure 2.8-a**) consiste à introduire de l'eau sur une hauteur prédéfinie au-dessus d'un échantillon de béton serré de volume connu se trouvant dans une enceinte hermétique et à appliquer sur l'eau, une pression d'air prédéterminée. La diminution de la pression d'air situé dans le compartiment supérieur de l'appareil est proportionnelle à la quantité d'air occlus contenu dans l'échantillon de béton. Cette méthode (essai à l'aéromètre) n'est pas applicable aux bétons de granulats légers en raison de la grande porosité de ces matériaux. Cependant, elle a été expérimentée pour identifier une corrélation éventuelle avec la méthode volumétrique (essai au roll-a-meter).



(a) Aéromètre à béton d'un volume de 8litres (A) *(b) Roll-a-meter d'un volume de 2,1 litres (R)*

Figure 2.8 Appareils de mesure de masse volumique réelle et de teneur en air

L'essai au « roll-a-meter » (voir **Figure 2.8-b**) consiste à introduire de l'eau sur une hauteur prédéfinie au-dessus de l'échantillon de béton serré de volume connu et à secouer l'enceinte hermétique selon une cadence définie. La diminution du volume d'air contenu dans l'échantillon de béton est mesurée en observant la baisse du niveau d'eau, la colonne d'eau étant étalonnée en pourcentage d'air de l'échantillon de béton. Comparativement à l'aéromètre, il n'y a pas de pression d'air prédéterminée appliquée sur l'eau. L'absence de pression d'air additionnelle élimine le biais que peut induire l'air emprisonné dans les granulats poreux.

Le **Tableau 2.11** donne des valeurs de masse volumique réelle et de teneur en air mesurées avec un aéromètre et un roll-a-meter pour des BAPL formulés à partir de deux rapports E_{eff}/L et trois valeurs de volume de pâte. Les masses volumiques réelles mesurées à l'aide de l'aéromètre sont inférieures à celles correspondant au roll-a-meter sans doute en raison de l'effet d'échelle. Pour mémoire, le volume de l'aéromètre est quatre fois plus grand que celui du roll-a-meter. La masse volumique réelle mesurée avec l'aéromètre à béton reste la plus représentative et sera la méthode

de référence utilisée pour évaluer la masse volumique réelle à l'état frais des formules de BAPL proposées.

Tableau 2.11
Masse volumique réelle et teneur en air occlus mesurées à l'aéromètre et au « roll-a-meter »

Paramètres	Type d'appareil	Rapport E_{eff}/L=0,35			Rapport E_{eff}/L=0,55		
		Volume de pâte					
		350	400	450	350	400	450
Masse volumique réelle (kg/m³)	Aéromètre (A)	1 926	1 947	1 952	1 884	1 858	1 841
	Roll-a-meter (R)	1 969	1 989	2 015	1 903	1 925	1 903
Teneur en air (%)	Aéromètre (A)	6,5*	7,5*	6,4*	9,5*	10,0*	8,6*
	Roll-a-meter (R)	1,5	2,1	1,7	4,1	3,3	2,6

**Sans prise en compte du facteur de correction lié au granulat.*

Les teneurs en air mesurées à l'aéromètre pour les deux rapports E_{eff}/L et pour les trois volumes de pâte sont beaucoup plus élevées par rapport aux données de la littérature sur les bétons légers sans agent entraîneur d'air. Le facteur de correction lié au granulat devient prépondérant en présence de granulats légers et impacte significativement la teneur en air réelle du béton. En revanche, les teneurs en air mesurées à l'aide du roll-a-meter sont plus proches des valeurs habituelles (teneur en air inférieure à 3 % du volume du béton) pour ce type de matériau. L'absence de pression additionnelle conduit certainement à une mesure de la teneur en air occlus qui n'est pas perturbée par l'air emprisonné dans les pores des granulats légers.

Tableau 2.12
Composition en kg/m³ de mortiers pour la validation de mesure de la teneur en air occlus

Constituants	Rapport E_{eff}/L		
	0,43	0,53	0,68
Sable naturel	1 456	1 473	1 485
Ciment	437	385	344
Addition calcaire	137	120	108
Superplastifiant	0,86	0,42	0,08
Eau efficace	247	270	306
Masse volumique réelle théorique (kg/m³)	2 443	2 385	2 359

Pour légitimer l'utilisation du roll-a-meter, les essais ont été étendus aux mortiers de sable normal dont les compositions sont présentées au **Tableau 2.12**. Les teneurs en air mesurées à l'aide de l'aéromètre à mortier (d'un volume de 1 litre) et du roll-a-meter (d'un volume de 2,1 litres) sont comparées sur les trois mortiers de différents rapports E_{eff}/L. Les résultats présentés sur la **Figure 2.9** indiquent que les valeurs de teneur en air occlus mesurées à l'aide de l'aéromètre à mortier sont similaires à celles mesurées sur le roll-a-meter pour les trois mortiers.

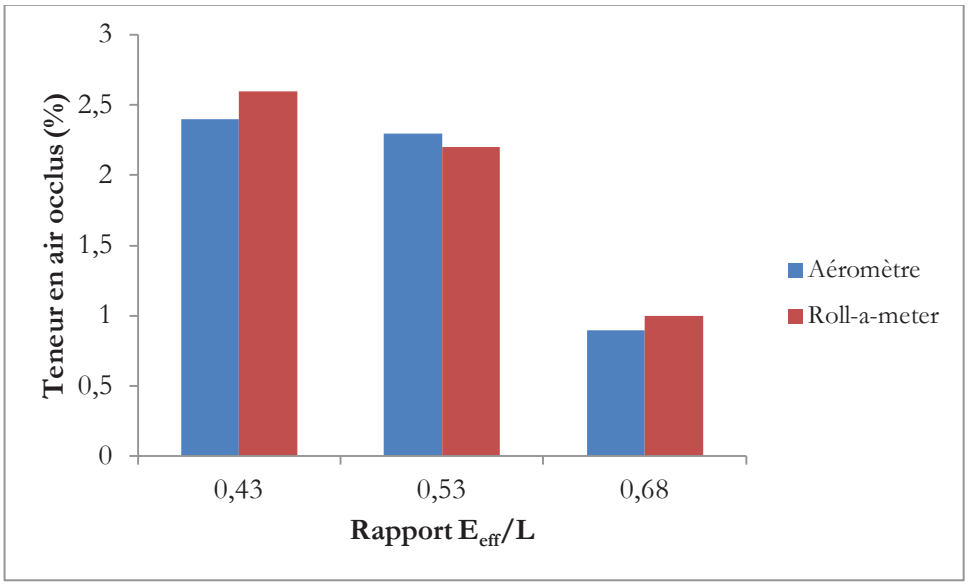


Figure 2.9 Comparaison de masse volumique et teneur en air entre l'aéromètre et le roll-a-meter

La teneur en air mesurée à l'aide du roll-a-meter est donc la plus représentative pour qualifier les bétons légers et sera la méthode de référence utilisée pour évaluer la teneur en air occlus du béton frais dans la phase de validation expérimentale.

2.4.2.2 Indice de ségrégation statique

La ségrégation se manifeste dans le béton par une séparation de phases (pâte/granulat, granulat/granulat ou eau/squelette granulaire) dans le mélange sous l'effet des interactions dissipatives (gravité, vibration ou chocs externes). Elle peut être statique ou dynamique. Dans le cas particulier des bétons formulés avec une quantité d'eau de gâchage relativement importante, une séparation entre l'eau et le squelette granulaire peut s'opérer et engendrer une remontée d'eau à la surface du béton. On parle de ressuage du béton.

Dans les cas des bétons auto-plaçants (BAP), la séparation entre phases est souvent due à la gravité puisque le serrage à refus du béton est naturel. Dans les bétons auto-plaçants légers de sable normal (BAPLSN), la ségrégation statique est engendrée par une séparation entre le mortier et les gravillons légers. La différence de masse volumique réelle entre le mortier de sable normal et les gravillons légers peut occasionner une ségrégation due à l'action de la gravité. Les gravillons légers migrent préférentiellement vers le dessus du moule comme le montre l'illustration de la **Figure 2.10**. Par ailleurs, les bétons auto-plaçants légers de sable léger (BAPLSL) peuvent présenter une ségrégation due à la gravité entre les grains légers de différentes tailles. Les plus gros grains (avec un indice d'expansion plus élevé et donc plus léger) remontent vers la surface du béton. Dans un BAPL ségrégé, la ségrégation entre phases solide/solide s'accompagne souvent d'une ségrégation liquide/solide.

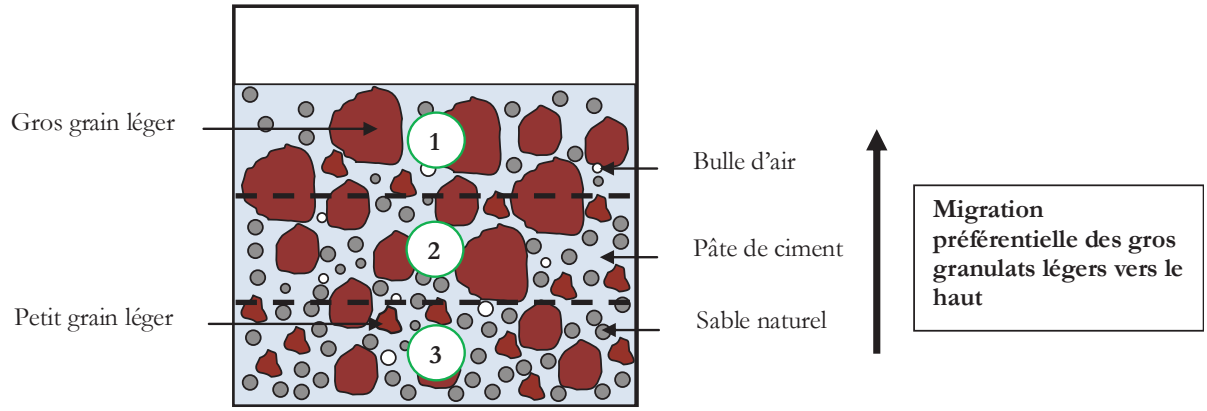


Figure 2.10 Physique de la ségrégation dans les bétons légers

Ce phénomène peut entrainer à l'état frais, une hétérogénéité de masse entre les parties du béton (haute, centrale et basse) respectivement 1 2 et 3 sur la **Figure 2.10** lors du remplissage d'une colonne cylindrique par exemple. A l'état durci, la ségrégation du béton engendre des variations spatiales des propriétés mécaniques et de durabilité.

Pour qualifier la ségrégation statique des BAPL proposés, des essais de stabilité à la colonne sont effectués afin de déterminer un indice de ségrégation statique. L'indice de ségrégation est déterminé sur béton frais à l'aide de l'essai à la colonne. L'essai consiste à remplir d'un seul tenant une colonne cylindrique de 450 mm de hauteur et 150 mm de diamètre (voir **Figure 2.11**). La colonne est constituée de trois cylindres identiques de 150 hauteur chacun, intercalés de joints. L'étanchéité des joints est assurée par une ceinture étanche et amovible. Le béton déversé dans la colonne est laissé au repos pendant 30 à 60 minutes. Le contenu de chaque cylindre est recueilli et lavé à l'eau sur un tamis de 4 mm. Le refus sur le tamis est séché à l'étuve jusqu'à masse constante à 105 °C. La masse de granulat dans les cylindres du haut, du centre et du bas est ainsi déterminée. Ces mesures vont permettre de déterminer un coefficient de variation qui est pris comme l'indice de ségrégation. L'indice de ségrégation est calculé d'après l'expression suivante :

$$I_{seg}(\%) = \frac{\sigma}{\mu} * 100 \qquad (2\text{-}6)$$

σ écart type des masses de refus pour les trois cylindres de la colonne
μ moyenne des masse de refus pour les trois cylindres de la colonne

D'après les données de (Wu et al. 2009) sur des bétons auto-plaçants d'ardoise expansée, plus l'indice de ségrégation déterminé comme sus-décrit est faible, plus la distribution des granulats entre les trois parties de la colonne est uniforme. Selon les auteurs, la valeur de l'indice de ségrégation ne doit pas excéder 5 % pour être appropriée.



Colonne cylindrique de 150x450 mm



3 Cylindres de 150x150 mm

Figure 2.11 Essai de ségrégation à la colonne

2.4.3 Les propriétés d'écoulement

La mobilité et la résistance au blocage dans un milieu confiné des BAPL sont testées à partir de trois paramètres technologiques que sont :

- l'étalement au cône d'Abrams ;
- le temps de passage à l'entonnoir en V ;
- le taux de remplissage à la boite en L.

2.4.3.1 Essai d'étalement au cône d'Abrams

L'essai d'étalement consiste à déterminer le diamètre moyen de la galette de béton frais obtenu après soulèvement du cône préalablement rempli (voir **Figure 2.12**). Le plus grand diamètre d'étalement (d_1) et le diamètre de l'étalement perpendiculaire (d_2) sont mesurés, l'étalement étant le diamètre moyen. L'étalement noté SF est la moyenne de d_1 et d_2 donnée par l'équation suivante :

$$SF = \frac{(d_1 + d_2)}{2} \tag{2-7}$$

L'étalement constitue un essai de fluidité qui permet d'indiquer la capacité de remplissage du béton auto-plaçant en milieu non confiné. Il permet également de définir la classe d'étalement du béton auto-plaçant selon les indications du **Tableau 2.13** tiré de la norme NF EN 206-9.

Tableau 2.13
Classes d'étalement

Classe	Etalement en mm
SF1	550 à 650
SF2	660 à 750
SF3	760 à 850

L'étalement des bétons auto-plaçants légers (BAPL) identifiés dans la littérature est compris entre 550 et 800 mm.



Cône d'Abrams sur un plateau — Galette de béton

Figure 2.12 Essai d'étalement au cône d'Abrams

2.4.3.2 Essai d'écoulement à l'entonnoir en V

Un entonnoir en forme de V est rempli de béton frais afin de mesurer le temps nécessaire en secondes à l'écoulement du béton hors de l'entonnoir (voir **Figure 2.13**). Le temps d'écoulement à l'entonnoir en V noté t_V permet d'évaluer la capacité de remplissage du béton auto-plaçant et donne une indication sur la viscosité apparente. Les deux classes de viscosité apparente sont indiquées dans le **Tableau 2.14** tiré de la norme NF EN 206-9. En général, le temps d'écoulement des BAPL se situe entre 3 et 25 secondes.



Entonnoir en V



Chronomètre

Figure 2.13 Appareillage de mesure de la capacité de remplissage

Tableau 2.14
Classes de viscosité apparente

Classe	Temps (s) relatif à l'essai d'écoulement à l'entonnoir en V
VF1	<9,0
VF2	9,0 à 25,0

2.4.3.3 L'essai à la boite en L

L'essai consiste à déverser du béton frais dans le compartiment vertical d'une boite en forme de L puis à laisser s'écouler le béton dans le compartiment horizontal à travers les espaces entre les barres d'armatures lisses et verticales (voir **Figure 2.14**). Les hauteurs du niveau de béton dans la partie vertical (H1) et à l'extrémité de la partie horizontale (H2) sont mesurées et le rapport H2/H1 est déterminé. Ce rapport qui représente le taux de remplissage à la boite en L noté PL, permet de mesurer l'aptitude à l'écoulement ou au blocage du béton auto-plaçant en milieu confiné. Il renseigne sur la résistance à la ségrégation dynamique en présence d'obstacle. Deux classes d'aptitude à l'écoulement sont considérées selon l'espacement entre les barres d'armatures lisses comme l'indique le **Tableau 2.15** extrait de la norme NF EN 206-9. Les BAPL présentés dans la littérature indiquent un taux de remplissage compris entre 0,75 et 0,90.

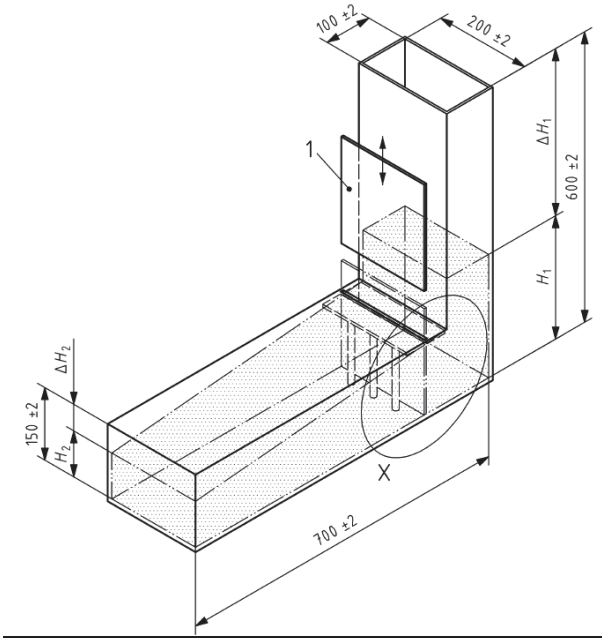




Schéma d'une boite en L | *Boite en L*

Figure 2.14 Appareillage de mesure de l'aptitude à l'écoulement

Les BAPL formulés sont caractérisés avec le système de positionnement de 3 barres. Un moule transparent est confectionné pour vérifier l'aptitude à l'écoulement en milieu non confiné et l'état du parement après mise en place du béton (voir **Figure 2.15**).



Figure 2.15 Moule transparent

Tableau 2.15
Classes d'aptitude à l'écoulement

Classe	Taux de remplissage
PL1	≥ 0,80 avec 2 armatures
PL2	≥ 0,80 avec 3 armatures

2.4.4 Propriétés mécaniques

Les essais destructifs sont réalisés pour évaluer les propriétés mécaniques des BAPL formulés. Ces essais sont réalisés sur différents types d'éprouvette et à divers âges. La **Figure 2.16** montre les dispositifs d'essais.

2.4.4.1 Résistance à la compression

L'évolution de la résistance moyenne à la compression est réalisée à partir d'éprouvettes cubiques 10x10 cm pour trois âges (1, 28 et 90 jours). A chaque échéance, l'essai est répété sur six éprouvettes et la valeur moyenne de la résistance à la compression est calculée pour la présentation des résultats. La résistance caractéristique (f_{ck}) pour définir la classe de résistance du béton est évaluée d'après la relation ci-dessous, connaissant la valeur moyenne de la résistance à la compression à 28 jours sur trois éprouvettes cubiques 15*15 cm (f_{cm}):

$$f_{cm} = f_{ck} + 8\,MPa \tag{2-8}$$

2.4.4.2 Traction par fendage

La traction par fendage est exécutée sur des corps d'épreuve cylindriques 11*22 cm à 28 et 90 jours d'âge. Un dispositif adapté est intégré à la presse pour réaliser l'essai conformément la norme NF EN 12390-5.



Résistance à la compression



Traction par fendage



Eprouvette équipée de jauges de déformation



Module d'élasticité

Figure 2.16 Dispositifs d'essais de résistance et de rigidité

2.4.4.3 Module d'élasticité

Des éprouvettes cylindriques 11*22 cm sont équipées d'extensomètres à fils résistants connectés à une centrale d'acquisition qui permet d'enregistrer les déplacements au cours des cycles de chargement/déchargement de l'éprouvette. Chaque éprouvette est équipée de trois jauges de déformation disposées sur trois génératrices ayant un écart angulaire de 120 °C entre elles.

Le module d'élasticité du béton est déterminé sur des éprouvettes cylindriques 11*22 âgées de 28 et 90 jours. Selon la norme ISO DIS 1920-10, trois cycles de chargement/déchargement sont réalisés dans une plage de mesure comprise entre 10 kN et une charge équivalente au tiers de la force de rupture. Préalablement, la force de rupture est déterminée à partir de la valeur moyenne de la résistance à la compression sur trois éprouvettes cylindriques 11*22 cm. L'essai est réalisé à force imposée telle que la vitesse de montée de charge soit égale à 0,5 MPa /s. La **Figure 2.17** présente les cycles de chargement/déchargement. A l'issue de l'essai, la courbe contrainte/déformation est tracée pour en déduire le module d'élasticité du béton. Le module est obtenu en moyennant sur trois essais, le coefficient directeur de la droite contrainte/déformation du deuxième et du troisième cycle. Selon la norme NF EN 1992-1-1, le module d'élastique du béton léger peut être évalué par l'expression suivante :

$$E_{lcm} = E_{cm}.\eta_E \qquad (2\text{-}9)$$

E_{cm} module d'élasticité du béton de masse volumique normale de résistance équivalente
η_E coefficient compris entre 0,21 et 0,83 pour les bétons léger de structure. Pour les bétons légers courants, le coefficient est de 0,53.

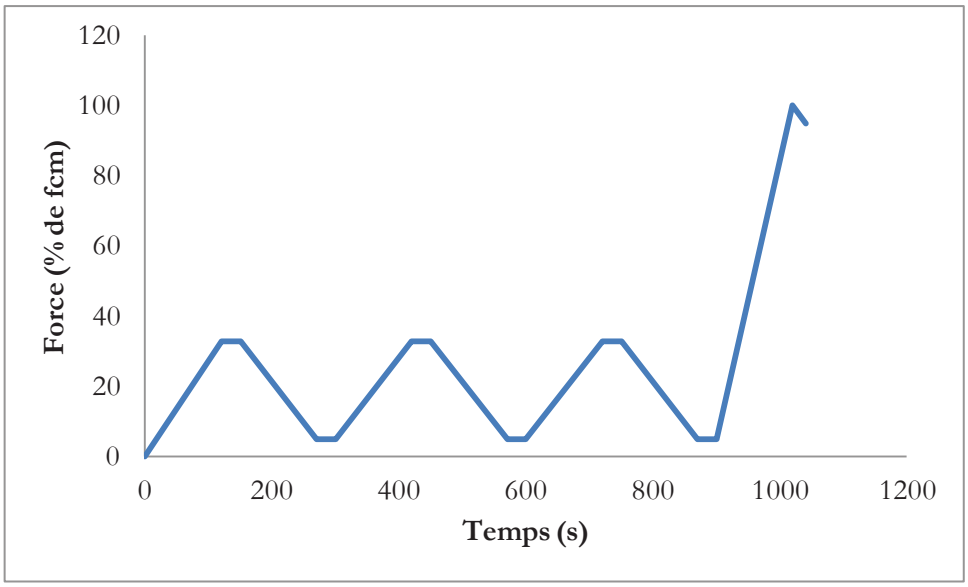


Figure 2.17 Cycles de chargement/ déchargement

2.4.5 Propriétés de durabilité

La durabilité des BAPL proposées est évaluée par l'essai de porosité accessible à l'eau, d'absorption dans l'eau et de carbonatation accélérée.

2.4.5.1 Absorption et porosité accessible à l'eau

Les essais d'absorption d'eau et de porosité accessible à l'eau consistent à mesurer la porosité d'un échantillon de béton par absorption respectivement à pression atmosphérique et sous vide (voir **Figure 2.18**). Les corps d'épreuve en forme de cylindre tronqué de hauteur comprise entre 50 et 110 mm et de diamètre 110 mm sont moulés pour les essais d'absorption et de porosité accessible à l'eau. Le sciage des corps d'épreuve de bétons légers met à nu les pores du granulat sur le faciès de découpe et engendre une absorption anormale du béton. C'est la raison pour laquelle les bétons légers n'entrent dans le domaine d'application de la norme NF P 18-459 relative à l'essai de porosité et masse volumique réelle à l'état durci. Pour y remédier, les éprouvettes dédiées aux essais d'absorption et de porosité accessible à l'eau ont donc été moulés. A l'issue de l'essai, le coefficient d'absorption, la porosité et la masse volumique réelle sèche du béton sont déterminés.



Immersion complète dans l'eau d'éprouvettes pour absorption



Mise sous vide d'éprouvettes pour la porosité accessible à l'eau

Figure 2.18 Absorption et porosité accessible à l'eau

L'absorption d'eau du béton notée W est donnée par l'expression ci-après :

$$\boldsymbol{W}(\%) = \frac{\boldsymbol{M_1 - M_2}}{\boldsymbol{M_2}} * \mathbf{100} \tag{2-10}$$

$\boldsymbol{M_1}$ Masse de l'éprouvette après absorption jusqu'à masse constante en g
$\boldsymbol{M_2}$ Masse de l'éprouvette après séchage jusqu'à masse constante à 105 ± 5°C en g

La porosité accessible à l'eau $\boldsymbol{\varepsilon}$ exprimée en pourcentage volumétrique est donnée par l'équation :

$$\boldsymbol{\varepsilon}\,(\%) = \frac{\boldsymbol{M_{air} - M_{sec}}}{\boldsymbol{M_{air} - M_{eau}}} * \mathbf{100} \tag{2-11}$$

$\boldsymbol{M_{air}}$ masse à l'air de l'éprouvette saturée en g ;
$\boldsymbol{M_{sec}}$ masse de l'éprouvette séchée jusqu'à masse constante à 105 ± 5 °C en g ;
$\boldsymbol{M_{eau}}$ masse déjaugée de l'éprouvette saturée en g ;

La masse volumique réelle sèche ρ_d exprimée en kg/m^3 est donnée par l'équation :

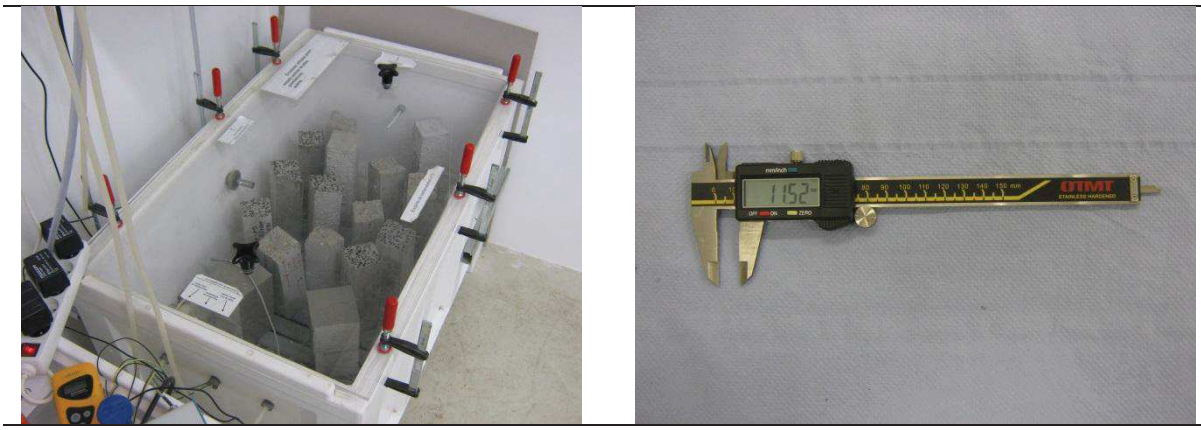
$$\rho_d = \frac{M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \rho_{eau} \tag{2-12}$$

$\boldsymbol{\rho_{eau}}$ masse volumique de l'eau à 20 ± 2 °C en kg/m^3

2.4.5.2 Carbonatation

L'essai de carbonatation accélérée consiste à suivre l'évolution de l'épaisseur carbonatée du béton sur des corps d'épreuve prismatiques 7*7*28 cm. Les éprouvettes sont antérieurement conservées pendant 28 jours dans une salle humide à une température de 20 °C et une humidité relative supérieure à 95 %. Les corps épreuves sont ensuite pré-conditionnés dans une ambiance contrôlée en température (20 ± 2 °C) et en humidité (65 ± 5 %) pendant 14 jours avant d'être placés dans l'enceinte de carbonatation (voir **Figure 2.19-a**). L'enceinte étanche et ventilé est

alimentée par un flux continu de dioxyde de carbone maintenu à 4 % à l'aide d'un analyseur. Aux échéances de 7 et 28 jours, les éprouvettes sont retirées de l'enceinte et sont cassées de façon à avoir une surface plane et fraiche sur laquelle la phénolphtaléine est pulvérisée. Les épaisseurs de la zone carbonatée qui reste incolore sont mesurées à l'aide d'un pied à coulisse (voir **Figure 2.19-b**) pour déterminer l'épaisseur du béton carbonaté.



(a) Enceinte de carbonatation *(b) Pied à coulisse*

Figure 2.19 Dispositif d'essai de carbonatation accélérée

2.4 Conclusion

La mise en œuvre de la méthode de composition qui va être développée au **Chapitre 3** nécessite la caractérisation des constituants, des mélanges granulaires et des bétons auto-plaçants légers. La méthode de composition proposée se distingue par la réduction de la demande en eau des granulats légers grâce au protocole d'absorption dans la pâte développé dans la thèse. L'essai d'absorption dans la pâte va permettre d'affiner la quantité d'eau absorbable par les granulats légers et donner une estimation de la teneur en eau efficace plus proche de celle dans le béton. Pour minimiser l'impact de cette problématique d'absorption sur l'ouvrabilité du béton, un protocole de pré-mouillage est proposé pour assurer un maintien de rhéologie satisfaisant aux bétons auto-plaçants légers formulés. La combinaison de l'essai d'absorption dans la pâte de ciment et de l'essai de pré-mouillage des granulats légers permettra d'améliorer la compacité du béton frais tout en assurant son caractère auto-plaçant.

Les bétons auto-plaçants légers vont être caractérisés avec des méthodes usuelles décrites et mais aussi par des méthodes spécifiques notamment pour définir leur aptitude à la ségrégation. La résistance à la ségrégation statique du béton frais sera mesurée à l'aide d'une colonne cylindrique pour définir in fine un indice de ségrégation. L'indice de ségrégation permettra de se positionner sur l'aptitude à la ségrégation du béton. Par ailleurs, la caractérisation de la teneur en air des bétons auto-plaçants légers sera réalisée à l'aide du « roll-a-meter » qui mesure la teneur en air du béton sans perturber l'air emprisonné dans le réseau poreux des granulats légers et permet de s'affranchir du biais induit par la présence d'air occlus dans les granulats poreux.

Chapitre 3

Mise au point d'un protocole d'absorption dans la pâte de ciment

Sommaire

3.1 Introduction..... 101

3.2 Absorption des granulats dans une matrice cimentaire..... 101

3.2.1 Protocole de mesure de l'absorption des granulats légers dans la pâte de ciment 102

3.2.1.1 Principe de la méthode..... 102

3.2.1.2 Mode opératoire..... 104

3.2.1.3 Calcul du coefficient d'absorption dans la pâte..... 106

3.2.1.4 Validation du protocole d'essai..... 107

3.2.2 Résultats et discussions 110

3.2.2.1 Absorption dans l'eau et dans la pâte de ciment entre un granulat léger et un granulat traditionnel 110

3.2.2.2 Evolution du rapport eau efficace/ciment dans une pâte en présence d'un granulat léger..... 112

3.2.2.3 Effet du rapport e/c sur l'absorption dans la pâte de ciment..... 113

3.2.2.4 Mécanisme à l'origine de la différence d'absorption dans les différentes pâtes 115

3.3 Effet du degré de saturation initiale sur la perte de maniabilité dans un mélange pâte/granulat 118

3.3.1 Constituants et méthodes 118

3.3.2 Composition des mélanges..... 119

3.3.3 Résultats et discussion 120

3.3.3.1 Effet de l'absorption sur la cinétique de diminution de l'étalement du mélange pâte/granulat..... 120

3.3.3.2 Effet du degré de saturation initiale sur l'absorption d'eau dans la pâte 122

3.4 Pré-saturation des granulats légers 124

3.4.1 Pré-mouillage des granulats légers..... 125

3.4.2 Teneur en eau des granulats pré-mouillés..... 125

3.4.3 Absorption dans la pâte des granulats pré-mouillés..... 126

3.5 Conclusion 127

3.1 Introduction

Les phénomènes de transfert d'eau de la matrice cimentaire vers les granulats légers au cours de la période dormante rendent difficile l'estimation de la teneur en eau efficace dans la composition des bétons légers. Au sens de la norme NF EN 206-1/CN, la teneur en eau efficace est la différence entre la quantité d'eau totale contenue dans le béton frais et la quantité d'eau absorbable par les granulats. L'eau absorbable est conventionnelle et se déduit du coefficient d'absorption des granulats selon la procédure décrite dans la norme NF EN 1097-6. Pour les granulats légers utilisés dans les bétons légers de structure, le coefficient d'absorption est compris entre 5 et 15 % (en masse) et la quantité d'eau absorbable est donc potentiellement importante. Par ailleurs, cette part assez significative d'eau absorbée par les granulats légers ne participe ni à l'ouvrabilité du béton ni à l'hydratation du ciment. Ceci résume bien la problématique dans la formulation des bétons légers.

La diminution de l'eau absorbée est d'un intérêt certain pour mieux contrôler les paramètres de composition des bétons légers. C'est pourquoi la norme ACI 213R-03 2003 recommande de pré-mouiller suffisamment les granulats légers (pour la plupart par immersion complète dans l'eau pendant au moins 24 heures) afin de minimiser la quantité d'eau absorbée dans le béton frais.

Un protocole a été mis au point pour quantifier l'eau absorbée par les granulats légers dans la pâte de ciment afin d'estimer avec plus de précision, la quantité d'eau absorbée par les granulats légers au cours du malaxage et durant la mise en place. La mise en œuvre de cet essai va permettre d'optimiser la demande en eau des granulats légers et d'affiner le calcul de la quantité d'eau efficace dans la composition des bétons auto-plaçants légers (BAPL).

Le programme expérimental présenté **au Chapitre 2** donne les caractéristiques des constituants, et des mélanges qui vont permettre de développer le protocole d'absorption dans la pâte.

3.2 Absorption des granulats dans une matrice cimentaire

Il existe dans la littérature très peu de travaux consacrés à l'absorption des granulats légers en présence de pâte. La synthèse bibliographique sur les méthodes de caractérisation des granulats légers a révélé que l'absorption est déterminée en présence d'eau et extrapolée à la pâte de ciment. Cette démarche conduit bien souvent dans le processus de formulation des bétons légers a une différence notable entre les données théoriques et les données réelles de la composition. Un protocole simple et pratique est proposé pour mesurer l'absorption du granulat dans la pâte de ciment. Cet essai va permettre in fine d'ajuster la demande en eau des granulats légers à partir du coefficient d'absorption dans la pâte de ciment à 1 heure pour la formulation des BAPL.

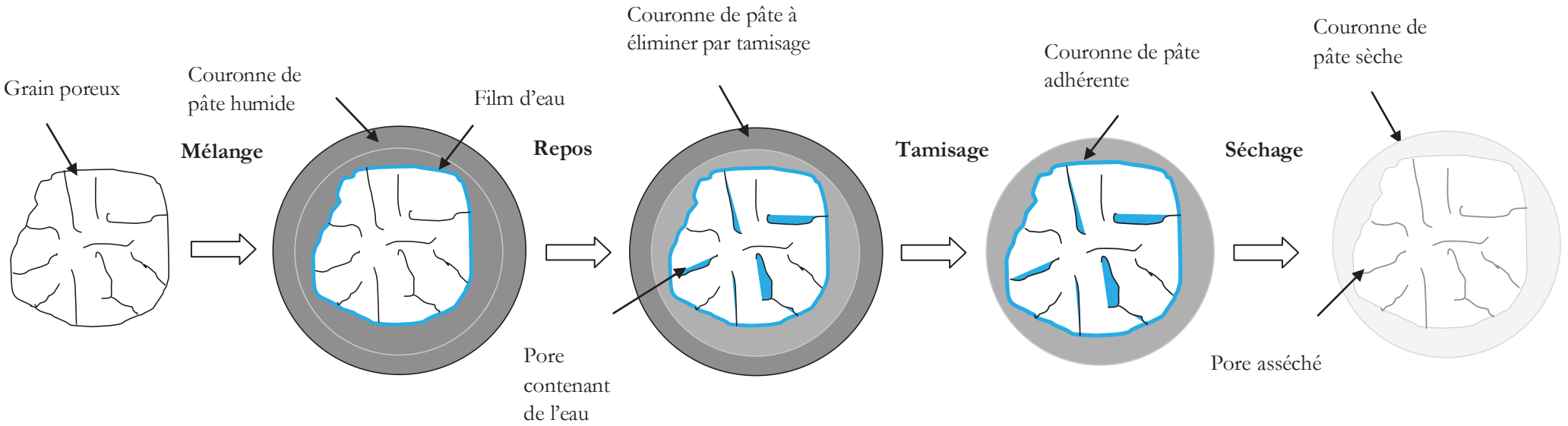
3.2.1 Protocole de mesure de l'absorption des granulats légers dans la pâte de ciment

3.2.1.1 Principe de la méthode

L'absorption d'un grain de granulat sec dans une pâte de ciment peut modifier la teneur en eau de la pâte qui l'entoure. Dans un mélange pâte/granulat, une partie de la pâte adhère aux grains et ne participe pas à la rhéologie selon le principe de la méthode du mortier de béton équivalent (MBE) développée dans le projet national (CALIBE 2000). Pour mémoire, la méthode MBE permet d'identifier une corrélation simple reliant les propriétés rhéologiques d'un béton au mortier qui le compose.

La pâte de ciment forme une couronne autour du grain et constitue le siège d'échange hydrique de la pâte vers le grain. La quantité de grains enrobés peut être obtenue de manière expérimentale par tamisage. La différence de masses entre l'état frais et l'état sec des grains enrobés permet d'estimer l'absorption du granulat dans la pâte au cours de la période dormante.

La **Figure 3.1** montre la représentation schématique des différents états par lesquels passe le granulat poreux au cours de l'essai. L'essai est réalisé sur des gravillons légers de diamètre ≥ 4 mm. Les gravillons partiellement saturés ou non (de masse M_0) sont mélangés manuellement avec une pâte de ciment préparée avec un rapport eau/ciment donné. Le mélange pâte/granulat est protégé de la dessiccation et laissé au repos pendant une durée inférieure au temps de prise estimé à 2 heures. A une échéance donnée de la période dormante, les grains enrobés de pâte fraîche et la pâte de ciment qui participent à la rhéologie sont mécaniquement séparés par tamisage. Les grains enrobés de pâte fraîche sont ensuite pesés avant (masse M_1) et après (masse M_2) un traitement thermique pour évaporer l'eau chimiquement liée.



(a) : Grain avec une teneur eau initiale donnée avant immersion dans la pâte (Masse M_0)

(b) : Grain enrobé d'un film d'eau dans la pâte au cours du malaxage

(c) : Grain gorgé d'eau durant la phase statique de la période dormante

(d) : Grain enrobé de pâte adhérente après le tamisage (Masse M_1)

(e) : Grain et pâte adhérente séchés après évaporation de l'eau chimiquement liée (Masse M_2)

Figure 3.1 États d'évolution d'un grain poreux dans un mélange pâte/granulat au cours de l'essai d'absorption dans la pâte de ciment

3.2.1.2 Mode opératoire

a) Matériaux

Ciment

Le ciment utilisé est le même que celui présenté dans le paragraphe 2.3.1.1 du **Chapitre 2**.

Granulat

Le granulat léger (LWA) utilisé pour la validation et la mise en œuvre du protocole est un granulat d'argile expansée (nommé ARG 4/8-750) dont les caractéristiques physiques sont précisées dans le **Paragraphe 2.2.3** du **Chapitre 2**. Pour tester la sensibilité du protocole d'essai vis-à-vis de la nature du granulat, un granulat naturel (NWA) est utilisé. Le granulat de masse volumique normale est d'origine alluvionnaire principalement siliceux. Il est constitué de grains concassés avec une étendue granulaire comprise entre 4 et 8 mm. Sa masse volumique réelle est de 2 590 kg/m^3 et son coefficient d'absorption dans l'eau à 24 heures est de 0,5 % (en masse).

b) Composition des mélanges pâte/granulat

Les essais de validation du protocole sont réalisés avec une pâte de ciment de rapport e/c de 0,40 et des granulats séchés à 105 °C jusqu'à masse constante. Le volume du granulat est maintenu constant à 0,21 litre.

La mise en œuvre du protocole d'essai pour suivre l'évolution de l'absorption dans différentes pâtes est réalisée sur des pâtes de rapport e/c compris entre 0,3 et 0,6. Pour préparer les mélanges pâte/granulat, le ratio volume de ciment/volume de granulat sec est maintenu constant d'un rapport e/c à l'autre. Le volume de granulat représente entre 51 et 76 % du volume de pâte dans les différents mélanges. La composition des mélanges pâte/granulat et les volumes de pâte sont précisés au **Tableau 3.1**.

Tableau 3.1
Composition des mélanges pâte/granulat

	E/C							
Constituants	0,3		0,4		0,5		0,6	
	Masse (g)	Volume (l)	Masse (g)	Volume (l)	Masse (g)	Volume (l)	Masse (g)	Volume (l)
Ciment	450	0,142	450	0,142	450	0,142	450	0,142
Eau	135	0,135	180	0,180	225	0,225	270	0,270
Granulat	265	0,210	265	0,210	265	0,210	265	0,210
Volume de pâte(l)	0,277		0,322		0,367		0,412	

c) Déroulement de l'essai

Mélange

Une prise d'essai de granulat est préalablement séchée et passée au tamis 4 mm puis déversée dans une pâte de ciment préparée et malaxée mécaniquement au moyen d'un malaxeur selon la procédure de la norme NF EN 196-1. Un malaxage manuel d'une minute permet d'homogénéiser le mélange pâte/granulat (phase d'absorption dynamique). Le mélange est ensuite conservé et mis au repos dans une ambiance régulée en température (20 ± 2 °C) et en humidité (65 ± 5 %) durant la phase d'absorption statique de la période dormante. Les éprouvettes sont recouvertes d'un film humide pour empêcher toute dessiccation de la pâte. Les échéances de 5, 15, 30, 60 et 120 minutes ont été retenues après des essais exploratoires pour l'analyse multi-échéances de l'absorption dans la pâte. L'instant initial est compté à partir de la fin du malaxage manuel du granulat et de la pâte.

Séparation mécanique par tamisage

Au terme d'une échéance donnée, le mélange pâte/granulat est remalaxé et soigneusement passé au tamis 4 mm pour séparer mécaniquement par tamisage les grains enrobés et la pâte de ciment. A l'issue du tamisage, on obtient en refus des grains enrobés de pâte (la pâte adhérente) et en passant, la pâte extraite (la pâte qui participe à la rhéologie). Le temps de séparation dure 3 minutes. La **Figure 3.2** schématise la séparation mécanique du mélange.

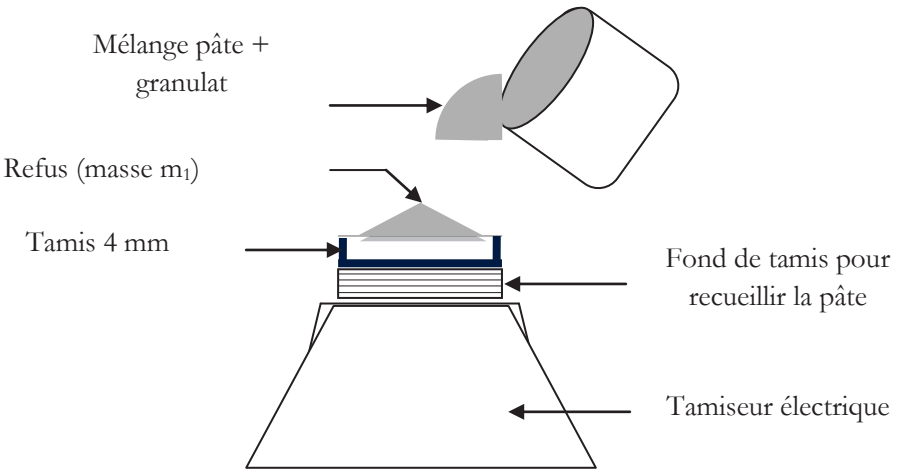


Figure 3.2 Schéma du protocole de séparation mécanique par tamisage des grains et de la pâte de ciment

Evaporation et pesées

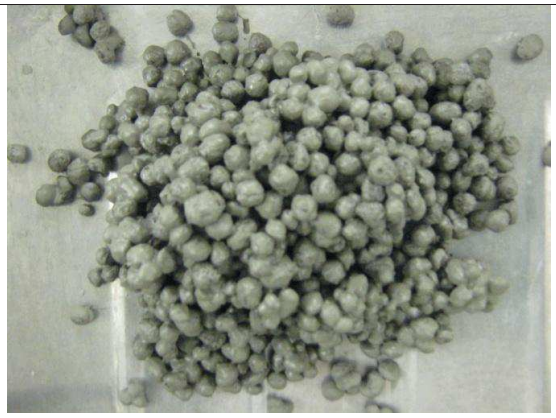
Les deux parties ainsi séparées sont pesées avant et après séchage à l'étuve jusqu'à masse constante à 105 ± 5 °C pour évaporer l'eau chimiquement liée. Par différence de pesées entre l'état frais et l'état sec, la quantité d'eau absorbée par le granulat à une échéance ≤ 2 heures et la teneur en eau de la pâte extraite peuvent être estimées. La **Figure 3.3** illustre le mode opératoire de l'essai.



a. Mélange pâte/granulat



b. Pâte extraite après tamisage



c. Grains enrobés de pâte après tamisage



d. Grains enrobés de pâte après séchage

Figure 3.3 Différents états du mélange au cours de l'essai d'absorption dans une pâte de ciment

3.2.1.3 Calcul du coefficient d'absorption dans la pâte

La maitrise des conditions d'essai et la minutie dans l'exécution du mode opératoire nous autorisent à négliger les erreurs dues à l'évaporation et à la perte de granulat. En supposant que la teneur en eau de la pâte adhérente est équivalente à la teneur en eau de la pâte extraite, le calcul du coefficient d'absorption peut être calculé.

Par définition

$$W_{gl}(t) = \frac{E_{gl}(t)}{M_0} \tag{3-1}$$

$E_{gl}(t)$ peut s'écrire :

$$E_{gl}(t) = (M_1 - M_2) - (M_2 - M_0)\frac{(E_0 - E_{gl}(t))}{C}$$

Après simplification et factorisation $E_{gl}(t)$ devient :

$$E_{gl}(t) = \frac{C(M_1 - M_2) - E_0(M_2 - M_0)}{C + M_0 - M_2} \quad (3\text{-}2)$$

Alors $W_{gl}(t)$ s'écrit

$$W_{gl}(t) = \frac{C(M_1 - M_2) - E_0(M_2 - M_0)}{M_0(C + M_0 - M_2)} \quad (3\text{-}3)$$

C dosage en ciment ;
M_0 masse de grains secs ;
M_1 masse de grains enrobés de pâte fraiche ;
M_2 masse de grains enrobés après séchage à l'étuve à 105 ± 5 °C jusqu'à masse constante ;
E_0 masse d'eau initiale ($t = 0$) dans la pâte ;
$E_{gl}(t)$ masse d'eau dans les granulats à un instant t ;
$W_{gl}(t)$ coefficient d'absorption des granulats légers à un instant t.

3.2.1.4 Validation du protocole d'essai

Une série d'essais a été réalisée pour valider le protocole d'absorption dans des conditions opératoires identiques et dans des intervalles de temps inférieurs à 2 heures. La validation du protocole à consister à l'étalonnage de l'essai à partir du granulat naturel (NWA) et à la vérification de sa répétabilité et de sa robustesse sur le granulat léger (LWA). Les granulats sont préalablement séchés jusqu'à masse constante à 105 ± 5 °C. La pâte de ciment est préparée à partir d'un ciment Portland avec un rapport e/c égal à 0,4.

a) Etalonnage de l'essai d'absorption dans la pâte de ciment

L'étalonnage est effectué sur un granulat naturel (NWA) et repose sur la comparaison du coefficient d'absorption dans l'eau déterminé selon la procédure standard et du coefficient d'absorption dans la pâte de ciment obtenu d'après le protocole décrit ci-dessus. Les mesures sont réalisées à 5, 15, 30, 60 et 120 minutes et pour chacune des échéances, deux mesures sont réalisées de façon similaire. Les valeurs moyennes des coefficients d'absorption sont présentées sur la **Figure 3.4**.

Les résultats indiquent que le coefficient d'absorption dans l'eau et le coefficient d'absorption dans la pâte de ciment coïncident quasiment pour ce type de matériau. Donc l'hypothèse de l'équivalence entre la teneur en eau de la pâte adhérente et celle de la pâte extraite semble justifiée.

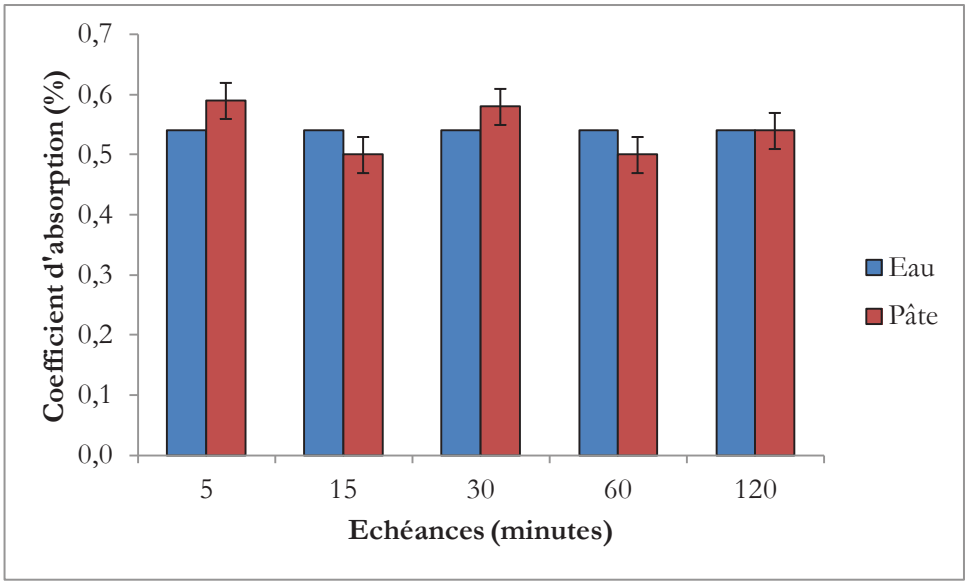


Figure 3.4 Absorption dans la pâte de ciment et dans l'eau pour un granulat de masse volumique normale

b) Répétabilité et robustesse du protocole d'essai

La validation consiste aussi à évaluer la fidélité de l'essai d'absorption dans la pâte de ciment du point de vue de sa répétabilité et de sa robustesse. Les essais sont réalisés sur le granulat léger d'argile expansée (LWA). Les mesures sont réalisées à 5, 15, 30, 60 et 120 minutes et pour chacune des échéances, six mesures sont réalisées de façon similaire. A l'issue de chaque échéance, l'absorption du granulat dans la pâte est déterminée. Les détails relatifs aux compositions réelles et aux résultats sont présentés au **Tableau 3.2**.

Tableau 3.2
Compositions réelles et absorptions dans la pâte de ciment à diverses échéances

Échéances (minutes)	N°	Données de composition réelle (g)			e/c	Granulats enrobés de pâte (refus)		
		C	E_0	M_0		M_1 (g)	M_2 (g)	W_{gl} (%)
5	1	450,2	180,0	265,1	0,4	355,1	322,7	4,1
	2	450,0	180,2	265,1		358,8	325,4	4,0
	3	450,0	180,1	265,0		362,5	327,5	4,4
	4	450,2	180,1	265,0		360,4	326,7	3,9
	5	450,2	180,0	265,1		352,7	320,8	4,1
	6	450,3	180,1	265,1		360,6	326,6	4,1
15	1	450,1	180,1	265,2		364,4	327,8	5,1
	2	450,1	180,0	265,1		363,3	327,4	4,8
	3	450,2	180,1	265,0		366,7	329,2	5,2
	4	450,1	180,0	265,0		366,2	329,1	5,0
	5	450,1	180,1	265,0		361,9	325,6	5,3
	6	450,2	180,1	265,1		361,2	325,4	5,1
30	1	450,0	180,2	265,0		368,7	330,4	5,3
	2	450,0	180,2	265,1		360,0	323,4	5,7
	3	450,1	180,1	265,1		366	327,5	5,9
	4	450,2	180,2	265,1		371,9	332,3	5,6
	5	450,2	180,1	265,1		359,5	323,3	5,6
	6	450,2	180,0	265,0		374,3	334,0	5,7
60	1	450,2	180,2	265,1		389,0	343,8	6,3
	2	450,1	180,2	265,0		367,3	327,5	6,5
	3	450,1	180,0	265,0		364,2	325,2	6,5
	4	450,1	180,2	265,1		369,3	329,0	6,5
	5	450,1	180,2	265,0		366,9	327,2	6,5
	6	450,1	180,1	265,1		376,6	333,9	6,8
120	1	450,3	180,2	265,1		387,2	341,0	7,2
	2	450,1	180,2	265,0		388,8	342,2	7,1
	3	450,2	180,2	265,2		383,2	338,0	7,2
	4	450,1	180,2	265,2		379,0	334,7	7,3
	5	450,1	180,2	265,0		378,7	334,2	7,5
	6	450,3	180,2	265,2		380,4	335,8	7,3

L'écart type sur l'ensemble des valeurs du coefficient d'absorption dans la pâte est de 0,2 % et le coefficient de variation est compris entre 2 et 4 %. Ces résultats témoignent de la répétabilité et de la robustesse de l'essai d'absorption dans la pâte de ciment.

La validation du protocole d'absorption dans la pâte va à présent permettre de décrire et de discuter de l'évolution du rapport e/c dans la pâte en présence de granulat poreux et de la cinétique d'absorption d'un granulat léger dans différentes pâtes.

3.2.2 Résultats et discussion

Cette partie présente les résultats de la mise en œuvre du protocole d'absorption sur pâte. Les granulats utilisés sont les mêmes que ceux présentés au **Paragraphe 3.2.1.2**. Les mesures sont réalisées aux échéances de 5, 15, 30, 60 et 120 minutes. Pour chaque intervalle de temps, l'essai est répété sur deux échantillons dans des conditions opératoires identiques. Les valeurs moyennes sont calculées pour la représentation graphique des résultats.

3.2.2.1 Absorption dans l'eau et dans la pâte de ciment entre un granulat léger et un granulat traditionnel

Le protocole d'absorption sur pâte va permettre de comparer l'absorption dans l'eau et l'absorption dans la pâte de ciment pour un granulat léger d'argile expansée (LWA) et un granulat naturel d'origine siliceuse (NWA). L'essai d'absorption dans la pâte de ciment est réalisé sur une pâte de rapport e/c égal 0,4 et selon le protocole présenté ci-dessus tandis que l'essai d'absorption dans l'eau est réalisé selon le mode opératoire de la norme NF EN 1097-6. Les valeurs moyennes d'absorption dans l'eau et dans la pâte de ciment sont présentées sur la **Figure 3.5**.

La comparaison entre les courbes d'absorption dans l'eau et dans la pâte pour chacun des granulats révèle des comportements différents selon la nature du granulat. Le granulat léger absorbe plus que le granulat naturel tant dans l'eau que dans la pâte du fait de leur porosité plus importante.

L'évolution de l'absorption dans l'eau est similaire à celle de l'absorption dans la pâte pour le granulat naturel (NWA). Ce comportement prévisible du granulat naturel se justifie par la très faible porosité du granulat. En revanche pour le granulat léger (NWA), l'évolution de l'absorption dans l'eau est différente de celle de l'absorption dans la pâte de ciment. Le granulat léger absorbe entre 20 et 25 % moins d'eau dans la pâte que dans l'eau dans les deux premières heures. Cette différence de comportement peut s'expliquer par la différence de viscosité apparente entre l'eau et la pâte de ciment.

La grande porosité du granulat léger engendre une forte absorption d'eau d'après (Swamy and Lambert 1981). Le coefficient d'absorption dans l'eau à 24 heures des granulats légers utilisés dans les bétons légers de structure est situé entre 5 % et 15 % en masse (Alexander et al. 2005). En revanche, la plupart des granulats naturels absorbent moins de 2 % (en masse) selon la norme ACI 213R-03 2003. Les observations faites par (Zhang and Gjørv 1991) sur quatre différents types de granulats d'argile expansée de même classe

granulaire 4/8 mm indiquent que pour ce type de granulat léger, la porosité ouverte peut être comprise entre 45 % et 55 % en volume.

La différence de comportement du granulat léger dans l'eau et dans la pâte de ciment a été auparavant soulignée par (Zhang and Gjørv 1992) et (Neville 1995) sans être quantifiée. Une enquête auprès des fabricants de granulat léger a révélé que la demande en eau des granulats légers pour un mélange stable est estimée à 75 % de l'absorption dans l'eau. Ces éléments de la littérature corroborent la pertinence de la prise en compte de l'absorption dans la pâte de ciment et démontrent l'utilité du protocole d'absorption proposé.

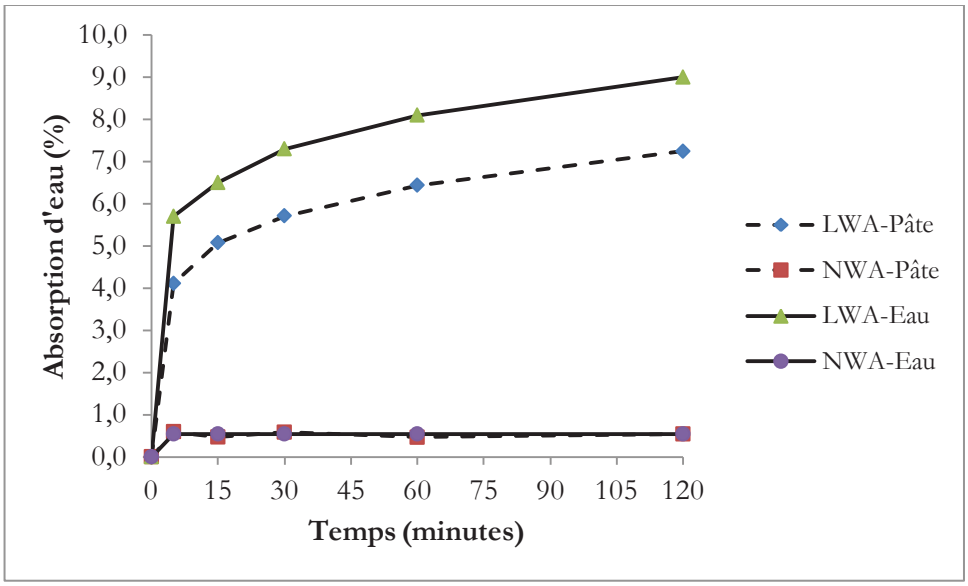


Figure 3.5 Absorption entre un granulat léger et un granulat traditionnel dans l'eau et dans une pâte de ciment

L'absorption en présence de pâte, soulève la question de savoir si c'est l'eau ou le mélange grains de ciment/eau qui est absorbé par les granulats poreux. (Zhang and Gjørv 1992) ont tenté de répondre à cette interrogation. Les auteurs ont mené des observations sur la pénétration des grains de ciment et de fumée de silice dans le réseau poreux d'un granulat d'argile expansée caractérisé par une absorption d'eau à 30 minutes de 12 %. Les pâtes sont réalisées avec un rapport eau/liant de 0,45 et 2,0. L'eau est remplacée par l'éthanol afin d'inhiber l'hydratation du liant. Sur la base d'images électro-rétrodiffusées, les auteurs rapportent qu'il n'y a quasiment ni grains de ciment ni fumée de silice dans les pores au cœur du granulat quel que soit le rapport eau/liant. En revanche, sur la coque du granulat léger, les auteurs ont observé la pénétration de grains de ciment et de fumée de silice. Ils ont conclu que la pénétration dans le réseau poreux périphérique dépend de la microstructure de la coque du granulat léger, de la distribution granulaire du liant et de la viscosité apparente de la pâte.

Les granulats légers peuvent être constitués d'une coque plus ou moins ouverte. Le granulat léger d'argile expansée ARG 4/8-750 est constitué de grains de forme quasi sphérique présentant une structure interne alvéolée entourée d'une coque peu poreuse avec une microstructure de surface de type 2 en référence à la classification proposée par (Ke 2008). Ce constat permet de négliger la pénétration de particules de ciment dans le réseau poreux du granulat léger dans nos évaluations.

3.2.2.2 Evolution du rapport eau efficace/ciment dans une pâte en présence d'un granulat léger

La prise en compte de l'eau absorbée par le granulat léger dans la pâte de ciment permet d'estimer le rapport e/c à une échéance donnée de la période dormante. En s'appuyant sur le protocole d'absorption dans la pâte, le rapport e/c dans la pâte à une échéance donnée peut être calculé connaissant les quantités initiales d'eau (E_0) et de ciment (C), l'absorption dans la pâte à une échéance donnée ($W_{gl}(t)$) et la masse initiale de granulat léger sec (M_0) selon la relation ci-après :

$$e/c\,(t)calculé = \frac{E_0 - W_{gl}(t) * M_0}{C} \qquad (3\text{-}4)$$

Les valeurs du rapport e/c calculé pour différentes pâtes sont présentées dans le **Tableau 3.3**.

Les résultats indiquent que l'absorption du granulat léger sec diminue d'environ 10 % le rapport e/c initial de la pâte et par conséquent la quantité d'eau efficace du mélange pâte/granulat. Cette diminution sera d'autant plus importante que la capacité d'absorption du granulat (coefficient d'absorption et volume partiel du granulat) sera élevée et le dosage en ciment plus faible.

Tableau 3.3
Evolution théorique du rapport eau efficace/ ciment dans un mélange pâte/ granulat d'argile expansée

Echéance (minutes)	Rapport e/c théorique			
0	0 ,3	0,4	0,5	0,6
5	0,28	0,38	0,47	0,57
15	0,27	0,37	0,46	0,57
30	0,27	0,37	0,46	0,56
60	0,27	0,36	0,46	0,56
120	0,26	0,36	0,46	0,55

Pour un rapport e/c initial faible, l'absorption du granulat léger peut conduire dans les 15 premières minutes à un rapport e/c atteignant la valeur stœchiométrique en dessous de laquelle la quasi-totalité de l'eau disponible dans la pâte sert à l'hydratation des grains de ciment au détriment de la maniabilité.

La comparaison de l'évolution du rapport eau efficace/ciment pour le granulat d'argile expansée et le granulat siliceux est présentée à la **Figure 3.6**. Les résultats montrent que le rapport e/c reste quasiment constant dans les 2 premières heures pour le granulat naturel tandis qu'il diminue graduellement pour le granulat léger.

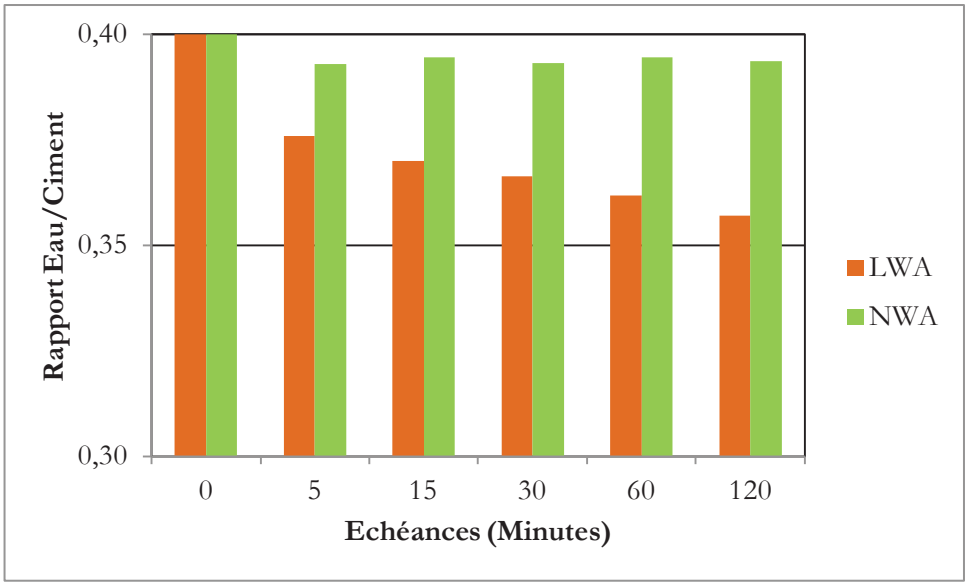


Figure 3.6 Evolution du rapport e/c calculé en fonction du type de granulats dans un mélange pâte/granulat

L'estimation de la quantité d'eau efficace nécessite la prise en compte de la cinétique d'absorption du granulat dans la pâte afin de permettre une bonne hydratation du ciment mais également d'améliorer l'ouvrabilité du mélange associé à un temps de maintien de rhéologie donné.

3.2.2.3 Effet du rapport e/c sur l'absorption dans la pâte de ciment

Les essais multi-échéances sont réalisés pour tracer l'évolution de l'absorption du granulat léger d'argile expansée dans différentes pâtes de ciment. Le **Tableau 3.4** présente un ensemble de résultats pour différents rapports e/c.

Tableau 3.4
Valeurs moyennes d'absorption

Temps (minutes)	Absorption dans l'eau (%)		Absorption dans la pâte (%)				
	NWA	LWA	e/c=0.3	e/c=0.4		e/c=0.5	e/c=0.6
			LWA	NWA	LWA	LWA	LWA
5	0,5	5,7	4,0	0,6	4,1	4,3	4,3
15	0,5	6,5	4,8	0,5	5,1	5,6	5,3
30	0,5	7,3	5,4	0,6	5,7	6,3	6,0
60	0,5	8,1	5,8	0,5	6,4	6,5	6,9
120	0,5	9,0	6,0	0,5	7,2	7,3	7,7

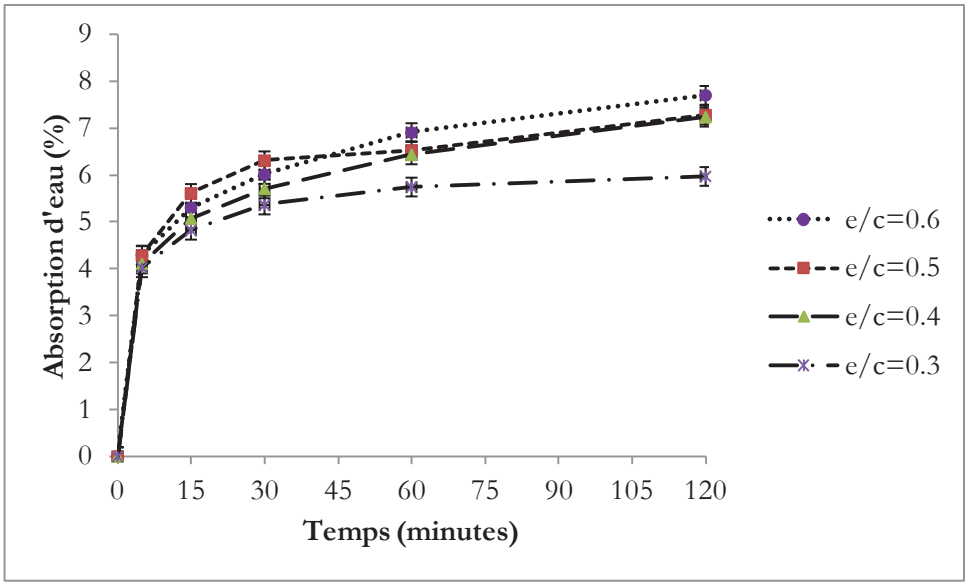


Figure 3.7 Evolution de l'absorption du granulat d'argile expansée en présence de pâte de différents rapports e/c

La **Figure 3.7** présente l'évolution de l'absorption dans les différentes pâtes de ciment. Ces résultats montrent que la cinétique d'absorption dans la pâte de ciment dépend du rapport e/c. Les courbes de rapports e/c de 0,4, 0,5 et 0,6 présentent un comportement à peu près similaire au regard de la variabilité de l'essai alors que la courbe de rapport e/c de 0,3 montre un comportement différent.

Les cinétiques d'absorption pour les différents rapports e/c se décomposent en trois régimes. Le premier se caractérise par une forte absorption dans la pâte au cours des 5 premières minutes y compris la phase du malaxage. La valeur de l'absorption se situe autour de 4 % pour les différents rapports e/c. Au cours de cette phase, le rapport e/c semble ne pas avoir d'influence sur l'absorption d'eau dans la pâte. Cette quantité d'eau correspond à priori à l'eau d'enrobage des grains. Le film d'eau autour des grains du granulat léger se forme durant la phase de malaxage et ce, quel que soit le rapport e/c. L'épaisseur de la couronne d'eau autour d'un grain peut être estimée en connaissant le diamètre moyen des grains et le coefficient d'absorption dans la pâte à 5 minutes. Le diamètre moyen d'un grain de forme supposée sphérique permet d'accéder à l'aire du grain tandis que le coefficient d'absorption dans la pâte permet de calculer le volume d'eau absorbée. En considérant un grain de forme sphérique de diamètre moyen 6,3 mm et un coefficient d'absorption à 5 minutes dans la pâte de 4 %, l'épaisseur du film d'eau autour d'un grain du granulat ARG 4/8-750 est d'environ 53 µm. Ce résultat est cohérent avec les observations au MEB des zones d'interfaces entre la pâte et un granulat léger (comparable en terme d'absorption au granulat ARG 4/8-750) réalisées par (Ke 2008).

Le deuxième régime se situe entre 5 et 30 minutes et se différencie par le ralentissement progressif de la cinétique d'absorption du granulat. Le granulat léger se comporte comme un système à vitesse d'absorption décroissante. Cette phase exprime la diminution de l'eau libre échangeable entre le granulat et la pâte. Les valeurs d'absorption pour les rapports e/c de 0,3, 0,4, 0,5 et 0,6 oscillent autour de 6 %.

Le troisième régime entre 30 et 120 minutes se traduit par une absorption relativement lente dans les différentes pâtes. Le paramètre dimensionnant devient la quantité d'eau échangeable entre la pâte et le granulat léger. Plus la fraction solide augmente plus la quantité d'eau fixée par les grains de ciment est importante. L'absorption se poursuit très lentement dans les pâtes de rapports e/c de 0,4, 0,5 et 0,6 avec une vitesse non nulle. En revanche pour le rapport e/c de 0,3, l'absorption s'arrête après 30 minutes puisque l'eau libre se raréfie dans la pâte du fait du raidissement de la pâte.

L'absorption du granulat léger dans la pâte au-delà de 120 minutes va être limitée par le processus d'hydratation qui devient prépondérant tandis que l'absorption dans l'eau mesurée selon la norme NF EN 1097-6 se poursuit et peut atteindre une valeur asymptotique de 29 % (en masse) au bout de 240 jours à pression ambiante.

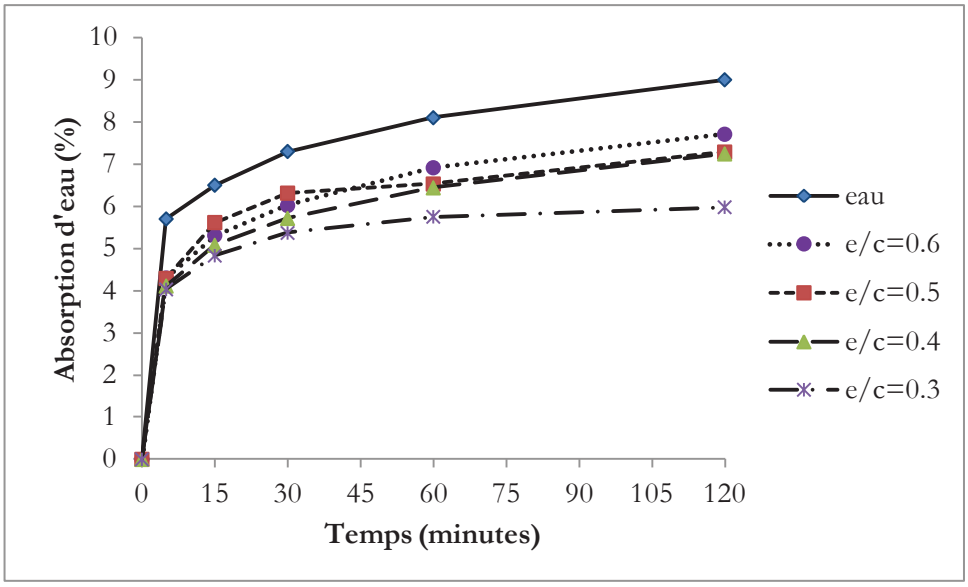


Figure 3.8 Evolution de l'absorption d'un granulat léger en présence de pâte de différents rapports e/c

La **Figure 3.8** montre qu'après 1 heure dans la pâte de ciment, l'absorption du granulat léger n'évolue quasiment plus quel que soit le rapport e/c alors que dans l'eau l'absorption du granulat léger se poursuit puisqu'elle ne représente que 30 % de sa saturation totale. L'absorption à 1heure dans la pâte semble être donc un bon compromis pour caractériser un granulat poreux.

3.2.2.4 Mécanisme à l'origine de la différence d'absorption dans les différentes pâtes

a) Quantité d'eau libre et l'absorption du granulat léger dans la pâte

L'eau de gâchage de la pâte de ciment se répartie en eau liée aux grains de ciment et en eau libre occupant l'espace intergranulaire. L'eau liée se compose de l'eau de mouillage des grains et de l'eau piégée dans les agglomérats de la pâte non adjuvantée.

Dans un mélange pâte/granulat léger, le granulat est approvisionné en eau par capillarité. L'eau susceptible d'être absorbée provient principalement de la source d'eau libre qui forme un film

autour des grains du granulat. Tant que l'eau libre reste disponible et que les pores du granulat léger ne sont pas remplis, le transfert d'eau de la pâte vers le granulat se poursuit. C'est ce qu'on observe dans les 5 premières minutes de la phase dormante où le film d'eau alimente le granulat sec quel que soit le rapport e /c.

A contrario, lorsque l'eau libre se raréfie soit du fait de la réduction du rapport e/c soit du fait de l'absorption du granulat, l'alimentation en eau du granulat léger diminue à vitesse décroissante. C'est le cas dans les pâtes de rapport e/c de 0,4, 0,5 et 0,6 où le granulat continue de capter une partie de l'eau libre durant les 2 premières heures. De plus, lorsque la pâte n'est plus capable d'approvisionner le granulat, l'absorption s'arrête. Le raidissement de la pâte réduit l'accessibilité de l'eau libre et limite la quantité d'eau échangeable entre la pâte et le granulat. C'est le cas dans la pâte de rapport e/c de 0,3 où l'absorption devient nulle au bout de 30 minutes. Le **Tableau 3.4** indique un rapport e/c à 30 minutes de 0,27. Dans de tel système, la quantité d'eau disponible au cœur de la pâte atteint le seuil stœchiométrique en deçà duquel l'eau dans la pâte sert essentiellement à hydrater les grains de ciment.

b) Conséquence de la diminution du volume de pâte du fait de l'absorption

La traduction macroscopique de la réduction de la quantité d'eau libre du fait de l'absorption du granulat est l'accroissement de la viscosité apparente de la pâte. D'un point de vue rhéologique, la diminution de la quantité d'eau échangeable se traduit par une concentration solide plus importante et un accroissement plus marqué de la viscosité apparente de la pâte au cours de la phase dormante comme sur la **Figure 3.9** tirée des travaux de (Sun et al. 2005). Cette figure montre l'accroissement de la viscosité de trois pâtes de ciment (avec un rapport eau/ciment de 0,4, 0,5 et 0,6) pour différents temps de consolidation (1/4, 1/2, 1, 2, 3 et 4 heures). Ces résultats indiquent un accroissement significatif de la viscosité au très jeune âge (après 15 minutes) pour le rapport eau/ciment de 0,4 et après 1 heure pour les rapports eau/ciment de 0,5 et 0,6. L'augmentation de la concentration de matière solide avec la diminution du rapport e/c densifie la suspension et entraîne un accroissement de la viscosité apparente de la pâte de ciment.

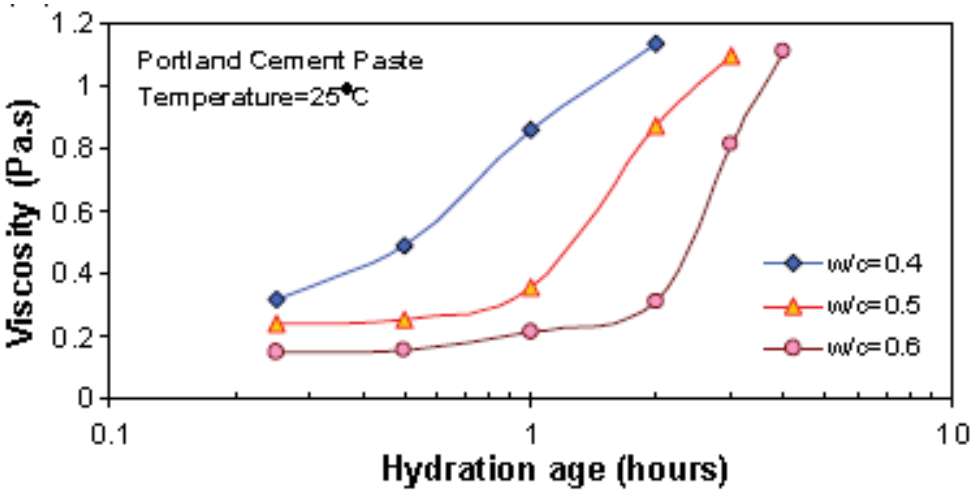


Figure 3.9 Evolution de la viscosité apparente de différentes pâtes de ciment Portland (Sun et al. 2005)

L'estimation de l'absorption du granulat léger dans la pâte de ciment va permettre d'estimer la diminution du volume de pâte et par ricochet, l'augmentation de la concentration solide au cours de la période dormante dans les différents systèmes. La diminution du volume de pâte engendrée par l'absorption du granulat léger est calculée en se basant sur les données du **Tableau 3.5**. La viscosité du mélange pâte/granulat μ_a peut être décrite par le modèle simplifié pâte/granulat proposé par de (Bernier 2009) et dont l'expression est donnée par la relation suivante :

$$\mu_a = \frac{19{,}8}{1-\left(1-\frac{\omega_c}{\alpha_c}\right)^{1{,}08}} * \frac{1}{1-\frac{g}{g^*}} \qquad (3\text{-}5)$$

ω_c concentration du ciment dans la pâte ;
α_c compacité du ciment ;
g proportion volumique de granulat dans un volume unité du mélange ;
g^* compacité du granulat déterminé à partir de l'essai de la table à secousses.

La **Figure 3.10** présente l'évolution de la viscosité apparente du mélange pâte/granulat en fonction de la concentration solide (inversement proportionnelle à la diminution du volume de pâte). Les résultats indiquent que la viscosité apparente augmente lorsque la concentration solide augmente du fait de l'absorption du granulat léger. L'augmentation de la viscosité apparente peut engendrer une diminution de l'ouvrabilité du mélange. Ce phénomène s'accentue entre 0 et 120 minutes surtout dans le mélange de rapport e/c de 0,3.

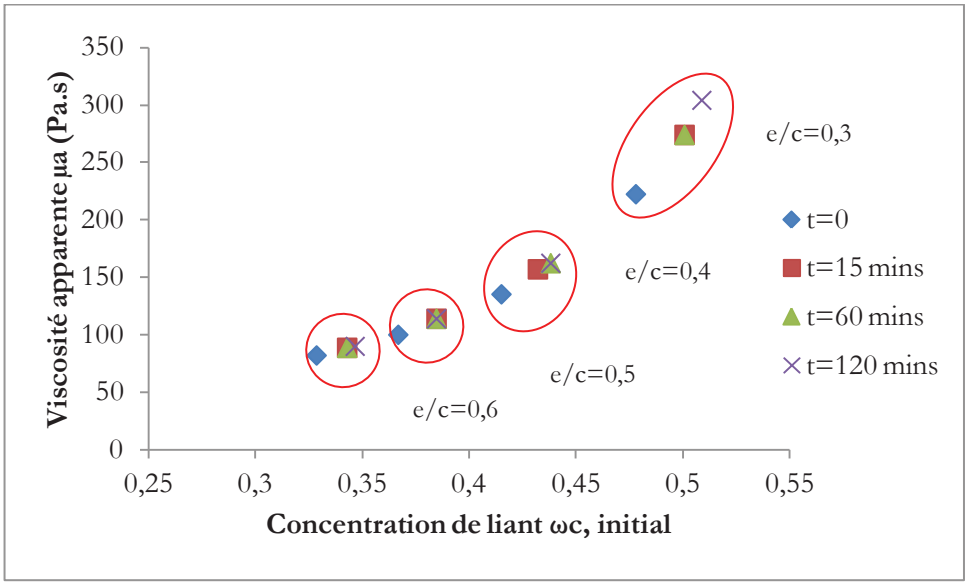


Figure 3.10 Evolution de la viscosité apparente du mélange pâte/granulat en fonction de la concentration solide pour différents rapports e/c

c) Conclusion

En somme, la variable d'ajustement dans le transfert d'eau de la pâte vers le granulat est l'eau libre échangeable. L'absorption du granulat léger dans la pâte de ciment dépend de la disponibilité de l'eau libre et de la vitesse de raidissement. Dans les systèmes de rapport e/c de 0,4, 0,5 et 0,6, l'absorption d'eau pour ce type de granulat léger évolue à vitesse décroissante jusqu'à 2 heures tandis que dans le système de rapport e/c de 0,3, la vitesse d'absorption devient nulle après 30 minutes. Le phénomène de raidissement de la pâte résulte de l'action combinée de l'absorption du granulat léger et du phénomène d'hydratation comme l'a constaté également (Belin et al 2013) dans ses travaux sur l'absorption des granulats recyclés. L'absorption du granulat provoque une diminution du volume de pâte et un accroissement de la concentration solide comme nous l'avons montré au **Paragraphe 3.3**. A l'échelle macroscopique, le raidissement précoce de la pâte du fait de l'absorption du granulat à des conséquences en termes d'ouvrabilité et de maintien de rhéologie du mélange.

Pour tenter de contrôler l'effet de l'absorption sur le raidissement précoce de la pâte, l'étude de l'effet du degré de saturation initiale du granulat sur l'étalement et le maintien de rhéologie du mélange pâte/granulat a été entreprise. Le développement et les résultats de cette étude sont présentés dans le paragraphe suivant.

3.3 Effet du degré de saturation initial sur la perte de maniabilité dans un mélange pâte/granulat

La présence d'un granulat poreux sec dans la pâte de ciment modifie non seulement le rapport e/c mais aussi réduit le volume du mélange en enlevant de l'eau à la pâte au cours de la période dormante. Ce transfert d'eau de la pâte vers le granulat provoque un raidissement précoce préjudiciable à la mise en œuvre du matériau. Dans le cas des bétons auto-plaçants légers (BAPL), ce phénomène peut contrarier le caractère auto-plaçant du béton et limiter l'aptitude au remplissage du matériau.

Les essais visent à faire le lien entre la diminution de volume de pâte et l'étalement tout en mettant en avant, l'effet du degré de saturation initiale du granulat sur l'étalement initial et le maintien de rhéologie du mélange. Cette campagne d'essais va permettre d'aborder entre autres:

- l'effet de l'absorption sur la cinétique de diminution de l'étalement ;
- l'effet du degré de saturation sur l'absorption dans la pâte de ciment ;
- l'effet du pré-mouillage sur l'étalement.

3.3.1 Constituants et méthodes

Les essais sont réalisés sur deux types de mélange pâte/granulat dont l'un est constitué de granulat léger d'argile expansée et l'autre de granulat naturel siliceux. La pâte de ciment est préparée selon la procédure de la norme NF EN 196-1 avec un rapport e/c égal à 0,5. Il est important de signaler que les mélanges sont réalisés à volume de pâte initial constant. Trois états de saturation du granulat léger sont expérimentés :

- l'état sec obtenu après séchage à l'étuve à 105 ± 5 °C jusqu'à masse constante;
- l'état saturé sec en surface après immersion dans l'eau à pression atmosphérique pendant 5 minutes ;
- l'état saturé sec en surface après une immersion dans l'eau sous vide à pression constante de 50 mbar pendant 72 heures.

La teneur en eau du granulat pour chacun des états de saturation est déterminée sur cinq éprouvettes à l'issue du conditionnement des granulats. La moyenne de la teneur eau correspondant aux états de saturation sus-cités est respectivement de 0 % ; 5,7 % et 30,1 % (en masse).

L'étalement au cône MBE du mélange pâte/granulat est mesuré à différentes échéances pour les deux types de granulats selon le même mode opératoire. Pour chaque échéance, l'essai est répété deux fois. Les premières mesures d'étalement sont effectuées après les 3 minutes de mise en place du dispositif de mesure. Les résultats sont exprimés en étalement relatif (Γ) d'après l'expression ci-dessous.

$$\Gamma = (\frac{d}{d_0})^2 - 1 \qquad (3\text{-}6)$$

d diamètre moyen de la galette au cône MBE
d_0 diamètre de base du cône MBE. Sa valeur est prise égale à 100 mm.

3.3.2 Composition des mélanges

Les mélanges sont élaborés selon un mode opératoire identique à celui du **Paragraphe 3.2.1.2**. Le **Tableau 3.5** donne la composition des mélanges pâte/granulat.

Tableau 3.5
Composition initiale des mélanges pâte/granulat

Constituants	Rapport e/c = 0,5			
	LWA			NWA
	Teneur en eau			
	0,0	5,7%	30,1	0,0
Ciment (g)	450	450	450	450
Eau (g)	225	225	225	225
Granulat sec (g)	265	-	-	525
Granulat humide (g)	-	280	345	-
Proportion volumique de granulat (%)	34	34	34	34

3.3.3 Résultats et discussion

3.3.3.1 Effet de l'absorption sur la cinétique de diminution de l'étalement du mélange pâte/granulat

Le transfert d'eau de la pâte fraîche vers le granulat léger est à l'origine du raidissement précoce dans le béton léger. Pour cerner davantage ce phénomène, l'évolution de l'étalement du mélange pâte/granulat dans les 2 premières heures de la période dormante est tracée sur la **Figure 3.11**. Les valeurs moyennes d'étalement sont présentées dans le **Tableau 3.6**. Les résultats montrent une différence de comportement entre le système de granulat naturel (NWA) et les systèmes de granulat léger (LWA).

Tableau 3.6
Evolution de l'étalement du mélange pâte/granulat pour deux types de granulats

Echéances (Minutes)	Etalement du mélange pâte/granulat							
	LWA						NWA	
	Teneur en eau (% massique)							
	30,0		5,7		0		0	
	Etalement moyen (mm)	Etalement relatif	Etalement moyen (mm)	Etalement relatif	Etalement moyen (mm)	Etalement relatif	Etalement moyen (mm)	Etalement relatif
0	318	9.1	289	7.4	277	6.7	185	2.4
5	318	9.1	287	7.2	257	5.6	177	2.1
15	313	8.8	273	6.5	250	5.2	171	1.9
30	308	8.5	277	6.7	225	4.1	165	1.7
60	313	8.8	263	5.9	219	3.8	161	1.6
120	287	7.2	250	5.3	186	2.5	140	1.0

a) Comportement du système avec le granulat naturel

La courbe d'étalement du granulat naturel (NWA) montre une diminution assez lente qui s'explique par le raidissement naturel induit par le phénomène d'hydratation de la pâte de ciment. L'étalement relatif évolue de façon linéaire en fonction du temps et passe graduellement de 2,4 à 1,0 au bout de 2 heures.

La comparaison entre les différents systèmes indique que l'étalement relatif du mélange avec du granulat naturel est inférieur à ceux des mélanges contenant du granulat léger (LWA) sans doute à cause de la différence de masse volumique et du facteur de forme entre les deux types de granulat. La légèreté du granulat favorise l'entrainement du granulat par la pâte de ciment (l'énergie cinétique du système augmente lorsque l'énergie potentielle augmente à énergie totale constante) et les grains ronds développent des forces de friction moins importantes que celles des grains concassés.

b) Comportement des systèmes avec le granulat léger

L'analyse des courbes d'étalement des mélanges contenant du granulat léger indique que les mélanges contenant du granulat léger à 5,7 % et à 0 % de teneur en eau initiale présentent un étalement relatif initial similaire autour 7. Par contre, l'étalement initial du mélange contenant du

granulat léger à 30,0 % de teneur en eau initiale se situe autour de 9 et se retrouve bien supérieur à celui des deux systèmes précédents. Ce résultat peut s'expliquer par un transfert d'eau du granulat léger vers la pâte.

Dans les systèmes contenant du granulat léger avec 5,7 et 30,0 % de teneur en eau initiale, la cinétique de diminution de l'étalement est semblable à celle du granulat naturel. En revanche, la cinétique de diminution est plus importante dans le système contenant du granulat léger à 0 % de teneur en eau initiale avec une diminution de l'étalement très marquée dans les 30 premières minutes (**Figures 3.11** et **3.12**).

Afin de mieux expliquer ces évolutions d'étalement, des essais d'absorption sur pâte ont été réalisés sur des compositions similaires. A priori, l'absorption d'eau par le granulat devrait conduire par le biais de la réduction du volume de pâte et du rapport e/c à une réduction de l'étalement alors qu'un largage d'eau du granulat vers la pâte contribuerait par des mécanismes inverses et donc à une augmentation de l'étalement.

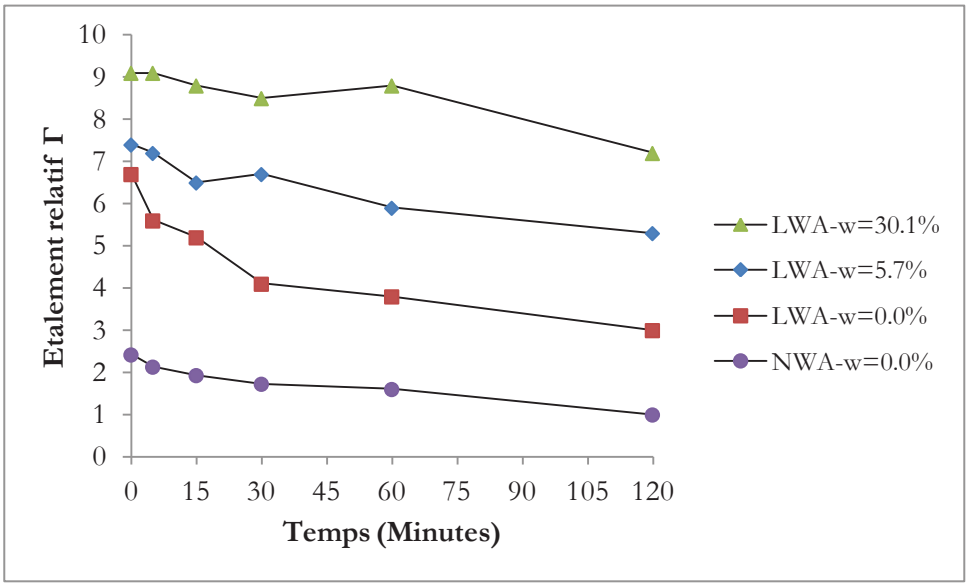
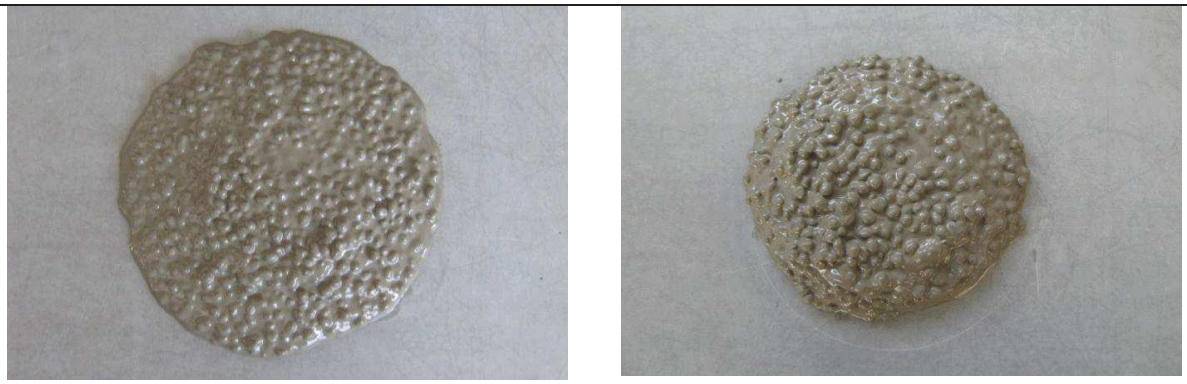


Figure 3.11 Evolution de l'étalement relatif au mini-cône d'un LWA de différents degrés de saturation initiale et d'un NWA témoin de E/C=0.5



Étalement initial | *Étalement après 2h*

Figure 3.12 Illustration de l'évolution de l'étalement à cône MBE d'une pâte incorporant des granulats légers secs

3.3.3.2 Effet du degré de saturation initial sur l'absorption d'eau dans la pâte

L'objectif est d'identifier la teneur en eau initiale qui permettrait d'une part de limiter l'absorption dans la pâte et d'autre part de stabiliser l'étalement du mélange pâte/granulat dans les premières heures. L'essai d'absorption dans une pâte de ciment de rapport e/c de 0,5 est réalisé sur les granulats d'argile expansée (LWA) de mêmes de degrés de saturation initiale que ceux dans l'essai d'étalement avec des teneurs en eau initiale respectives de 0 % ; 5,7 % et 30,1 %. La composition des mélanges est identique à celle présentée au **Tableau 3.5**. L'essai d'absorption dans la pâte de ciment est réalisé selon le mode opératoire décrit au **Paragraphe 3.2**. Connaissant la teneur en eau initiale du granulat (w) et la masse initiale de granulat pré-saturé (M_0), l'absorption du granulat notée W_{gl} à une échéance donnée t est obtenue par la relation suivante:

$$W_{gl}(t) = \frac{C(M_1 - M_2) - E_0(M_2 - \frac{M_0}{1+w})}{M_0(C + \frac{M_0}{1+w} - M_2)} - w \qquad (3\text{-}7)$$

Les valeurs moyennes d'absorption obtenues sur deux échantillons à chaque échéance sont présentées au **Tableau 3.7**. Rappelons qu'une absorption négative signifie une restitution ou un transfert d'eau du granulat vers la pâte de ciment. Les résultats sont représentés à la **Figure 3.13**.

Tableau 3.7
Valeurs moyennes d'étalement et d'absorption dans une pâte de rapport e/c de 0,5 pour différents degrés de saturation initiale

Echéances (minutes)	LWA avec une teneur en eau initiale de 30,1%		LWA avec une teneur en eau initiale de 5,7 %		LWA avec une teneur en eau initiale de 0 %	
	Etalement (mm)	Absorption (%)	Etalement (mm)	Absorption (%)	Etalement (mm)	Absorption (%)
0	318	0	289	0	277	0
5	318	- 4,9	287	-0,6	257	4,3
15	313	-5,1	273	0,3	250	5,6
30	308	-5,6	277	1,6	225	6,3
60	313	-4,6	263	1,5	219	6,5
120	287	-4,5	250	2,2	186	7,3

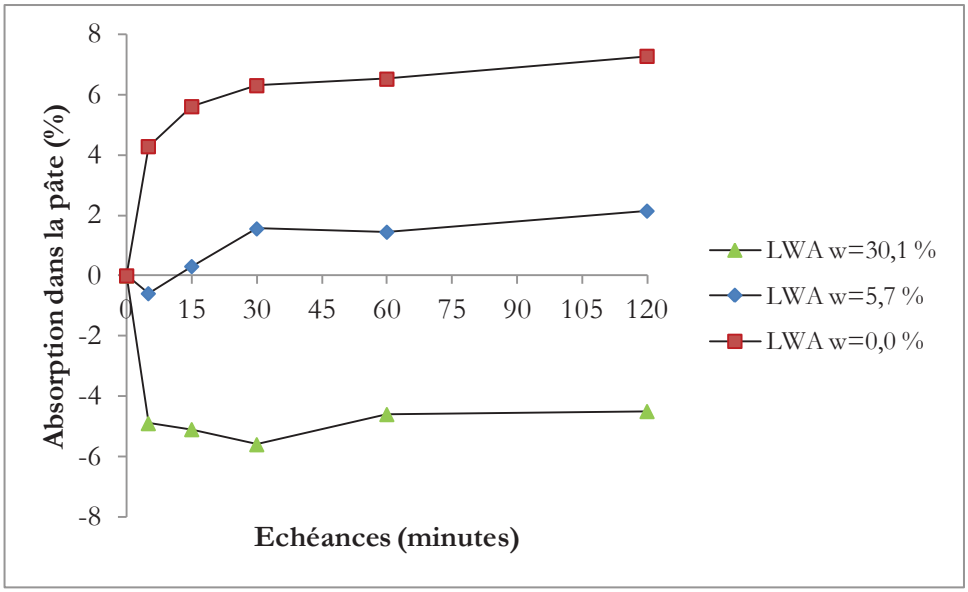


Figure 3.13 Absorption dans la pâte de ciment du granulat LWA avec différents degrés de saturation initiale

Le granulat léger ayant une teneur en eau initiale de 30,1 % avec une surface sèche a un comportement singulier dans le sens où il largue initialement de l'eau dans la pâte à hauteur de 5 % de sa masse sèche. Ce phénomène de relargage s'interrompt après approximativement 5 minutes. Cela va se traduire par une augmentation du volume de pâte de 3 % environ et une augmentation du rapport eau/ciment efficace de 0,50 à 0,53. Ces deux phénomènes sont à l'origine de l'étalement initial plus important (de l'ordre de 10 %, soit 9 au lieu de 8 d'étalement relatif) pour cet état de saturation en comparaison avec les granulats initialement secs ou à 5,7 % de teneur en eau à l'état sec en surface. Un comportement similaire a été observé dans la thèse de (Zhao 2014). Ces travaux ont montré qu'une augmentation du volume pâte de 24 % par ajout d'eau de gâchage conduit à une augmentation de l'étalement de 62 % soit à peu près dans le même rapport que nos résultats. Il convient ici de remarquer que ce matériau poreux et absorbant qui est proche de l'état de saturation totale avec une surface sèche est susceptible de larguer vers la pâte de l'ordre de 20 % de sa teneur en eau initiale.

Les granulats légers secs et à 5,7 % de teneur en eau à l'état sec en surface vont présenter un comportement absorbant vis-à-vis de la pâte avec toutefois des amplitudes et des cinétiques différentes. Le granulat initialement sec à des valeurs d'absorption respectivement de 4,3 % à 5 minutes et 6,3 % à 30 minutes alors que le granulat à l'état sec en surface de 5,7 % de teneur en eau à une absorption quasi-nulle à 5 minutes et une absorption de 1,6 % à 30 minutes. Au-delà de 30 minutes, l'absorption évolue peu pour les deux granulats. Les plus faibles valeurs d'absorption pour le granulat de teneur en eau 5,7% sont à corréler à une faible évolution de l'affaissement du mélange constaté pour ce matériau durant les 30 premières minutes (10 % de perte). L'absorption dans ce cas semble avoir peu d'impact sur la perte d'affaissement. Il n'en est pas de même pour le granulat initialement sec. Il est observé pour ce mélange, une perte d'affaissement de 40 % à 30 minutes pour une réduction de volume de pâte due à la quantité d'eau absorbée de 4 % et un rapport eau/ciment qui passe de 0,5 à 0,46. Un comportement similaire a été observé dans la thèse de (Zhao 2014) : pour un mortier de sable recyclé de rapport e/c de 0,6 où une diminution de 5 % du volume de pâte provoque une réduction de 8,5 % de l'affaissement.

Il est crucial pour optimiser la composition des bétons auto-plaçants légers (BAPL) de définir la teneur en eau initiale devant permettre de stabiliser l'absorption du granulat léger tout en préservant le caractère auto-plaçant du matériau. L'interaction entre l'étalement et l'absorption dans la pâte de ciment est représentée à la **Figure 3.14**. Ce résultat montre que le système avec le granulat de teneur en eau de 30,1 % enrichit la pâte d'eau tandis que le système avec le granulat sec de teneur en eau 0 % l'appauvrit en réduisant de façon significative l'étalement du mélange. En revanche, le système contenant le granulat de teneur en eau de 5,7 % montre une diminution progressive et une stabilisation de l'étalement dans la première heure. Ce système garde une absorption résiduelle qui peut favoriser l'adhérence pâte/granulat et in fine améliorer les propriétés à l'interface pâte/granulat.

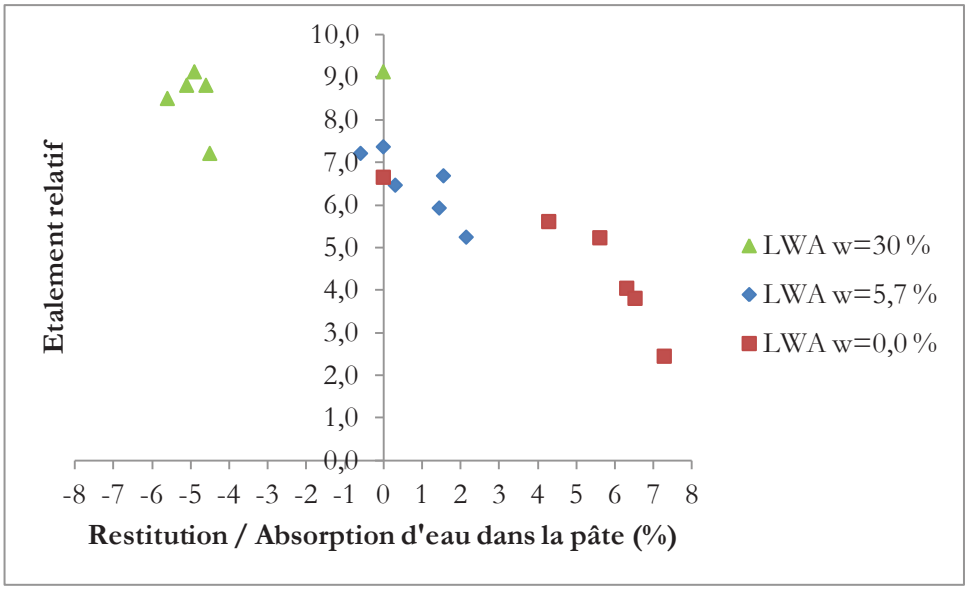


Figure 3.14 Interaction entre l'absorption et l'étalement sur le granulat léger LWA et le granulat naturel NWA

Ces résultats valident une fois de plus la robustesse du protocole d'essai dans la pâte. Ce protocole devient un outil capable de quantifier non seulement l'eau absorbée dans la pâte de ciment mais également d'estimer la quantité d'eau apportée à la pâte de ciment dans le cas de granulats complètement saturés ou des granulats avec une surface humide.

3.4 Pré-saturation des granulats légers utilisés dans le béton

L'objectif de la pré-saturation est d'amener le matériau à une teneur eau initiale proche de l'absorption dans l'eau à 24 heures de sorte que l'absorption à 1 heure du granulat pré-mouillé dans une pâte de rapport e/c de 0,5 n'excède pas les 2 % généralement admis comme la limite supérieure d'absorption des granulats de masse volumique normale.

3.4.1 Pré-mouillage des granulats légers

Des essais préliminaires sur différents dosages en eau de mouillage ont montré que le pré-mouillage à 5 minutes à partir d'une quantité d'eau correspondant à l'absorption dans l'eau à 24 heures permet d'être proche de cet objectif. Au-delà, le pré-mouillage conduirait à une teneur en eau initiale élevée et à une quantité d'eau d'apport excessive susceptible d'entrainer un transfert d'eau du granulat vers la pâte comme dans le cas du mélange pâte/granulat contenant du granulat à 30,1 % (**Paragraphe 3.3**). Un excès d'eau augmenterait certainement les incertitudes sur les paramètres de composition tels que le rapport E_{eff}/L et la masse volumique réelle du béton léger.

Il est important de souligner qu'à l'issue du pré-mouillage, les granulats pré-mouillés ont une surface humide avec une absorption volumique et une teneur en eau de surface. La teneur en eau de surface exprime le rapport de la différence de masse entre l'état humide et l'état saturé sec en surface sur la masse sèche. La teneur en eau de surface est de 4 % pour le granulat d'argile expansée (ARG 4/8-750) et de 2 **%** pour le granulat d'ardoise expansée (SCH 4/8-780).

Le pré-mouillage à 5 minutes va donc limiter le raidissement précoce (avec des grains à surface humide) tout en laissant un degré de liberté pour une absorption volumique dans la pâte de ciment puisque l'absorption volumique à l'issue du pré-mouillage reste toujours inférieure à l'absorption à 24 heures. L'intérêt du pré-mouillage à 5 minutes est donc double. Il s'impose comme un compromis entre un degré de saturation initiale qui participe à l'auto-plaçance du béton et une absorption résiduelle qui améliore les propriétés de l'interface pâte/granulat.

3.4.2 Teneur en eau des granulats pré-mouillés

L'essai de pré-mouillage est réalisé selon le mode opératoire décrit au **Chapitre 2**. Rappelons que le pré-mouillage vise une teneur en eau initiale proche du coefficient d'absorption à 24 heures sur des granulats légers préalablement séchés à 105 °C jusqu'à masse constante. Le détail des résultats du pré-mouillage réalisé sur les granulats d'argile expansée (ARG 4/8-750) et d'ardoise expansée (SCH 4/8-780) est présenté au **Tableau 3-8**.

Tableau 3.8
Pré-mouillage des gravillons légers

Pré-mouillage				
	ARG 4/8-750		SCH 4/8-780	
	1	2	1	2
Coefficient d'absorption à 24 h (%)	12,8	12,8	7,6	7,6
Masse de granulat sec (g)	3 000	3 000	3 000	3 000
Masse d'eau ajoutée (g)	384	384	228	228
Détermination de la teneur en eau				
Masse sèche (g)	270	314	301	370
Masse humide (g)	299,9	350,3	321,5	393,4
Teneur en eau (%)	11,1	11,6	6,8	6,3

Les teneurs en eau moyennes sont de 11,3 % et 6,5 % respectivement pour le granulat d'argile expansée (ARG 4/8-750) et le granulat d'ardoise expansée (SCH 4/8-780). Ces résultats montrent qu'on n'est pas loin de l'objectif visé de 12,8 % et 7,6 % respectivement.

Il est important de souligner que la teneur en eau du granulat pré-mouillé comprend l'absorption volumique et la teneur en eau de surface. Par conséquent, la teneur en eau des granulats pré-mouillés ne peut donc pas être comparée au coefficient d'absorption à 24 heures qui représente une absorption essentiellement volumique. Par exemple pour le granulat d'argile expansée (ARG 4/8-750), une teneur en eau de 11, 3 % correspond à une absorption volumique de 7,3 % et une teneur en eau de surface de 4,0 %. De même, pour le granulat d'ardoise expansée (SCH 4/8-780), une teneur en eau de 6,5 % équivaut à une absorption volumique de 4,5 % et une teneur en eau de surface de 2,0 %.

3.4.3 Absorption dans la pâte des granulats pré-mouillés

Pour limiter les incertitudes dans le calcul de l'eau efficace, l'essai d'absorption dans la pâte est associé à l'essai de pré-mouillage. Le test d'absorption dans une pâte de rapport eau/ciment de 0,5 est réalisé sur les granulats pré-mouillés. Connaissant la teneur en eau initiale du granulat pré-mouillé w, l'absorption des granulats pré-mouillés à 1heure notée $W_{gl}(1h)$ peut être estimée par la relation (3-7).

Le détail des résultats est présenté au **Tableau 3.9**. Ces résultats indiquent qu'à 1 heure, le granulat d'argile expansée (ARG 4/8-750) et le granulat d'ardoise expansée (SCH 4/8-750) n'absorbent pas d'eau dans la pâte de ciment.

Tableau 3.9
Absorption des granulats pré-mouillés dans une pâte de rapport e/c de 0,5

Composition du mélange pâte/granulat				
	Argile expansée (ARG)		Ardoise expansée (SCH)	
Constituants	1	2	1	2
Ciment C (g)	450,1	450,1	450,2	450,4
Eau E (g)	225,1	225,1	225,4	225,1
Granulats pré-mouillés M_0 (g)	294,2	294,3	282,4	282,4
Absorption dans la pâte à 1 heure				
M_1 (g)	368,8	374,7	368,6	354,2
M_2 (g)	316,6	319,3	327	316,8
w	11,1	11,6	6,8	6,3
W_{gl} (1h) (%)	-1,0	-0,8	-2,6	-2,3

A l'issue du pré-mouillage, les granulats légers n'absorbent plus d'eau dans la pâte. Au contraire, ils enrichissent la pâte d'eau respectivement de 1 % pour le granulat ARG 4/8-750 et de 2, 4 % pour le granulat SCH 4/8-780. Cet apport peut être négligé devant la teneur en eau de surface respectivement de 4 % pour le granulat ARG 4/8-750 et 2 % pour le granulat SCH 4/8-780.

Ainsi, la prise en compte de la teneur en eau de surface des granulats légers dans le calcul de la quantité d'eau de malaxage permet de réduire voire d'annuler cet apport d'eau par les granulats légers à la pâte.

En se référant aux résultats du **Paragraphe 3.3**, la pré-saturation avec une quantité d'eau correspondant à une absorption dans la pâte à 1 heure aurait permis de se rapprocher d'une teneur en eau de 6 % qui semble être le bon compromis dans le cas du granulat d'argile expansée (ARG 4/8-750) pour limiter l'absorption et stabiliser l'étalement du mélange pâte/granulat dans la première heure.

3.5 Conclusion

L'optimisation de la demande en eau des granulats légers est l'une des pistes d'amélioration explorée pour la formulation des bétons légers. La mise au point du protocole d'absorption dans la pâte a permis de comprendre davantage les phénomènes de transfert d'eau entre la pâte et le granulat léger. Ce protocole nous a également permis de quantifier l'impact de la diminution (dans le cas d'une absorption d'eau) ou de l'augmentation (dans le cas d'une restitution d'eau) du volume de pâte sur la diminution ou l'accroissement de l'étalement.

La validation du protocole sur un granulat léger et un granulat naturel montre une bonne répétabilité. L'estimation de la demande en eau du granulat léger à partir du coefficient d'absorption à 1heure dans la pâte va permettre d'affiner le calcul du rapport eau efficace/ciment au cours de la période dormante dans un béton léger.

La comparaison de l'absorption dans la pâte et celle dans l'eau entre un granulat léger et un granulat naturel montre que l'absorption dans la pâte est complètement différente de celle dans l'eau pour le granulat léger. La quantité d'eau libre et la cinétique de raidissement de la pâte sont les paramètres qui contrôlent l'absorption d'un granulat donné dans la pâte.

L'effet du degré de saturation initiale sur la perte d'ouvrabilité du mélange pâte/granulat a mis en évidence la nécessité de pré-mouiller les granulats légers afin de limiter le raidissement précoce du béton au très jeune âge. La combinaison du pré-mouillage à 5 minutes et de l'absorption à 1heure dans la pâte de ciment va permettre in fine de contrôler l'étalement du béton léger frais tout en favorisant une bonne adhérence pâte/granulat.

Il est indispensable de bien choisir la teneur en eau initiale des granulats légers à l'issue du pré-mouillage afin d'éviter une restitution excessive d'eau à la pâte au cours du malaxage et durant la phase de mise en place du béton. Un pré-mouillage important et prolongé peut avoir des conséquences néfastes sur homogénéité et sur les performances mécaniques du béton.

Chapitre 4

Mise au point d'une méthodologie de formulation

Sommaire

4.1 Introduction 131

4.2 Modèle d'empilement compressible 132
4.2.1 Généralités 132
4.2.2 Rappel du modèle d'empilement virtuel 132
4.2.2.1 Quelques définitions 132
4.2.2.2 Compacité virtuelle 133
4.2.3 Description du modèle d'empilement compressible 137
4.2.3.1 Compacité réelle 137
4.2.3.2 Indice de serrage 138

4.3 Application du modèle d'empilement compressible à des formules exploratoires de BAPL 139
4.3.1 Calcul de l'indice de serrage dans le béton frais 139
4.3.2 Critère de contrôle de la stabilité 140
4.3.2.1 Description du phénomène de ségrégation dans les BAPL 140
4.3.2.2 Présentation et analyse des résultats de l'application du modèle MEC 141

4.4 Modèle de composite gravillons légers/mortier de sable normal pour prévoir la résistance à la compression des bétons légers 144
4.4.1 Description du modèle série/parallèle 144
4.4.2 Détermination du module élastique de la pâte de ciment 146
4.4.3 Détermination de la résistance à la compression et du module d'élasticité du mortier de sable normal 146
4.4.3.1 Résistance mécanique 146
4.4.3.2 Module élastique 147
4.4.3.3 Calage de la valeur du coefficient granulaire Kg et confrontation du modèle trisphère aux valeurs expérimentales 147
4.4.4 Détermination du module d'élasticité des granulats légers 149
4.4.5 Confrontation des données du modèle série/parallèle aux données expérimentales 149

4.5 Méthode de formulation des BAPL de mortier normal basée sur l'optimisation de la demande en eau des granulats légers 151
4.5.1 Principe de la méthode de composition 151
4.5.2 Schéma de synthèse de la méthode 153
4.5.3 Description de la méthode de composition 154
4.5.3.1. Données matériaux 154
4.5.3.2 Les étapes de calcul 154
4.5.4 Exemple d'application 157
4.5.4.1 Cahier des charges 157
4.5.4.2 Mise en œuvre de la méthode 157
4.5.4.3 Etapes de calculs 158
4.5.4.4 Vérification 159
4.5.4.5 Validation 159

4.6 Conclusion 160

4.1 Introduction

La méthode de formulation proposée s'applique aux bétons auto-plaçants légers de sable normal (BAPLSN). Elle est établie pour répondre à trois objectifs principaux :

- donner un caractère auto-plaçant au béton
- atteindre des résistances mécaniques visées
- garantir une bonne résistance à la ségrégation statique et dynamique du béton.

Le niveau de serrage du squelette granulaire influence le caractère auto-plaçant d'un mélange. Les squelettes granulaires avec un niveau de serrage élevé vont présenter une moindre propension à l'écoulement et à contrario, les squelettes granulaires avec un niveau de serrage bas vont être enclins à la ségrégation (De Larrard 1999).

L'esprit de la méthode de composition est donc de définir l'auto-plaçance autour du niveau de serrage du béton frais. Le modèle d'empilement compressible (MEC) developpé par (Sedran et De Larrard 1994) et implémenté dans le logiciel RENE LCPC (Sedran et De Larrard 1999) et qui met en avant la compacité réelle et l'indice de serrage vient à point pour intégrer dans la méthode de composition, le niveau de serrage comme un paramètre de contrôle de l'auto-plaçance et de la stabilité du béton frais. Dans la mise en œuvre de la méthode, le modèle d'empilement compressible a été adapté pour donner le caractère auto-plaçant du béton et contrôler le risque de ségrégation.

Le modèle composite série/parallèle proposé par (Virlogeux 1986) et repris par (De Larrard 1995) est utilisé pour la prédiction de la résistance mécanique des BAPLSN. L'intérêt de ce modèle est qu'il est basé sur l'hypothèse forte que le mortier de sable normal est plus rigide que les granulats légers et que la résistance du béton léger est pilotée par les performances mécaniques du mortier et de la pâte.

Le protocole d'essai d'absorption a servi à la redéfinition de la quantité d'eau efficace à partir de l'absorption dans la pâte. La prise en compte de l'absorption dans la pâte de ciment va permettre de mieux appréhender la demande en eau des granulats légers dans le béton et limiter par conséquent l'augmentation du rapport E_{eff}/L induite par un excès d'eau de gâchage.

Les pistes explorées pour développer la méthode de formulation sont détaillées dans ce chapitre. Les différentes caractérisations présentées au **Chapitre 2** ainsi que la description du protocole d'absorption dans la pâte au **Chapitre 3** donnent les outils nécessaires pour la mise en œuvre de la méthode de formulation.

4.2 Le modèle d'empilement compressible

4.2.1 Généralités

Le modèle d'empilement compressible (MEC) exprime la dépendance entre la compacité atteinte et l'énergie de serrage fournie à un système granulaire. Le modèle met en avant la notion de compacité réelle en complémentarité avec celle de la compacité virtuelle. La compacité réelle est associée à un procédé physique de construction de l'empilement alors que la compacité virtuelle définit la compacité maximale théorique, inatteignable dans la réalité.

Nous proposons de rappeler dans un premier temps le concept du modèle d'empilement virtuel et dans un second temps de décrire le modèle d'empilement compressible.

4.2.2 Rappel du modèle d'empilement virtuel

4.2.2.1 Quelques définitions

a) Fraction volumique

Le volume partiel ou fraction volumique ϕ est un paramètre important qui caractérise les empilements de particules. Il définit le rapport du volume occupé par les grains sur le volume total occupé par l'empilement. Pour une classe i donnée, la fraction volumique vaut :

$$\phi_i = \frac{V_{grains\,i}}{V_{total}} \tag{4-1}$$

La compacité d'un empilement devient la somme des fractions volumiques des différentes classes qui le composent.

$$\gamma = \phi = \sum_{i=1}^{n} \phi_i \tag{4-2}$$

La compacité d'un empilement ne peut donc dépasser la limite de 1, qui correspondrait à un empilement où les grains occuperaient tout l'espace (des cubes parfaitement empilés par exemple).

b) Proportion volumique

La proportion volumique ou titre volumique y_i d'une classe i donnée est définie comme le rapport du volume occupé par les grains de la classe i sur le volume occupé par l'ensemble des grains des n classes qui composent l'empilement.

$$y_i = \frac{V_{grain\,i}}{\sum_{i=1}^{n} V_{grain\,i}} \tag{4-3}$$

c) Relation entre la fraction volumique et la proportion volumique

Par définition

$$y_i = \frac{V_{grain\,i}}{\sum_{i=1}^{n} V_{grain\,i}}$$

La compacité de l'empilement s'écrit

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^{n} V_{grain\,i}}{V_{total}}$$

En exprimant le titre volumique en fonction de la compacité de l'empilement on obtient :

$$y_i = \frac{V_{grain\,i}}{\gamma * V_{total}}$$

Le titre volumique peut s'exprimer en fonction de la fraction volumique.

$$y_i = \frac{\phi_i}{\phi}$$

Soit

$$\phi_i = y_i * \phi \tag{4-4}$$

4.2.2.2 Compacité virtuelle

Par définition, la compacité virtuelle est la compacité maximale atteinte par un mélange donné, chaque particule, placée une à une, gardant sa forme originelle. Par exemple, la compacité virtuelle d'un mélange ordonné de sphères de même taille est égale à 0,74 (Andreotti et al. 2011). Pour illustrer la compacité virtuelle, considérons un mélange binaire.

a) Mélange binaire sans interaction

Soit un mélange constitué de deux classes 1 et 2 respectivement de diamètre d_1 et d_2 tel que $d_1 > d_2$. Les deux classes de grains sont dits sans interaction si $d_1 \gg d_2$. Distinguons deux cas parfaits.

1er cas : les gros grains de diamètre d_1 *sont « dominants »*

Ils remplissent alors le volume disponible comme s'il n'y avait pas les petits grains. En d'autre terme, le volume des grains de masse volumique identique ne change pas même si on enlève les petits grains. La compacité virtuelle du mélange s'écrit :

$$\gamma = \gamma_1 = \emptyset = \emptyset_1 + \emptyset_2 \tag{4-5}$$

$$\emptyset = \frac{V_{grains}}{V_{total}}$$

$$V_{grains} = \frac{m_1 + m_2}{\rho}$$

$$V_{total} = \frac{m_1}{\rho\beta_1}$$

$$\gamma = \gamma_1 = \emptyset = \frac{\beta_1}{1 - y_2} \tag{4-6}$$

γ_1 compacité virtuelle du mélange en considérant que la classe 1 dominante
β_1 compacité résiduelle de la classe 1 prise isolément
y_2 proportion volumique de la classe 2 dans le mélange

2ème cas : les petits grains de diamètre d_2 sont « dominants »

Les petits grains remplissent la porosité des gros grains de telle sorte le volume de l'empilement soit la somme des volumes des grains. La compacité virtuelle du mélange est :

$$c = c_2 = \emptyset = \emptyset_1 + \emptyset_2$$

$$\emptyset = \frac{V_{grains}}{V_{total}}$$

$$V_{grains} = \frac{m_1 + m_2}{\rho}$$

$$V_{total} = \frac{m_1}{\rho} + \frac{m_2}{\rho\beta_2}$$

$$\gamma = \gamma_2 = (V_1 + V_2)\frac{\beta_2}{\beta_2 V_1 + V_2}$$

En divisant le numérateur et le dénominateur par $(V_1 + V_2)$ on obtient :

$$\gamma = \gamma_2 = \frac{\beta_2}{1 - (1 - \beta_2)y_1} \tag{4-7}$$

γ_2 compacité virtuelle du mélange en considérant que la classe 2 dominante
β_2 compacité résiduelle de la classe 2 prise isolément
y_1 proportion volumique de la classe 1 dans le mélange

Rappelons que γ_1 et γ_2 peuvent être calculées quelle que soit la classe dominante. Ainsi, la compacité γ du mélange sans considérer laquelle des deux classes est dominante vérifie la relation :

$$\gamma = \inf(\gamma_1, \gamma_2)$$

b) Mélange binaire avec interaction totale

Deux populations de grains sont dites en interaction totale quand $d_1 = d_2$ alors que leurs compacités résiduelles sont différentes. La compacité du mélange s'écrit :

$$\gamma = \emptyset = \emptyset_1 + \emptyset_2$$

$$\emptyset = \frac{V_{grains}}{V_{total}}$$

$$V_{grains} = \frac{m_1 + m_2}{\rho}$$

$$V_{total} = \frac{m_1}{\beta_1 \rho} + \frac{m_2}{\rho \beta_2}$$

$$\gamma = \emptyset = \frac{\beta_1 \beta_2}{\beta_2 y_1 + \beta_1 y_2}$$

En remplaçant $y_1 = 1 - y_2$ et divisant les deux membres de la fraction par β_2 on obtient :

$$\gamma_1 = \frac{\beta_1}{1 - (1 - {}^{\beta_1}/_{\beta_2}) y_2} \tag{4-8}$$

En gardant le même formalisme que le paraphe précédent, on obtient

$$\gamma_2 = \frac{\beta_2}{1 - (1 - {}^{\beta_2}/_{\beta_1}) y_1} \tag{4-9}$$

c) Mélange binaire avec interaction partielle

L'interaction partielle entre les deux classes est définie par $d_1 \geq d_2$. Les perturbations locales dans l'empilement des grains d'une taille du fait de la présence des grains de l'autre taille sont de deux ordres.

Effet de desserrement

Si un grain fin (2) est inséré dans la porosité de l'empilement des gros grains (1), lesquels sont dominants, et s'il n'est pas suffisamment petit pour se placer dans un vide, il y a alors localement une diminution du volume des gros grains appelée l'effet de desserrement. La compacité du mélange s'écrit :

$$\gamma_1 = \frac{\beta_1}{1 - (1 - a_{12}\frac{\beta_1}{\beta_2})y_2} \tag{4-10}$$

où a_{12} est le coefficient de desserrement de la classe 1 par la classe 2. Quand $d_1 \gg d_2$ (sans interaction), $a_{12} = 0$; lorsque $d_1 = d_2$ (interaction totale), $a_{12} = 1$

Effet de paroi

Lorsque quelques gros grains isolés sont immergés dans un océan des grains fins (lesquels sont dominants), il existe une certaine quantité de vides dans l'empilement des grains 2, localisée à l'interface avec les grains 1 (effet de paroi). La compacité s'écrit :

$$\gamma_2 = \frac{\beta_2}{1 - \left[1 - \beta_2 + b_{21}\beta_2(1 - {}^1/_{\beta_1})\right]y_1} \tag{4-11}$$

où b_{21} est le coefficient d'effet de paroi de classe 2 par la classe 1. Quand $d_1 \gg d_2$ (sans interaction) , $b_{21} = 0$; lorsque $d_1 = d_2$ (interaction totale), $b_{21} = 1$.

Les coefficients a_{12} et b_{21} dépendent des caractéristiques de deux populations de grains.

Comme pour les mélanges binaires sans interaction, pour toutes combinaisons de proportions yi, la compacité du mélange vérifie la relation :

$$\gamma = \inf(\gamma_1, \gamma_2) \tag{4-12}$$

d) Génération dans le cas d'un mélange polydisperse avec interaction

Considérons d'abord un mélange ternaire dans lequel $d_1 \geq d_2 \geq d_3$. Supposons que la classe 2 soit dominante. Les grains correspondants sont alors soumis à l'effet de desserrement exercé par les grains 3, et à l'effet de paroi exercé par les grains 1. Dans ce cas, la compacité du mélange est :

$$\gamma = \emptyset_1 + \emptyset_2 + \emptyset_3 \tag{4-13}$$

$$\gamma = \gamma_2 = \frac{\beta_2}{1 - (1 - \beta_2 + b_{21}\beta_2\left(1 - {}^1/_{\beta_1}\right))y_1 - (1 - a_{23}\,{}^{\beta_2}/_{\beta_3})y_3} \tag{4-14}$$

Elle peut être généralisée aux n classes d'un mélange granulaire. On obtient ainsi la compacité virtuelle γ_i du mélange lorsque la classe i est dominante par la relation :

$$\gamma_i = \frac{\beta_i}{1 - \sum_{j=1}^{i-1}\left[1 - \beta_i + b_{ij}\beta_i\left(1 - {}^{1}/_{\beta_j}\right)\right]y_j - \sum_{j=i+1}^{n}[1 - a_{ij}\,{}^{\beta_i}/_{\beta_j}]y_j} \quad (4\text{-}15)$$

γ_i compacité virtuelle du mélange constitué de n classes
β_i compacité résiduelle de la classe dominante i de diamètre d_i
β_j compacité résiduelle des classes autres que la classe dominante de diamètre d_i
y_j proportion volumique des classes autres que la dominante de diamètre d_i
a_{ij} coefficient de prise en compte de l'effet de desserrement de la classe dominante i par les classes j de plus petits diamètres que d_i
b_{ij} coefficient de prise en compte de l'effet de paroi de la classe dominante i par les classes j de plus gros diamètres que d_i

La compacité du mélange quelle que soit la classe dominante vérifie la relation :

$$\gamma = \inf(\gamma_i) \; avec \; 1 \leq i \leq n$$

La compacité virtuelle constitue un idéal inatteignable dans la réalité en raison de la variabilité des mélanges surtout dans le domaine du génie civil. C'est pourquoi nous abandonnons la notion de compacité virtuelle pour adopter la compacité réelle décrite selon le modèle d'empilement compressible.

4.2.3 Description du modèle d'empilement compressible

Le modèle est inspiré du modèle linéaire de compactibilité des mélanges granulaires développé par (Stovall et al. 1986) et du modèle de (Mooney 1951) qui traite de la viscosité d'un mélange de grains en suspension dans un liquide newtonien. Il introduit une grandeur scalaire représentative du procédé de construction de l'empilement appelée indice de serrage et noté *K*.

La compacité réelle d'un mélange de grains polydispersés dépend de trois paramètres principaux :

- la taille des grains considérés (décrite par la courbe granulométrique) ;
- la forme des grains (morphologie, état de surface) ;
- la façon dont l'empilement est réalisé.

A partir de la connaissance des compacités élémentaires, des granulométries et du mode de mise en place de classes unidimensionnelles, le modèle d'empilement compressible permet de prédire la compacité de toute combinaison de ces classes, placées de façon identique ou différente. Il peut être aussi utilisé pour la recherche de la distribution granulaire optimale.

4.2.3.1 Compacité réelle

La compacité réelle d'un empilement de grains est associée à un procédé physique de construction donné. Cette définition tient du fait que les mélanges granulaires d'inclusion rigide comme c'est le cas dans le domaine de la construction sont pyknotropiques c'est-à-dire sensibles à la pression de confinement. Elle peut être calculée pour un niveau de serrage donné.

4.2.3.2 Indice de serrage

L'indice de serrage est une grandeur scalaire qui est associée à l'énergie de serrage de l'empilement et dépend du procédé de construction de l'empilement.

L'hypothèse principale de ce modèle d'empilement compressible est celle de l'additivité des contributions des classes élémentaires de l'empilement à l'indice de serrage global. L'indice partiel K_i est fonction du rapport entre le volume effectif de la classe considéré et sa valeur maximale, toutes les autres classes étant gardées constantes en volume. Par analogie à l'expression de la viscosité relative par (Mooney 1951), l'indice de serrage est donné par l'expression :

$$K = \sum_{i=1}^{n} K_i \tag{4-16}$$

L'indice partiel K_i s'écrit :

$$K_i = \frac{\frac{\phi_i}{\phi_i^*}}{1 - \frac{\phi_i}{\phi_i^*}} \tag{4-17}$$

$$K_i = \frac{\phi_i}{\phi_i^* - \phi_i}$$

En utilisant les mêmes approches que celles qui ont été développées pour la généralisation de la compacité virtuelle, on peut calculer le volume partiel ϕ_i^* de la classe dominante i.

En considérant le système constitué de n classes élémentaires on démontre que pour une interaction totale.

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{\phi_i}{\beta_i} = 1 \tag{4-18}$$

$$\frac{\phi_i}{\beta_i} + \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\phi_j}{\beta_j} + \sum_{j=i+1}^{n} \frac{\phi_j}{\phi_j} = 1$$

Dans le cas plus général d'une interaction partielle on a :

$$\frac{\phi_i}{\beta_i} = 1 - \sum_{j=1}^{i-1} \left[1 - b_{ij}\left(1 - {}^{1}/_{\beta_j}\right)\right]\phi_j - \sum_{j=i+1}^{n} \frac{a_{ij}}{\beta_j}\phi_j$$

$\phi_i^* = \phi_i$ lorsque la classe i est dominante

Par suite

$$\phi_i^* = \beta_i[1 - \sum_{j=1}^{i-1}[1 - b_{ij}\left(1 - {}^{1}/_{\beta_j}\right)]\phi_j - \sum_{j=i+1}^{n}\frac{a_{ij}}{\beta_j}\phi_j] \quad (4\text{-}19)$$

$$\phi_i^* - \phi_i = \phi\left(\frac{\beta_i}{\phi} - \beta_i\sum_{j=1}^{i-1}\left[1 - b_{ij}(1 - {}^{1}/_{\beta_j})\right]y_j - \beta_i\sum_{j=i+1}^{n}\frac{a_{ij}}{\beta_j}y_j - y_i\right)$$

Soit

$$\phi_i^* - \phi_i = \phi\left(\frac{\beta_i}{\phi} - \frac{\beta_i}{\gamma_i}\right)$$

Ainsi

$$\frac{\phi_i}{\phi_i^* - \phi_i} = \frac{{}^{y_i}/_{\beta_i}}{\frac{1}{\phi} - \frac{1}{\gamma_i}}$$

D'où l'expression de l'indice de serrage

$$K = \sum_{i=1}^{n} K_i = \sum_{i=1}^{n}\frac{{}^{y_i}/_{\beta_i}}{\frac{1}{\emptyset} - \frac{1}{\gamma_i}} \quad (4\text{-}20)$$

L'indice de serrage d'un empilement dépend de sa compacité réelle et vice versa.

Le modèle d'empilement compressible sera appliqué à des formules de bétons auto-plaçants légers (BAPL) issues de l'industrie pour d'une part déterminer l'intervalle de valeur d'indice de serrage susceptible de garantir l'auto-plaçabilité du béton et d'autre part pour discrimer les BAPL ségrégeants des non ségrégeants.

4.3 Application du modèle d'empilement compressible à des formules exploratoires de BAPL

Ces essais vont permettre de définir l'intervalle de valeurs de l'indice de serrage pour les BAPL de l'industrie et de définir un critère de contrôle de la stabilité du béton basé sur le niveau de serrage.

4.3.1 Calcul de l'indice de serrage dans le béton frais

Le béton auto-plaçant léger (BAPL) homogène est considéré comme un mélange granulaire saturé où l'eau occupe la totalité du volume de vide par unité de volume. Ainsi, la compacité réelle du mélange est définie comme le complémentaire à 1 du volume d'eau total par unité de volume. L'indice de serrage du béton frais est ensuite calculé à partir de la relation (4-20).

4.3.2 Critère de contrôle de la stabilité

4.3.2.1 Description du phénomène de ségrégation dans les BAPL

Le contraste de masse volumique entre les granulats légers et le mortier tend à favoriser naturellement la ségrégation des bétons légers. La prise en compte de l'absorption différée des granulats légers (par le biais du coefficient d'absorption dans l'eau) peut occasionner de la ségrégation du fait d'une quantité d'eau libre importante dans le mélange au cours du malaxage. La ségrégation des bétons légers se caractérisent pas une remontée des plus gros granulats soit pas défaut de cohésion avec le mortier (bétons légers de mortier normal) soit par un ressuage important comme l'illustre la **Figure 4.1**.



Flottaison des granulats légers au cours du malaxage *Ressuage important après la mise en place*

Figure 4.1 Ressuage d'un BAPL

Le critère de contrôle de la stabilité est défini à partir du modèle d'empilement compressible appliqué à une sélection de bétons auto-plaçants légers issue de l'industrie du béton. A l'aide du logiciel d'optimisation granulaire RENE-LCPC, la compacité réelle et l'indice de serrage des compositions exploratoires de BAPL sont calculées tel que décrit au paragraphe 4. 3.1. Les compositions sont réparties en deux groupes de BAPL. Le premier groupe est composé de BAPL homogènes et stables et le second de BAPL présentant une ségrégation visuelle. L'observation de la galette d'étalement a permis de détecter les premiers signes de ségrégation du béton en notant particulièrement :

- la concentration des gravillons au centre de la galette (**Figure 4.2-b**) ;
- la présence d'un anneau de laitance en périphérie (**Figure 4.2-c**).



a- BAPL homogène et stable | *b- BAPL avec concentration des gravillons au centre* | *c- BAPL avec laitance en périphérie*

Figure 4.2 BAPL homogène et BAPL présentant une ségrégation visuelle

4.3.2.2 Présentation et analyse des résultats de l'application du modèle MEC

Les **Tableaux 4.1 et 4.2** donnent la composition et les propriétés des BAPL testés. Les différentes compositions sont pour la plupart faiblement adjuvantées avec un dosage en superplastifiant en-dessous du dosage de saturation.

Tableau 4.1
Compositions réelles en Kg/m³ de BAPL testées

Constituants	BAPL homogènes et stables					BAPL présentant une ségrégation visuelle			
	D1.6	D1.8	D2.0	B1	B2	A1	A3	C1	C2
Sable 0/2	201	415	803	-	-	-	-	-	-
Sable 0/4	-	315	-	788	411	819	-	863	394
Sable léger 0/4	534	163	-	-	179	-	391	-	172
ARG 4/8-650	160	261	-	371	392	386	407	-	292
ARG 4/8-750	-	-	411	-	-	-	-	319	-
Ciment CEM I	400	350	350	354	353	497	502	374	342
Filler calcaire	154	154	154	147	165	50	50	174	159
Superplastifiant	6,9	4,1	6,3	0,82	0,81	1,87	1,50	1,12	-
Agent de viscosité	6,9	2,3	5,6	0,05	0,05	-	0,64	0,05	0,68
Eau totale	215	189	189	237	214	249	267	223	237
Eau totale + air	235	219	229	257	234	279	297	243	257
E_{eff}/C	0,54	0,54	0,55	0,67	0,61	0,5	0,53	0,6	0,69
E_{eff}/L	0,39	0,38	0,38	0,47	0,41	0,46	0,48	0,55	0,47
A /(A+C)	0,28	0,31	0,31	0,29	0,32	0,09	0,09	0,32	0,32

Tableau 4.2
Propriétés des BAPL testés

Type de compo	Masse volumique à l'état frais (kg/m³)		Etalement (mm)	Résistance à la compression à 28 j (MPa)
	Théorique	Réelle		
D1.6	1 669	1 709	755	43,0
D1.8	1 934	2 016	725	46,0
D2.0	1 912	2 016	690	54,0
B1	2 064	1 994	875	32,5
B2	1 851	1 850	700	37,0
A1	1 885	2 083	790	-
A3	1 851	1 852	515	41,9
C1	1 954	2 022	850	45,0
C2	1 753	1 698	540	23,0

Les BAPL de compositions désignées par D1.6, D1.8, D2.0 B1 et B2 dont l'indice de serrage se situe compris entre 4,5 et 5,5 présentent une bonne homogénéité visuelle comme sur la **Figure 4.2 (a)**. L'utilisation d'un sable 0/2 et l'ajout d'un agent de viscosité ont sans doute contribué à la stabilité des mélanges non ségrégeants. En revanche, les compositions A1, A3, C1 et C2 dont l'indice de serrage est inférieur à 4,5 ont montré une ségrégation visuelle marquée soit par une concentration de gravillons au centre de la galette soit par une laitance en périphérie à l'issue de l'essai d'étalement au cône comme sur les **Figures 4.2 (b) et (c)**. Ces compositions sont caractérisées par une quantité d'eau plus importante en raison vraisemblablement de la prise en compte de la demande en eau des granulats légers. Cette quantité d'eau contribue à desserrer de façon significative le squelette granulaire de ces mélanges et à provoquer la ségrégation.

Nous constatons sur les formules testées de résistance moyenne à la compression comprise entre 25 et 55 MPa, que les mélanges homogènes et stables ont une valeur d'indice de serrage comprise entre 4,5 et 5,5. La valeur minimale renseigne sur l'aptitude à la ségrégation du mélange alors que la valeur maximale oriente sur l'ouvrabilité du mélange. En d'autres termes, lorsque l'indice de serrage est inférieur à 4,5, il y a un risque de ségrégation du mélange et lorsque l'indice de serrage est supérieur à 5,5 il y a un risque de réduction de la capacité et de la vitesse de remplissage du matériau.

L'évolution de la compacité réelle en fonction de l'indice de serrage est présentée sur la **Figure 4.3**. Nous constatons que la compacité réelle diminue lorsque l'indice de serrage diminue. Ces résultats associés aux observations visuelles indiquent que l'homogénéité du béton n'est garantie qu'à partir d'un niveau de serrage minimal. Les compositions dont l'indice de serrage est compris entre 4,5 et 5,5 atteignent un niveau de serrage suffisant ou une compacité réelle optimale pour limiter le risque de ségrégation tout en gardant le caractère auto-plaçant. Cet intervalle de valeurs d'indice de serrage peut être pris comme un intervalle d'intérêt pour des BAPL homogènes faiblement adjuvantés.

Tableau 4.3
Indice de serrage des BAPL

Type de composition	Compacité réelle estimée	Indice de serrage K	Observations visuelles
D1.6	0,765	5,4	Pas de ségrégation
D1.8	0,781	4,9	Pas de ségrégation
D2.0	0,771	4,4	Pas de ségrégation
B1	0,743	4,8	Pas de ségrégation
B2	0,766	4,9	Pas de ségrégation
A1	0,721	4,0	Ségrégation visuelle
A3	0,703	3,9	Ségrégation visuelle
C1	0,760	4,7	Ségrégation visuelle
C2	0,740	4,3	Ségrégation visuelle

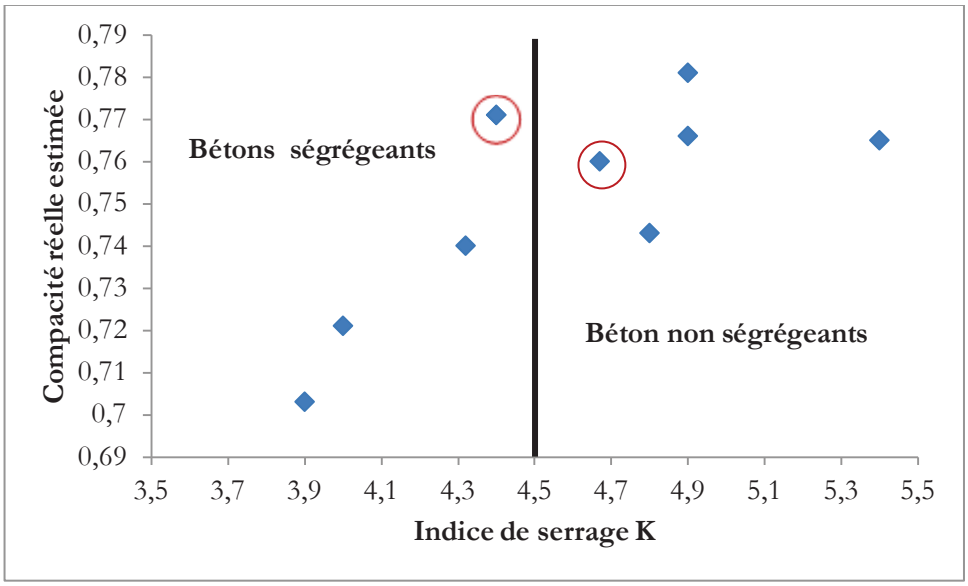


Figure 4.3 Indice de serrage de BAPL

Somme toute, l'application du modèle d'empilement compressible sur les formules issues de l'industrie du béton a permis de discrimer les BAPL homogènes et stables des BAPL ségrégeants. La plage d'indice de serrage entre 4,5 et 5,5 semble être un bon indicateur pour garantir l'auto-plaçabilité d'un BAPL faiblement adjuvanté.

En plus du caractère auto-plaçant, les BAPL doivent garantir un niveau de performance donné pour présenter un intérêt du point vue industriel. Pour prédire la résistance à la compression des bétons auto-plaçants légers de sable normal (BAPLSN), des modèles composites granulat/mortier sont empruntés à la littérature pour associer l'auto-plaçance aux performances mécaniques.

4.4 Modèle de composite gravillons légers/mortier de sable normal pour prévoir la résistance à la compression des bétons légers

4.4.1 Description du modèle série/parallèle

Dans les bétons légers de sable normal, la rigidité du mortier est généralement supérieure à celle des gravillons légers. Les granulats légers sont donc plus déformables et assurent une compactibilité de déformation avec le mortier. Le transfert des contraintes est assuré par le biais des propriétés mécaniques du mortier (résistance à la compression et module d'élasticité) et celles du granulat léger (module équivalent du granulat léger) selon (De Larrard 1995). Les contraintes dans le mortier sont plus importantes que celles qui existent dans les gravillons légers et le mélange a une résistance inférieure à celle qu'aurait la même éprouvette simplement confectionnée avec du mortier.

Le modèle qui illustre le mieux la dispersion des granulats légers dans la matrice est le modèle proposé par (Virlogeux 1986) pour estimer le module du béton léger. Ce modèle représente le béton léger comme un matériau hétérogène constitué d'un volume cubique g de gravillon inclus dans une maille de volume unité (voir **Figure 4.4**). En exprimant le volume de la matrice V_m en fonction du volume de gravillon g on obtient :

$$V_g = g = a^3 \tag{4-21}$$

$$V_m = 1 - g = 1 - g + g^{\frac{1}{3}} - g^{\frac{1}{3}}$$

$$V_m = \left(1 - g^{\frac{1}{3}}\right) + \left(g^{\frac{1}{3}} - g\right) \tag{4-22}$$

D'après (De Larrard 1995), ce modèle physique s'associe naturellement au modèle rhéologique combiné de Voigt/Reuss ou série/parallèle par lequel la rigidité équivalente totale E du béton de granulat léger est exprimée par la relation:

$$E = \left(1 - g^{\frac{2}{3}}\right) E_m + g^{\frac{2}{3}} E_g \tag{4-23}$$

E_m le module élastique du mortier de sable normal
E_g le module élastique du gravillon léger
g la proportion volumique de gravillon léger

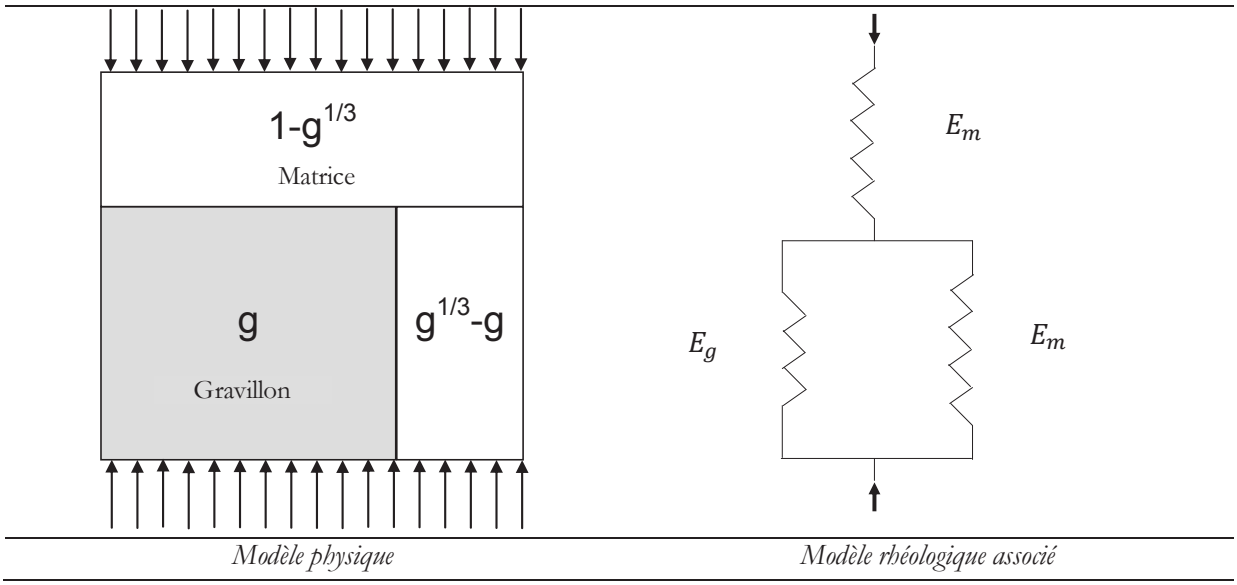


Figure 4.4 Modèle de composite gravillon léger/ mortier de sable normal

En négligeant le déplacement relatif entre le mortier et les gravillons légers du fait de la bonne adhérence entre les deux phases, l'équation de compactibilité des déformations peut s'écrire :

$$\varepsilon_g = \varepsilon_m = \varepsilon \qquad (4\text{-}24)$$

$$\frac{\sigma_m}{E_m} = \frac{\sigma}{E}$$

La contrainte dans la partie du mortier parallèle au gravillon s'écrit :

$$\sigma_m = \frac{\sigma}{E} E_m$$

$$\sigma_m = \sigma \frac{E_m}{\left(1 - g^{\frac{2}{3}}\right) E_m + g^{\frac{2}{3}} E_g} \qquad (4\text{-}25)$$

La résistance à la compression du béton $f_{cm,b}$ léger en fonction de la résistance du mortier de sable normal $f_{cm,m}$ peut donc s'écrire :

$$f_{cm,b} = \left[1 - (1 - \frac{E_g}{E_m}) g^{\frac{2}{3}}\right] f_{cm,m} \qquad (4\text{-}26)$$

Les données pour prévoir la résistance moyenne à la compression des BAPLSN sont les modules d'élasticité de la pâte de ciment, du mortier de sable normal et du gravillon léger et la résistance moyenne à la compression du mortier.

Le module de la pâte de ciment est déterminé à partir du modèle proposé par (Marchand 1992).

La résistance à la compression du mortier de sable normal est déterminée à partir du modèle de type Féret modifié. Les données théoriques ont été ensuite validées expérimentalement sur trois types de mortier pour justifier la précision du modèle. Selon le même formalisme, le module d'élasticité du mortier est déterminé à partir du modèle trisphère et validé expérimentalement sur les mêmes compositions de mortier.

Le module d'élasticité dynamique des granulats légers est déterminé à partir de modèle proposé par (Bremner and Holm 1986) et des données fournisseurs.

4.4.2 Détermination du module élastique de la pâte de ciment

La résistance à la compression et le module élastique E_p de la pâte de ciment pure sont estimés d'après les relations proposées par (Marchand 1992) :

$$E_p = 226\ f_{cm,p} \tag{4-27}$$

$f_{cm,p}$ la résistance à la compression de la pâte pure

Pour minimiser le déphasage entre le module de la matrice équivalente et celle de la pâte pure, la résistance à la compression de la pâte pure est remplacée par la résistance du mortier. La relation (4-27) devient :

$$E_p = 226\ f_{cm,m} \tag{4-28}$$

4.4.3 Détermination de la résistance à la compression et du module d'élasticité du mortier de sable normal

4.4.3.1 Résistance mécanique

A même nature de pâte, la résistance à la compression du béton est contrôlée par la distance moyenne de deux gros grains adjacents (De Larrard et Tondat 1993). Cette distance est appelée épaisseur maximale de pâte (EMP) et se calcule par la relation :

$$EMP = D_{max}\left(\sqrt[3]{\frac{g^*}{g}} - 1\right) \tag{4-29}$$

D_{max} diamètre du plus gros granulat
g^* compacité du granulat utilisé pour fabriquer un béton
g volume granulaire dans un volume unité de mélange

L'introduction des granulats dans la pâte créée un effet de confinement qui peut être pris en compte par le biais de l'épaisseur maximale de pâte (EMP) dans la prévision de la résistance à la compression des matériaux cimentaires à une inclusion rigide. En appliquant ce concept au

modèle de type Féret, on obtient la relation de Féret modifiée proposée par de (De Larrard 1999). Dans le cas d'un mortier de sable normal, la résistance moyenne à la compression peut s'écrire :

$$f_{cm,m} = f_{cm28} K_g (\omega_c)^2 EMP^{-0,13} \quad (4\text{-}30)$$

$f_{cm,m}$ résistance moyenne à la compression du mortier

f_{cm28} classe vraie du ciment portland. La résistance du liant constitué de ciment portland et d'addition calcaire a été mesurée en lieu et place de la classe vraie du ciment avec le même taux de substitution calcaire/ciment.

K_g coefficient granulaire compris entre 4,8 et 5,5. La valeur de Kg a été calibré à partir du modèle type Féret modifié sur trois types de mortiers. Il est pris égal à 5,0.

ω_c concentration du liant du désigne le rapport du volume de liant sur le volume de pâte

4.4.3.2 Module élastique

Le module de compressibilité du mortier est approché par l'application du modèle trisphère (De Larrard et Le Roy 1992) et (Le Roy 1996) sur un composite dans lequel la « pâte de ciment » est la phase continue et les « grains de sable » représentent les inclusions rigides. Le module élastique du mortier est donné par l'expression suivante :

$$E_m = \left(1 + 2g \frac{{E_g}^2 - {E_p}^2}{(g^* - g){E_g}^2 + 2(2 - g^*)E_g E_p + (g^* + g){E_p}^2}\right) E_p \quad (4\text{-}31)$$

E_m module élastique du mortier ;

E_g module du granulat de sable normal ;

E_p module de la pâte.

4.4.3.3 Calage de la valeur du coefficient granulaire Kg et confrontation du modèle trisphère aux valeurs expérimentales

Trois compositions de mortier de sable normal sont réalisées afin de caler la valeur du coefficient granulaire Kg à partir du modèle type Féret modifié et de vérifier la précision du modèle trisphère pour le module d'élasticité. Les compositions sont réalisées en gardant la proportion volumique du sable constante pour les trois valeurs de rapport E_{eff}/L comme l'indique le **Tableau 4.4**.

Tableau 4.4
Composition des mortiers

N°	C (kg)	A (kg)	SIL (kg)	E (kg)	S (kg)	E_{eff}/L	Vp (l)	% Vol SIL (%)
1	649	203	1123	298	1,28	0,33	578	42
2	559	177	1136	331	0,59	0,42	573	43
3	495	154	1141	357	0,13	0,52	571	43

a) Calage de la valeur du coefficient granulaire Kg

Connaissant la résistance moyenne réelle du mortier, la classe vraie du liant, la concentration de liant et l'épaisseur maximale de pâte, la valeur du coefficient granulaire Kg peut être déduite d'après la relation (4-30). La **Figure 4.5** montre la résistance moyenne en fonction de la qualité de la pâte sur les trois mortiers de sable normal. Ce résultat indique que la valeur du coefficient de granulaire Kg est de 5,0.

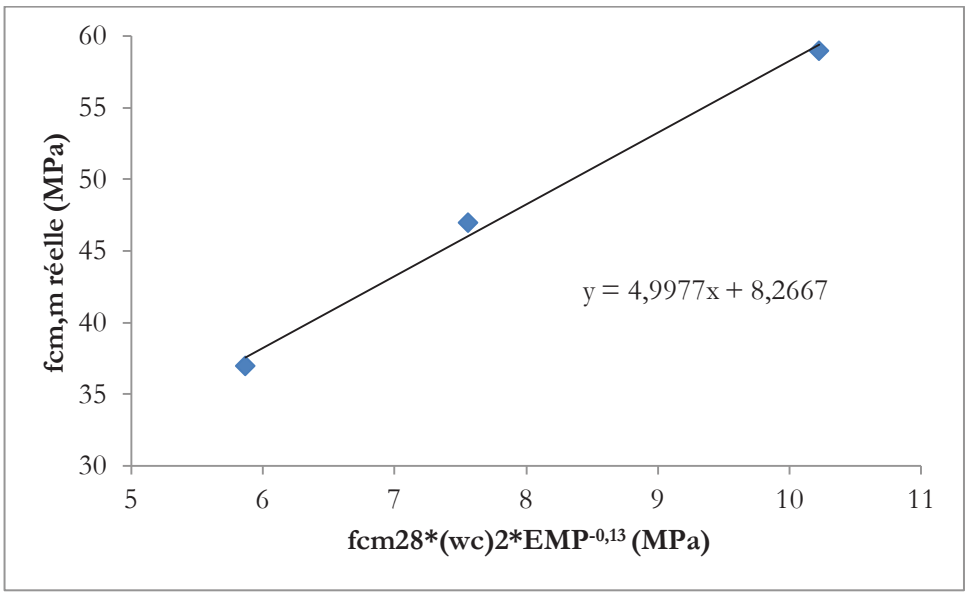


Figure 4.5 Calage de la valeur du coefficient granulaire Kg sur des mortiers de sable de normal

b) Comparaison du modèle trisphère aux valeurs expérimentales

Les rapports entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées sont présentés dans le **Tableau 4.5**. Ces résultats indiquent que le modèle trisphère minore le module d'élasticité du mortier de sable normal. L'écart entre le module calculé et le module mesuré oscille entre -0,2 et 3,6 GPa avec une moyenne des écarts de 1,5 GPa soit une erreur moyenne de 6 %.

Tableau 4.5
Résultats de comparaison entre les données calculées et les données mesurées

N°	g	g*	Classe liant (MPa)	ωc	fcm,p théo (MPa)	Ep théo (GPa)	fcm,m exp (MPa)	Em theo (GPa)	Em exp (GPa)	Ecart Em (GPa)
1	0,42	0,733	52	0,49	75,5	17,1	59,0	28,6	32,2	3,6
2	0,43	0,733	52	0,42	51,1	11,5	47,0	26,0	27,2	1,2
3	0,43	0,733	52	0,37	36,0	8,1	37,0	23,5	23,3	-0,2

Nous constatons que l'écart entre le module d'élasticité calculé et le module d'élasticité mesuré augmente progressivement à mesure que la résistance du mortier augmente. Cependant, la précision du modèle trisphère est satisfaisante puisque l'erreur moyenne n'est que 6 %.

Ces résultats indiquent par ailleurs que la valeur choisie pour le module d'élasticité du sable normal est cohérente pour ce niveau de précision du modèle.

4.4.4 Détermination du module d'élasticité des granulats légers

Connaissant la masse volumique apparente sèche du granulat léger $\rho_{g,l}$, le module dynamique d'un grain isolé de granulat léger ou module équivalent $E_{g,l}$ peut être estimé à l'aide de la relation proposée par (Bremner and Holm 1986) qui s'écrit :

$$E_{g,l} = 0{,}0008\ \rho_{g,l}^2 \tag{4-32}$$

Les modules d'élasticité des granulats légers utilisés sont calculés et comparés aux données des fabricants. La comparaison indique une compatibilité entre les donnés calculées et les données fournisseurs. Pour plus de représentativité de la mesure, nous avons utilisé les données des fabricants présentées au **Tableau 2.3** du **Chapitre 2**.

Ainsi, la résistance à la compression du BAP léger est calculée à partir des propriétés mécaniques et élastiques du mortier et du module d'élasticité du granulat léger tel que décrit ci-dessus. Le modèle composite granulat/mortier ou modèle série/parallèle est ensuite appliqué à des compositions de bétons auto-plaçants légers de sable normal (BAPLSN) pour confronter les données du modèle aux données mesurées.

4.4.5 Confrontation des données du modèle série/parallèle aux données expérimentales

Le modèle série/parallèle est appliqué pour un jeu de données issues des formules de BAPLSN de nos expérimentations. Pour différents rapports E/L (0,35 ; 0,45 et 0,55) et différents volumes de pâte (350, 400, 415 et 450 l/m^3), neuf compositions de BAPLSN d'argile expansée sont testées. Les valeurs moyennes de résistance à la compression visées sont choisies dans une gamme comprise entre 30 et 50 MPa afin d'avoir une représentativité des résultats vis-à-vis des besoins de l'industrie du béton. Le pré-mouillage des gravillons d'argile expansée est réalisé selon le protocole décrit au **Chapitre 2** et dans des conditions opératoires identiques pour assurer une quasi-homogénéité de l'état de saturation initiale du granulat léger. La demande en eau des gravillons légers pré-mouillés à l'issue de l'essai d'absorption dans la pâte de ciment est nulle. Les détails de compostions sont consignés au **Tableau 4.6**.

La résistance à la compression du BAPLSN est calculée à partir de la résistance à la compression et du module d'élasticité du mortier ainsi que du module d'élasticité du granulat léger. Les données réelles présentées au **Tableau 4.7** sont ensuite comparées aux données calculées pour évaluer la précision du modèle série/parallèle.

Tableau 4.6
Paramètres de composition de BAPLSN

	Composition en kg/m³								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
S	689	717	722	782	730	670	800	736	670
ARG	357	371	373	404	377	346	413	380	346
C	434	393	351	374	432	487	295	336	376
A	136	123	109	117	135	152	92	105	118
E_{tot}	223	248	269	199	224	247	230	256	283
E_{eff}	199	233	254	172	199	224	213	241	269
Sup	0.84	0.41	0.10	0.73	0.86	0.95	0.57	0.21	0.23
Vp	415	415	415	350	400	450	350	400	450
E_{eff}/C	0,46	0,59	0,72	0,46	0,46	0,46	0,72	0,72	0,72
E_{eff}/L	0,35	0,45	0,55	0,35	0,35	0,35	0,55	0,55	0,55
MVR/ Frais	1 887	1 897	1 875	1 926	1 947	1 952	1 884	1 858	1 841

Tableau 4.7
Propriétés des compositions de BAPLSN

	Composition en kg/m³									
	g	g*	Classe liant (MPa)	Eg théo (GPa)	Ep théo (GPa)	Em théo (GPa)	fcm,m théo (MPa)	fcm,b théo (MPa)	fcm,b exp (MPa)	Ecart (MPa)
1	0,402	0,733	52	15	17,1	28,1	62,1	49,0	49,0	0,0
2	0,402	0,733	52	15	11,5	21,9	47,2	41,0	41,0	0,0
3	0,402	0,733	52	15	8,1	17,4	37,0	32,2	31,0	1,2
4	0,469	0,733	52	15	17,1	30,7	64,9	50,5	47,0	3,5
5	0,417	0,733	52	15	17,1	28,6	62,7	51,1	48,0	3,1
6	0,368	0,733	52	15	17,1	26,9	60,9	51,7	48,0	3,7
7	0,469	0,733	52	15	8,1	20,1	38,6	33,0	34,0	-1,0
8	0,417	0,733	52	15	8,1	17,9	37,3	34,3	30,0	4,3
9	0,368	0,733	52	15	8,1	16,2	36,2	35,1	30,0	5,1

La moyenne des écarts du modèle est de **2,2 MPa** sur la **Figure 4.6**. L'erreur varie entre 0 et 17 % avec une erreur moyenne de 6,0 %. Force est de constater que l'écart entre la valeur calculée et la valeur mesurée n'est pas négligeable puisqu'il atteint 5,1 MPa sur certaines compositions. Le modèle majore puisque l'écart entre la valeur théorique et la valeur expérimentale reste positif pour la plupart des compositions. Toutefois, la précision du modèle reste acceptable à l'échelle du béton.

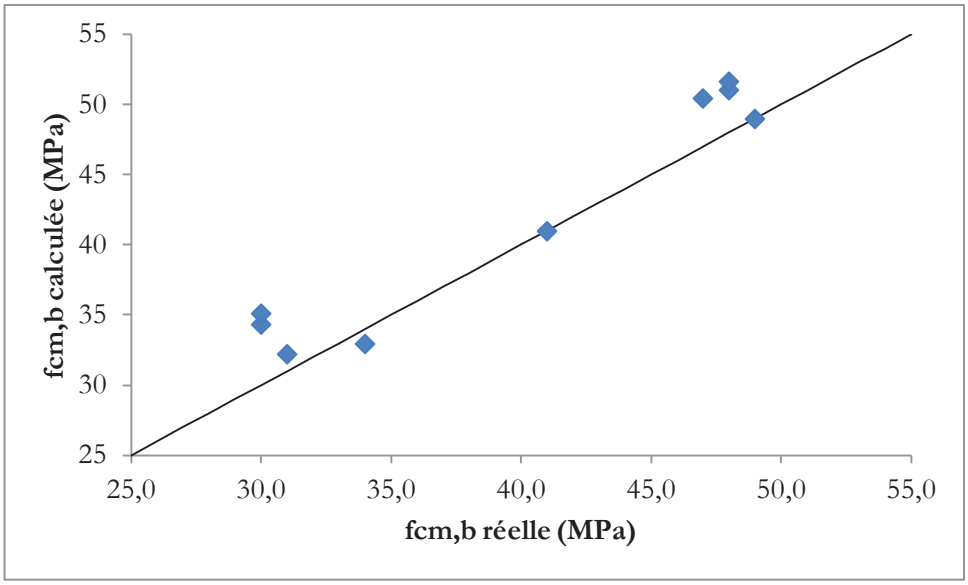


Figure 4.6 Comparaison entre la résistance moyenne mesurée et la prévision du modèle série/parallèle

4.5 Méthode de formulation des BAPLSN basée sur le niveau de serrage du mélange et sur l'optimisation de la demande en eau des granulats légers

Une méthode de formulation est proposée après l'optimisation de l'absorption du granulat léger, la définition d'un critère de contrôle de la ségrégation et la validation du modèle série/parallèle. Cette méthode vise la formation de bétons auto-plaçants légers de structure. Elle est basée sur le contrôle du niveau de serrage du béton frais pour une auto-plaçance adaptée et sur l'optimisation de la demande en eau des granulats légers à partir du protocole d'absorption dans la pâte.

4.5.1 Principe de la méthode de composition

La méthode de composition est itérative et se déroule en deux phases. La première phase consiste à déterminer les quantités relatives des constituants du béton à partir de cinq paramètres que sont :

- le volume de pâte Vp qui pilote l'ouvrabilité du béton. Le volume de pâte est compris entre 350 et 450 l/m^3 de béton pour garantir le caractère auto-plaçant du béton. Plus l'étalement visé est grand plus grand sera le volume de pâte ;
- la concentration de liant ωc qui guide la résistance du mortier et par suite la résistance du béton. Ce paramètre varie entre 0,35 et 0,5 pour couvrir la gamme de résistances souhaitée. La concentration de liant croit avec la résistance du béton ;
- le rapport volumique gravillon/sable V_g/V_s qui pilote en partie la masse volumique réelle du béton et qui définit la proportion relative des constituants granulaires. Ce rapport est arbitrairement pris entre 0,7 et 1,1. A volume de pâte constant, plus le rapport V_g/V_s est élevé plus la masse volumique réelle du béton est faible ;

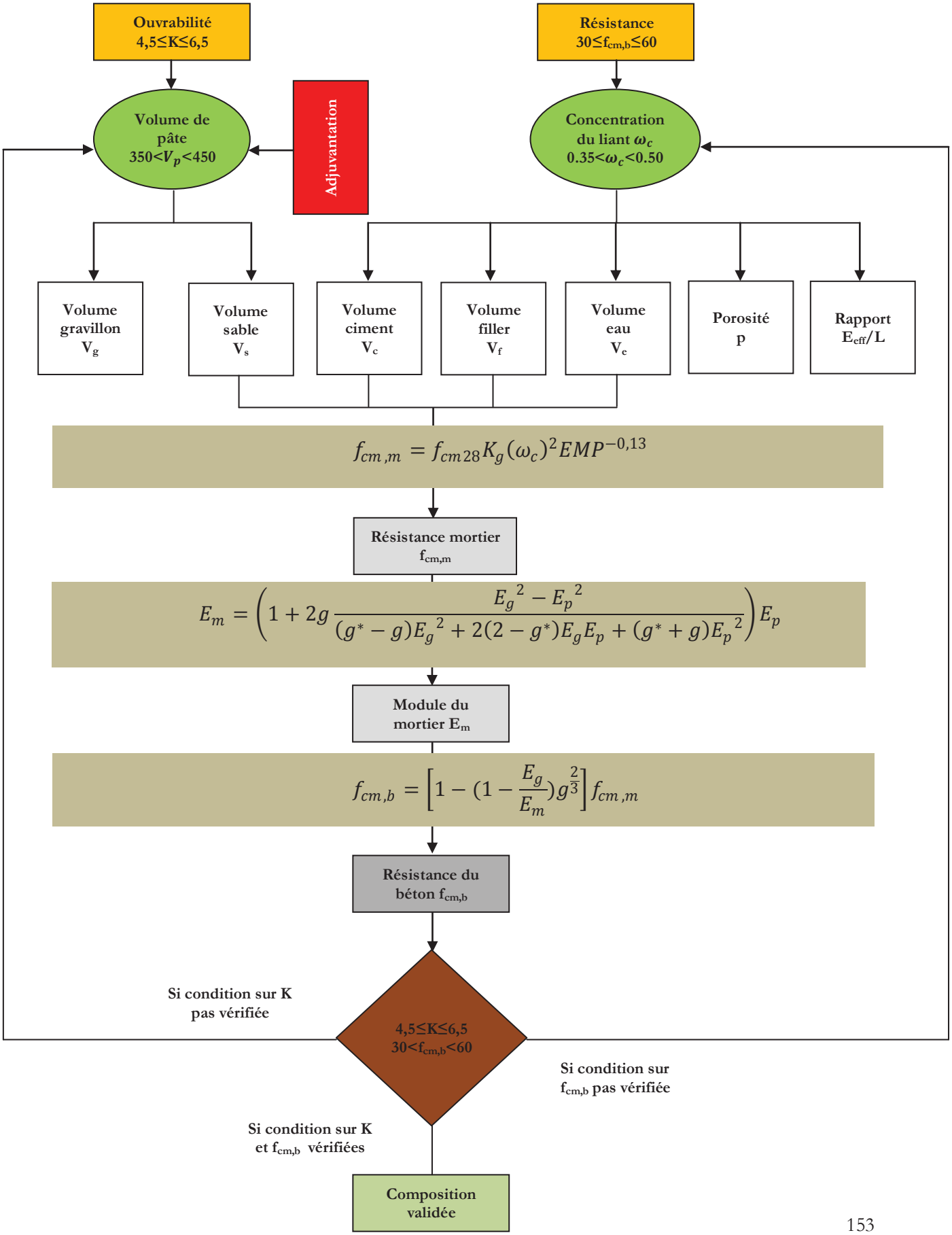
- la proportion volumique d'addition calcaire dans le liant p_f qui permet de limiter le dosage en ciment et de contrôler les propriétés mécaniques et élastiques du mortier de sable normal. Elle est prise entre 0,2 et 0,3 ;
- le volume d'air occlus pris arbitrairement égal à 2 % du volume de béton.

La seconde phase repose sur la vérification de l'aptitude à la ségrégation du mélange. Les données de composition à l'issue de la première phase permettent de calculer l'indice de serrage K du béton. Un indice de serrage compris entre 4,5 et 5,5 permet d'assurer à la fois l'auto-plaçance et la stabilité au béton.

La quantité d'eau d'ajout et la masse des constituants granulaires secs sont corrigées avec la prise en compte de la teneur en eau initiale des granulats. Pour tenir compte de la demande en eau des granulats légers, la quantité d'eau efficace est ajustée à partir de l'absorption à 1 heure dans une pâte de rapport e/c de 0,5.

La quantité de superplastifiant est ajustée au cours du malaxage pour obtenir l'ouvrabilité souhaitée. Pour les différentes compositions de BAPL, le dosage en superplastifiant se situe entre 0,3 et 1,0 % d'extrait liquide rapporté à la masse de liant (ciment et addition) et reste largement en deçà du dosage de saturation autour de 5 % (extrait liquide).

4.5.2 Schéma de synthèse de la méthode



4.5.3 Description de la méthode de composition

4.5.3.1. Données matériaux

Les données sur les matériaux sont celles présentées **paragraphe 2.2** du **Chapitre 2** et qui portent sur le liant, les granulats et l'adjuvant.

4.5.3.2 Les étapes de calcul

La méthode est développée en six étapes qui comprennent le choix des constantes et des variables d'entrée, le dosage des constituants, le calcul des performances des phases, la vérification et la validation de la formule.

Etape 1 : Constantes d'entrée

Les constantes d'entrée sont :

- la proportion de filler $p_f = \frac{V_f}{V_c+V_f}$ dont les valeurs sont choisies entre 0,2 et 0,3 ;
- le rapport gravillons/sable $\frac{V_g}{V_s}$ choisi arbitrairement entre 0,7 et 1,1 ;
- le volume d'air occlus V_a pris égal à 2 % du volume du béton.

Etape 2 : Choix des variables d'entrée V_p et ω_c

« C'est la quantité de pâte qui conditionne l'ouvrabilité » selon (Bernier 2009). Partant de ce constat, le volume de pâte $\mathbf{V_p}$ est associé au niveau de serrage susceptible d'assurer l'auto-plaçabilité et la stabilité du béton léger. Pour les BAPLSN identifiés dans la littérature, le volume de pâte est compris entre 350 et 450 l/m^3 de béton. Selon la classe d'étalement visée, $\mathbf{V_p}$ sera plus proche de 350 ou de 450 l/m^3. A dosage de superplastifiant équivalent, plus le volume de pâte est grand plus le niveau de serrage du béton frais diminue. Dans les systèmes peu adjuvantés, plus l'étalement visé est important plus grande sera la valeur du volume de pâte $\mathbf{V_p}$. Pour être cohérent vis-à-vis des formules de l'industrie du béton, le volume de pâte des BAPL proposées est choisi dans une gamme comprise entre 350 et 450 l/m^3.

De même « c'est la qualité de la pâte qui contrôle la résistance de la pâte et du mortier normal» selon (Bernier 2009). La qualité de la pâte est donnée par la concentration du liant ω_c qui exprime le rapport du volume de liant sur le volume de pâte. Elle s'exprime par la relation ci-dessous.

$$\omega_c = \frac{V_l}{V_l + V_e + V_a} \tag{4-33}$$

V_l volume de liant
V_e volume d'eau
V_a volume d'air occlus

Sur la base des données de synthèse relatives aux propriétés de BAPL présentées par (Papanicolaou and Kaffetzakis 2011) pour une gamme de résistance moyenne à la compression comprise entre 30 et 60 MPa, la valeur de la concentration de liant est prise entre 0,35 et 0,50. Le paramètre $\boldsymbol{\omega_c}$ est inversement proportionnel au rapport E_{eff}/L. Pour des résistances élevées c'est-à-dire des rapports E_{eff}/L faible, la concentration de liant $\boldsymbol{\omega_c}$ est plus élevée.

Etape 3 : Dosage des constituants

Cette étape consiste à exprimer le dosage de chacun des constituants à partir des constantes d'entrée et des variables d'entrée choisies au cours des deux premières étapes.

Volume de granulats

A partir de $350<\mathbf{V_p}<450$, les volumes respectifs de sable et de gravillons sont calculés par les expressions suivantes :

Sable

$$V_s = (1000 - V_p)\frac{1}{1 + \frac{V_g}{V_s}} \tag{4-34}$$

Gravillons

$$V_g = (1000 - V_p)\frac{\frac{V_g}{V_s}}{1 + \frac{V_g}{V_s}} \tag{4-35}$$

Volume du liant

En partant de $0{,}35<\omega_c<0{,}50$, on détermine le volume de ciment et de filler respectivement par les équations suivantes :

Ciment

$$V_c = (1 - p_f)V_p\omega_c \tag{4-36}$$

Filler

$$V_f = p_f V_p \omega_c \tag{4-37}$$

Dosage en eau

Volume d'eau efficace

Le volume d'eau est déduit des calculs précédents. Il s'exprime par la relation :

$$V_{eff} = V_p(1 - \omega_c) - V_a \tag{4-38}$$

Volume d'eau absorbable par les gravillons légers

La demande en eau des gravillons légers est réalisée à partir de l'essai d'absorption dans la pâte. La quantité d'eau absorbable par les gravillons légers est considérée comme étant l'eau absorbée dans une pâte de ciment de rapport e/c égal 0,5 pendant 1 heure W_{gl}. Connaissant le volume du granulat léger V_g, sa masse volumique ρ_g et celle de l'eau ρ_e, le volume d'eau absorbable par les gravillons légers V_{abs} s'écrit :

$$V_{abs} = \frac{V_g \rho_g}{\rho_e} W_{gl} \tag{4-39}$$

Volume d'eau totale

L'eau totale est obtenue par la somme de l'eau efficace et de l'eau absorbable par les gravillons légers d'après la relation :

$$V_{tot} = V_{eff} + V_{abs} \tag{4-40}$$

Adjuvantation

L'adjuvantation du béton est ajustée expérimentalement au cours du malaxage pour obtenir l'ouvrabilité souhaitée. Le dosage de superplastifiant reste toujours en-dessous du dosage de saturation déterminé en amont pour différentes qualités de pâte.

Rapport massique E_{eff}/L

Le rapport E_{eff}/L est calculé d'après l'équation ci-après :

$$E_{eff}/L = \frac{\rho_e\left(V_p(1-\omega_c) - V_a\right)}{\left(\rho_c(1-p_f) + \rho_f p_f\right)V_p \omega_c} \tag{4-41}$$

Porosité du squelette granulaire

La porosité du mélange permet de déduire la compacité réelle du béton frais. Elle est définie par la relation :

$$p = V_p(1-\omega_c) + V_{abs} \tag{4-42}$$

Etape 4 : Calcul des performances mécaniques du mortier et du béton

Le choix d'un volume de pâte donné conduit au dosage de granulats (sables et gravillons) tandis que la concentration de liant permet de définir le dosage du liant et le dosage en eau. A partir du dosage des constituants, la résistance à la compression et le module d'élasticité du mortier ainsi que la résistance à la compression du BAPL sont calculés.

La résistance de la compression et le module d'élasticité du mortier normal sont données respectivement par les équations (4-30) et (4-31). La résistance moyenne à la compression du BAP léger est donnée par la relation (4-26)

Etape 5 : Vérification

La vérification s'effectue sur la valeur de l'indice de serrage du béton frais théorique. L'indice de serrage du béton frais est calculé selon la relation (4-20) telle que la compacité réelle du béton frais soit égale au complémentaire à 1 de la porosité calculée à l'étape 3 par la relation (4-42). La valeur de l'indice de serrage K obtenue est ensuite comparée à la valeur seuil de contrôle de la stabilité du béton frais définie au Paragraphe 4.3.2.

Deux cas se présentent suivant les valeurs de l'indice de serrage K. Si la valeur de K est au dessus du seuil de non ségrégation, la composition théorique est ensuite validée à l'issue des essais de convenance. Sinon les variables d'itération sont modifiées de façon à vérifier les objectifs visés en termes d'auto-plaçance et de résistance à la compression du béton.

Etape 6 : Validation expérimentale de la composition théorique

La composition théorique est validée expérimentalement par des essais de convenance. La masse volumique réelle, la teneur en air occlus et l'étalement sont mesurés. Le dosage en superplastifiant est ajusté expérimentalement de proche en proche au cours du malaxage pour atteindre l'étalement visé. Les données de la composition théorique sont ensuite ajustées pour correspondre aux données de la composition réelle.

4.5.4 Exemple d'application

4.5.4.1 Cahier des charges

Un béton auto-plaçant (BAP) léger de granulat d'argile expansée (ARG 4/8-750) est formulé pour un étalement de 650 ± 10 mm et une résistance moyenne à la compression à 28 jours de 50 ± 2 MPa. L'application de la méthode de composition est détaillée ci-dessous.

4.5.4.2 Mise en œuvre de la méthode

En fixant la proportion de filler calcaire dans le liant P_f, le volume d'air dans le béton V_a et le rapport volumique Vg/Vs, le choix des paramètres itératifs que sont le volume de pâte Vp et la concentration de liant ωc permet de faire tourner l'outil de calcul et de proposer in fine une formule de composition. Pour un volume de pâte donné, il existe un nombre fini de concentrations de liant. Il faut donc trouver par des itérations, la concentration de liant qui satisfasse à la condition de résistance associée à ce volume de pâte. A partir des données présentées dans le **Tableau 4.8**, les différentes étapes de la méthode de compostions sont présentées. La valeur de Vp et de ωc sont obtenues après plusieurs itérations. Les calculs sont effectués pour une unité de volume de béton.

Tableau 4.8
Paramètres d'entrée de l'outil de calcul

Constantes d'entrée			Paramètres itératifs	
Pf	V_g/V_s	Va	Vp	ωc
0,2	1,05	0,02	415	0,47

4.5.4.3 Etapes de calculs

a) Dosage des granulats

Volume de sable

$$V_s = [(1000 - 415) * \frac{1}{1 + 1{,}05}]/1000$$

$$V_s = 0{,}285\ m^3$$

Volume de gravillons

$$V_g = [(1000 - 415) * \frac{1{,}05}{1 + 1{,}05}]/1000$$

$$V_g = 0{,}300\ m^3$$

b) Dosage du liant

Dosage en ciment

$$V_C = [(1 - 0{,}2) * 415 * 0{,}47]/1000$$

$$V_C = 0{,}156\ m^3$$

Dosage en addition calcaire

$$V_f = [0{,}2 * 415 * 0{,}47]/1000$$

$$V_f = 0{,}039\ m^3$$

c) Dosage en eau

Eau efficace

$$V_{eff} = (1 - 0{,}47) * 415/1000 - 0{,}02$$

$$V_{eff} = 0{,}200\ m^3$$

Eau absorbable par les granulats légers

La demande en eau des gravillons légers est ajustée avec la quantité d'eau absorbée à 1 heure dans une pâte de rapport e/c de 0,5. Le résultat indique que le granulat pré-mouillé d'une teneur en eau initiale de 11,7 % (en masse) n'absorbent pas d'eau dans la pâte à 1 heure. Le volume d'eau absorbable par le granulat léger pré-mouillé est donc égal à zéro et la demande en eau est nulle.

Rappelons que la quantité d'eau d'ajout est calculée en tenant compte de la teneur en eau initiale des granulats (sable et gravillons).

d) Rapport massique E_{eff}/L

$$E_{eff}/_{L} = \frac{1000 * ({}^{415 * (1 - 0{,}47)}/_{1000} - 0{,}02)}{(3160 * (1 - 0{,}2) + 2700 * 0{,}2) * {}^{415 * 0{,}47}/_{1000}}$$

$$E_{eff}/_{L} = 0{,}33$$

e) Dosage du superplastifiant

Le dosage en superplastifiant est réalisé de proche en proche au cours du malaxage pour atteindre l'étalement visé. Un dosage de 1,06 % en extrait liquide rapporté à la masse du liant a permis d'atteindre l'étalement moyen de 650 mm.

4.5.4.4 Vérification

La vérification consiste à calculer l'indice du serrage de la composition théorique. L'indice de serrage du béton qui en résulte est égal à 5,0. Cette valeur d'indice de serrage compris dans l'intervalle 4,5 et 5,5 ce qui assure une auto-plaçance et une stabilité au béton. Le récapitulatif de la composition est présenté au **Tableau 4.9**.

Tableau 4.9
Récapitulatif de la composition en kg/m³

C	AC	SIL	ARG 4/8-750	SP	E_{tot}	E_{eff}	E_{abs}	E_{eff}/L
493	105	758	375	1,27	200	200	0	0,33

4.5.4.5 Validation

L'étalement moyen obtenu est de 650 mm. L'ajustement de l'adjuvantation est réalisé pour atteindre l'ouvrabilité souhaitée. La résistance moyenne à la compression mesurée sur des éprouvettes cubiques 15*15 cm est 50 ± 3 MPa.

Les résultats obtenus à partir de cet exemple d'application indiquent que la méthode de formulation est satisfaisante par rapport aux critères d'auto-plaçance et de performance mécanique.

En somme, la méthode de composition repose sur des fondements physiques tirés de la littérature et adaptés aux spécificités des BAPL. L'essai d'absorption dans la pâte apporte une touche singulière et permet de réduire judicieusement la quantité d'eau libre tout en conservant le caractère auto-plaçant du béton quel que soit le type de granulat léger. C'est pourquoi elle se distingue comme la méthode de formulation basée sur l'optimisation de l'absorption des granulats légers à l'instar de celles basées sur l'optimisation de la pâte (méthode de Su and Miao 2003), du mortier (méthode de Okamura and Ozawa 1995) et du squelette granulaire (méthode de Sedran et De Larrard 1994).

4.6 Conclusion

La méthode de formulation proposée est une méthode itérative qui repose sur deux paramètres-clefs que sont le volume de pâte et la concentration de liant. Le volume de pâte associé à la quantité de pâte pilote l'ouvrabilité du matériau tandis que la concentration de liant associée à la qualité de pâte contrôle la résistance du béton.

Le niveau de serrage du squelette granulaire est adapté par le bais du modèle d'empilement compressible pour contrôler le caractère auto-plaçant au béton léger. L'application de ce modèle sur des compositions issues de l'industrie a permis de délimiter un intervalle d'intérêt de valeurs d'indice de serrage compatible avec les bétons auto-plaçants légers de sable normal faiblement adjuvantés. Un indice de serrage compris entre 4,5 et 5,5 permet de limiter le risque de ségrégation tout en garantissant le caractère auto-plaçant du béton.

La méthode de composition dans sa constitution a fait appel au modèle série/parallèle pour l'estimation de la résistance à la compression du béton après validation sur des compositions exploratoires. La confrontation des données réelles et des données du modèle indique que l'erreur moyenne du modèle est 6,0 % ; ce qui est satisfaisant à l'échelle du béton.

L'optimisation de la demande en eau des granulats légers est rendu possible par la mise en œuvre du protocole d'absorption dans la pâte de ciment sur des granulats légers pré-mouillés. Cet essai a permis de montrer que l'absorption des granulats pré-mouillés dans la pâte de ciment est nulle et par conséquent leur demande en eau dans le béton est considérée comme nulle.

Chapitre 5

Validation expérimentale de la méthode de formulation

Sommaire

5.1 Introduction 163

5.2 Cahier des charges 163

5.3 Composition et mise en œuvre des bétons du cahier des charges 165
5.3.1 Validation de la méthode de formulation 165
5.3.1.1 Compositions des bétons auto-plaçants légers de sable normal (BAPLSN) 166
5.3.1.2 Propriétés à l'état frais 168
5.3.1.3 Propriétés à l'état durci 169
5.3.1.4 Bilan de la mise en œuvre de la méthode formulation 170
5.3.2 Formulation des bétons de la famille BAPL I 170
5.3.2.1 Présentation des compositions 171
5.3.2.2 Propriétés à l'état frais 173
5.3.2.3 Propriétés à l'état durci 173
5.3.2.4 Bilan sur la formulation des bétons de la famille BAPL I 174
5.3.3 Formulation des bétons de la BAPL II 174
5.3.3.1 Synthèse et analyse des résultats de la première étape 175
5.3.3.2 Synthèse et analyse des résultats de la seconde étape 179
5.3.3.3 Bilan sur la formulation des bétons de la famille BAPL II 183
5.3.4 Formulation des BAPL III 184
5.3.4.1 Présentation des compositions 184
5.3.4.2 Propriétés à l'état frais 186
5.3.4.3 Propriétés à l'état durci 187
5.3.4.4 Propriétés de durabilité 188
5.3.4.5 Bilan sur la formulation des bétons de la famille BAPL III 189

5.4 Confrontation des résultats expérimentaux des BAPLSN avec les modèles de la littérature 188
5.4.1 Rapport entre la masse volumique sèche et la masse volumique réelle à l'état frais 189
5.4.2 Estimation de la résistance à la compression de BAPLSN 191
5.4.3 Estimation du module d'élasticité 193

5.5 Formulation des bétons auto-plaçants légers de sable léger (BAPLSL) 195
5.5.1 Particularité des bétons de sable léger 196
5.5.2 Approche de formulation 197
5.5.2.1 Contrôle de l'ouvrabilité et de la résistance 197
5.5.2.2 Contrôle de la ségrégation 198
5.5.3 Synthèse et analyse des résultats 198
5.5.3.1 Compostions des BAPL de sable léger 198
5.5.3.2 Compositions de mortier et pâte 198
5.5.3.3 Propriétés à l'état frais 200
5.5.3.4 Propriétés à l'état durci 202
5.5.3.5 Bilan sur la formulation des BAPLSL de la famille BAPL I 203

5.6 Conclusion 204

5.1 Introduction

La méthode de formulation est élaborée pour mieux appréhender l'effet de l'absorption étroitement liée à la porosité des granulats légers et la nette propension à la ségrégation des granulats légers du fait de leur légèreté comparée à la matrice cimentaire.

L'adaptation du niveau de serrage du béton frais à l'aide du modèle d'empilement compressible et l'optimisation de la demande en eau des granulats légers à l'aide du protocole d'absorption dans la pâte ont permis la mise au point d'une méthode de composition. La validation et la mise en œuvre de cette méthode vont permettre de proposer des formules de bétons auto-plaçants légers (BAPL) dont les propriétés sont conciliables avec les objectifs du cahier des charges.

La résistance à la ségrégation des BAPL est vérifiée de façon théorique par le seuil de stabilité défini et de façon expérimentale par l'indice de ségrégation à l'aide de l'essai à la colonne. Pour contrôler la teneur en eau initiale des granulats légers et limiter le raidissement précoce du béton dans la période dormante, un protocole de pré-mouillage a été élaboré et appliqué dans la préparation des BAPL.

Ce chapitre présente la démarche adoptée pour proposer des bétons appartenant aux trois familles de BAPL et expose les caractéristiques à l'état frais et à l'état durci des bétons formulés. Les propriétés des BAPL sont ensuite analysées et comparées aux objectifs du cahier des charges en termes de masse volumique réelle sèche et de résistance moyenne à la compression.

5.2 Cahier des charges

Les bétons auto-plaçants de masse volumique normale (BAPN) sont utilisés pour réaliser différents types de produits préfabriqués. On peut citer notamment les panneaux et voiles verticaux (panneaux de façade, encadrements de portes et fenêtres, encadrements de baies…), les éléments de structure (poteaux précontraints, poutres, poutrelles, dalles, appuis, pré-linteaux, caissons précontraints, longrines…), d'assainissement (cunettes, fonds de regard, cuves et citernes…), de génie civil (bordures, glissières de sécurité, chambres d'éclairage public, gradins…).

L'objectif industriel de cette thèse est de pourvoir réaliser les mêmes types de produits avec des BAPL capables de développer des performances mécaniques similaires en particulier au jeune âge à celles des BAPN, sans surcout important.

Les travaux expérimentaux portent sur le développement de trois familles de bétons auto-plaçants légers (BAPL) comme l'indique le **Tableau 5.1**. Les deux premières familles sont destinées aux produits en béton armé tandis que la troisième s'intéresse aux produits précontraints. La première famille comprend des BAPL de masse volumique réelle sèche de 1 500 kg/m^3 avec une résistance moyenne à la compression à 28 jours de 35 MPa. La deuxième famille de BAPL regroupe des bétons de masse volumique réelle sèche de 1 800 kg/m^3 dont les résistances moyennes à 1 et 28 jours sont respectivement de 25 et 50 MPa. La troisième famille plus performante sur le plan mécanique est constituée de BAPL de masse volumique réelle sèche

autour de 2 000 kg/m^3 et mobilisant des résistances moyennes à 1 et 28 jours respectivement de 30 et 60 MPa.

Tableau 5.1
Familles de BAPL avec les masses volumiques réelles sèches et les résistances moyennes à la compression visées

N° Famille	Masse volumique réelle sèche (kg/m^3)	Résistance moyenne à la compression (MPa)	
		1j	28j
BAPL I	1 500	-	35
BAPL II	1 800	25	50
BAPL III	2 000	30	60

Le cahier des charges est décliné sous forme de critères et de paramètres dans la mise en œuvre de la méthode de formulation. Le choix des critères est dicté par la nécessité de satisfaire aux objectifs industriels en termes d'auto-plaçance, de résistance à la ségrégation, de légèreté et de performance mécanique. Les critères et paramètres de validation sont présentés au **Tableau 5.2**.

Tableau 5.2
Critères et paramètres de validation de la méthode de formulation des BAPL

Critère	Paramètre	Valeur
Auto-compactibilité	K	$K \leq 6,5$
Prévention de la ségrégation	K	$K \geq 4,5$
Vérification de la ségrégation	Iseg	≤ 5 %
Volume de pâte (l)	Vp	$350 < Vp < 450$
Concentration du liant	ωc	$0,35 < \omega c < 0,50$
Aptitude à l'auto-nivellement (mm)	SF	$600 < SF < 850$
Aptitude au remplissage (s)	Tv	$1 < T_v < 25$
Aptitude au blocage	PL	$0,80 < PL < 0,95$
Masse volumique réelle sèche (kg/m^3)	MVR	$1\,500 < MVR < 2\,000$
Résistance moyenne à la compression à 28 j (MPa)	fcm,b	$30 < fcm,b < 60$

En s'appuyant sur les caractéristiques des constituants et la méthode de formulation développée, des formules de BAPL sont simulées et réalisées sur un type de granulat d'argile expansée de classe granulaire 4/8 mm (ARG 4/8-750) et un type de granulat d'ardoise expansée de classe granulaire 4/8 mm (SCH 4/8-780). Ces compositions sont ensuite caractérisées à l'état frais et à l'état durci pour valider la mise en œuvre de la méthode de composition.

5.3 Composition et mise en œuvre des bétons du cahier des charges

Les bétons auto-plaçants légers de sable normal (BAPLSN) sont testés et caractérisés. Ce sont des bétons dans lesquels les gravillons traditionnels sont totalement remplacés par des gravillons légers.

La teneur en eau efficace des BAPLSN est dorénavant définit comme la différence entre l'eau totale contenue dans le béton frais et la quantité d'eau absorbée à 1 heure par les granulats dans la pâte de ciment de rapport e/c de 0,5. La quantité d'eau absorbée dans la pâte est déduite du coefficient d'absorption à 1 heure dans la pâte selon le protocole détaillé au **Paragraphe 3.2** du **Chapitre 3**.

Les gravillons légers sont pré-mouillés à 5 minutes (avec une quantité d'eau équivalente à l'absorption à 24 heures) selon la procédure décrite au **Chapitre 2** avant leur introduction dans le béton. A l'issue du pré-mouillage, les granulats légers atteignent une teneur en eau donnée. Cette teneur en eau initiale se décompose en une absorption volumique et une teneur en eau de surface. Le pré-mouillage à 5 minutes conduit à une absorption volumique faible (7,1 % soit 24 % de l'absorption totale sous vide pour l'ARG 4/8-750) et une teneur en eau de surface importante (4 % soit 100 % de l'absorption dans la pâte de ciment à 5 minutes pour l'ARG 4/8-750).

Nous rappelons que les granulats pré-mouillés n'absorbent pas d'eau dans la pâte à 1 heure. La demande en eau des granulats d'argile expansée et d'ardoise expansée pré-mouillés est donc nulle. Les granulats légers à l'issue du pré-mouillage n'absorbent pas d'eau dans la pâte de ciment. Ainsi, la teneur en eau efficace équivaut à la quantité d'eau totale contenue dans le béton frais à l'issue du malaxage.

Il est important de souligner que la quantité d'eau d'ajout du mélange tient compte non seulement de la quantité d'eau apportée par l'adjuvant mais aussi de la teneur en eau de surface des granulats (sable normal et gravillons légers).

La procédure de malaxage est celle décrite au **Chapitre 2**. Le temps de malaxage est d'environ 30 minutes.

5.3.1 Validation de la méthode de formulation

La validation de la méthode de composition est réalisée à partir de trois formules de bétons auto-plaçants légers de sable normal (BAPLSN). Les formules sont testées sur des granulats légers pré-mouillés d'argile expansée. D'une composition à l'autre, le volume de pâte est maintenu constant à 415 litre/m^3 de béton. Le rapport volumique gravillons/sable est maintenu à 1,10 pour contrôler la masse volumique réelle. Les rapports E_{eff}/L sont de 0,39 ; 0,48 et 0,58 pour les différentes compositions. Le dosage en superplastifiant est ajusté expérimentalement de façon à obtenir un mélange homogène et stable présentant l'étalement le plus important.

Les BAPLSN sont caractérisés à l'état frais par l'étalement au cône et par l'indice de ségrégation à l'aide de l'essai à la colonne. A l'état durci, la masse volumique réelle sèche, la résistance moyenne à la compression et le module d'élasticité à 28 jours des bétons sont mesurés.

5.3.1.1 Compositions des bétons auto-plaçants légers de sable normal (BAPLSN)

La composition réelle des BAPLSN est établie à partir des quantités réelles de constituants entrées dans le malaxeur pour la gâchée et la masse volumique réelle mesurée à l'état frais. Le **Tableau 5.3** donne les compositions réelles des bétons. Le dosage en ciment des compositions se situe entre 350 et 450 kg/m^3. La concentration en liant est comprise entre 0,35 et 0,50. La proportion volumique des gravillons légers est maintenue autour de 30 %. Le dosage en superplastifiant est de 0,75 % ; 0,40 % et 0,10 % d'extrait liquide (rapporté à la masse de liant) respectivement pour les rapports E_{eff}/L de 0,39 ; 0,48 et 0,58.

Les compositions des mortiers et des pâtes sont déduites des compositions réelles de béton. Le mortier et la pâte gardent le même rapport E_{eff}/L que celui du béton correspondant. Les **Tableaux 5.4** et **5.5** donnent la composition théorique des mortiers de sable normal et des pâtes. La proportion volumique de sable normal dans les mortiers est de 39 % par unité de volume et celles du ciment dans les pâtes sont comprises entre 28 et 35 % par unité de volume de pâte.

Les compositions réelles des BAPLSN indiquent une quantité de superplastifiant relativement faible par rapport au dosage de saturation estimé à 1 % d'extrait sec soit 5 % d'extrait liquide. Ce constat peut être lié à la quantité de pâte et au pré-mouillage des gravillons légers. Le volume de pâte est fixé à 415 l/m^3 après des d'essais préliminaires afin de garantir un étalement suffisant tout en minimisant la quantité de superplastifiant. Le superplastifiant reste un constituant couteux rapporté au prix du béton (entre 10 et 20 % du prix au m^3 du béton léger) et son usage mérite d'être optimisé pour proposer des formules de bétons auto-plaçants légers plus économiques.

Le pré-mouillage a certainement contribué à limiter la quantité de superplastifiant. Avec une teneur en eau de surface estimée à 4 % (rapporté à la masse sèche de gravillons légers), les gravillons pré-mouillés limitent le raidissement et participent plutôt à l'ouvrabilité du béton comme nous avions pu le montrer dans le **Chapitre 3** à partir de mélanges pâte/gravillons.

Tableau 5.3
Compostions réelles de BAPLSN

	N°	C (kg)	AC (kg)	SIL (kg)	ARG 4/8-750 (kg)	Vg (%)	SP (kg)	E_{eff} (kg)	E_{eff}/L	Vp (l)	ω_c
BAPLSN	B1	434	136	689 (4,0)	357 (12,2)	29	0,84	223	0,39	415	0,49
	B2	393	123	717 (2,9)	371 (11,1)	30	0,41	248	0,48	415	0,42
	B3	351	109	722 (2,9)	373 (12,1)	30	0,10	269	0,58	415	0,37

() Teneur en eau des granulats exprimée en pourcentage de masse sèche

Tableau 5.4
Compositions théoriques des mortiers de BAPLSN

	N°	C (kg)	AC (kg)	SIL (kg)	Vs (%)	SP (kg)	E_{eff} (kg)	E_{eff}/L
BAPLSN	MB1	647	202	1 028	39	1,25	333	0,39
	MB2	572	179	1 042	39	0,59	360	0,48
	MB3	508	158	1 044	39	0,14	388	0,58

Tableau 5.5
Compositions théoriques des pâtes de BAPLSN

	N°	C (kg)	AC (kg)	Vc (%)	SP (kg)	E_{eff} (kg)	E_{eff}/L
BAPLSN	PB1	1 120	350	35	2,17	542	0,39
	PB2	975	306	31	1,01	592	0,48
	PB3	888	277	28	0,25	639	0,58

5.3.1.2 Propriétés à l'état frais

Les propriétés génériques telles que la masse volumique réelle (MVR), la teneur en air occlus et l'affaissement au cône d'Abrams sont déterminés. La stabilité des bétons auto-plaçants légers de sable normal (BAPLSN) est qualifiée par l'indice de ségrégation mesuré à l'aide de l'essai à la colonne. Le **Tableau 5.6** présente les propriétés à l'état frais des BAPLSN testés.

La masse volumique réelle (MVR) se situe autour de 1 900 kg/m^3. La teneur en air mesurée au roll-a-meter se situe entre 1,7 et 2,4 % lorsque le rapport E_{eff}/L passe de 0,58 à 0,39. L'étalement passe de 555 à 595 mm lorsque l'indice de serrage noté K varie de 4,8 à 3,7. Il est à noter que l'indice de serrage des compositions reste inférieur à 5,5 du fait du niveau de serrage associé au volume de pâte de 415 l.

L'indice de ségrégation noté Iseg des compositions est inférieur à 5 % à l'exception de la composition B3 dont la valeur est de 7,8 %.

La classe d'étalement des bétons B1, B2 et B3 est de type SF1 (étalement compris entre 550 et 650 mm). Les résultats semblent indiquer que l'étalement augmente lorsque le rapport E_{eff}/L augmente. Par ailleurs, l'indice de serrage augmente avec le dosage en superplastifiant à volume de pâte équivalent.

Le contrôle de la résistance à la ségrégation à partir de la valeur seuil d'indice de serrage de 4,5 semble être un bon compromis pour donner le caractère auto-plaçant et assurer la stabilité du béton à l'état frais. Les compositions B1 et B2 dont l'indice de serrage est proche de 4,5 ne présente pas de signe visible de ségrégation. Ce constat est confirmé par un indice de ségrégation à la colonne inférieur à 5 % pour ces deux bétons. En revanche, la composition B3 de rapport E_{eff}/L égal à 0,58 est plus sensible à la ségrégation avec un indice de serrage de 3,7 soit un indice inférieur à 4,5. Ce résultat semble être corroboré par un indice de ségrégation à la colonne de 7,8 % qui indique que le risque de ségrégation est important.

Tableau 5.6
Propriété à l'état frais des BAPLSN

	N°	MVR (kg/m^3)	Tair (%)	SF (mm)	K	Iseg (%)
BAPLSN	B1	1 887	8,0/2 ,4	555	4,8	3,5
	B2	1 897	7,8/2,3	565	4,1	3,8
	B3	1 875	7,0/1,7	595	3,7	7,8

Tair : aéromètre/roll-a-meter

Un rapport E_{eff}/L élevé peut donc augmenter le risque de ségrégation des BAPLSN. Le choix des paramètres de composition tels que le rapport E_{eff}/L et le volume de pâte sera prépondérant pour proposer des formules de bétons des différentes familles.

5.3.1.3 Propriétés à l'état durci

La masse volumique réelle sèche, la résistance moyenne à la compression et le module d'élasticité des BAPLSN sont présentés au **Tableau 5.7**. La masse volumique réelle sèche se situe entre 1 690 et 1 785 kg/m^3. La résistance moyenne à la compression à 28 jours évolue de 31 à 49 MPa lorsque le rapport E_{eff}/L passe de 0,58 à 0,39. Le module d'élasticité passe de 17,5 à 23,5 GPa pour les mêmes rapports.

Les bétons appartiennent à la classe de masse volumique D1.8 (masse volumique réelle sèche comprise entre 1 600 et 1 800 kg/m^3) au sens de la norme NF EN 206-1 CN.

A partir de la résistance moyenne du béton (f_{cm}), la résistance caractéristique (f_{ck}) est déterminée en première approximation par la relation suivante :

$$f_{cm} = f_{ck} + 8\,MPa$$

Ainsi, la classe de résistance des bétons B1, B2 et B3 est respectivement de LC35/38, LC30/33 et LC20/22.

Tableau 5.7
Propriétés physiques et mécaniques des BAPLSN

	N°	MVR sèche (kg/m^3)	fcm,cube (MPa)		E_b (GPa)
			1j	28j	28j
BAPLSN	B1	1 785	26	49	23,5
	B2	1 735	15	41	19,0
	B3	1 690	7	31	17,5

L'essai de fendage est réalisé sur des éprouvettes cylindriques de BAPLSN afin de visualiser l'homogénéité du matériau après la mise en place. La **Figure 5.1** montre la répartition des gravillons légers dans la matrice cimentaire pour les différentes compositions. La distribution des gravillons légers dans le B3 est beaucoup moins uniforme que dans les bétons B1 et B2. Cette observation corrobore les constats à l'état frais sur le risque de ségrégation et valide la pertinence des indicateurs (K et Iseg) ainsi que les critères de ségrégation ($K \geq 4,5$ et $Iseg \leq 5$ %) pour contrôler la stabilité des BAPLSN.



B1 *B2* *B3*

Figure 5.1 Distribution des gravillons dans le mortier des bétons B1, B2 et B3

5.3.1.4 Bilan de la mise en œuvre de la méthode formulation

La validation de la méthode de formulation basée sur le niveau de serrage du béton frais et sur l'absorption dans la pâte des granulats légers montre des résultats satisfaisants. La méthode a permis d'obtenir des bétons auto-plaçants légers (BAPL) dont la masse volumique réelle sèche et la résistance à la compression sont proches des gammes visées dans le cahier des charges.

Cependant le choix des paramètres de compositions tels que le volume de pâte, le rapport E_{eff}/L revêt une grande importance puisqu'ils conditionnent d'une part à l'état frais, l'ouvrabilité et la stabilité du mélange et d'autre part à l'état durci, la légèreté et les performances mécaniques du BAPL.

Le contrôle de la résistance à la ségrégation de BAPL à partir d'une valeur seuil d'indice de serrage est validé par les résultats de l'essai à la colonne dont est issu l'indice de ségrégation. Les résultats montrent que le béton dont l'indice de serrage est inférieur à 4,5 et dont l'indice de ségrégation est supérieur à 5 % peut présenter un risque important d'hétérogénéité. Ce constat est d'ailleurs confirmé par des essais de fendage à l'état durci.

Nous nous appuierons sur les résultats de la validation de la méthode de composition pour la formulation des trois familles de BAPL. Ainsi, la composition B3 va servir de base pour la formulation des bétons de la famille BAPL I tandis que les bétons B1 et B2 seront exploités pour proposer les bétons de la famille BAPL II. Le retour d'expérience sur les deux premières familles servira de base pour la mise au point des formules de la famille BAPL III qui vise un niveau de résistance plus élevé.

5.3.2 Formulation des bétons de la famille BAPL I

L'objectif de cette partie est de proposer une gamme de bétons auto-plaçants légers de masse volumique réelle sèche autour de 1 500 kg/m^3 avec une résistance moyenne à la compression à 28 jours de 35 MPa. En s'appuyant sur les résultats de la formule B3, trois formules de bétons

auto-plaçants légers de sable normal (BAPLSN) sont simulées et réalisées. La concentration en liant ω_c est maintenue constant autour de 0,37 (soit un rapport E_{eff}/L maintenu autour de 0,58) proche de celle du béton B3 et le volume de pâte V_p varie de 350 à 450 l/m^3. L'étalement et la résistance à la compression à 28 jours des bétons sont mesurés et analysés par rapport aux objectifs du cahier des charges.

5.3.2.1 Présentation des compositions

Les formules sont réalisées avec des gravillons légers d'argile expansée de type ARG 4/8-750. La composition réelle des BAPLSN proposés est présentée au **Tableau 5.8**. Le dosage en ciment évolue de 295 à 376 kg/m^3 lorsque le volume de pâte passe de 350 à 450 l/m^3. La proportion volumique de granulats d'argile expansée varie de 33 à 28 % pour les mêmes volumes de pâte. Le dosage en superplastifiant est relativement faible. Il est compris entre 0,24 et 0,75 % d'extrait liquide (rapporté à la masse de liant).

Les **Tableaux 5.9 et 5.10** présentent respectivement les compositions théoriques des mortiers et des pâtes dans les BAPL I. La proportion volumique de sable normal dans les mortiers passe de 46 à 36 % lorsque le volume de pâte évolue de 350 à 450 l/m^3. La proportion volumique de ciment reste quasiment constante autour de 28 % dans la pâte.

Tableau 5.8
Compositions réelles des bétons de la famille BAPL I

	N°	C (kg)	AC (kg)	SIL (kg)	ARG 4/8-750 (kg)	Vg (%)	SP (kg)	E_{tot} (kg)	E_{eff}/L	Vp (l)	ωc
	B4	295	92	800 (3,7)	413 (11,6)	33	0,57	230	0,59	350	0,37
BAPL I	B5	336	105	736 (3,0)	380 (10,6)	30	0,21	256	0,58	400	0,37
	B6	376	118	670 (3,9)	346 (12,8)	28	0,23	283	0,57	450	0,37

Tableau 5.9
Compositions théoriques des mortiers dans les bétons de la famille BAPL I

	N°	C (kg)	AC (kg)	SIL (kg)	Vs (%)	SP (kg)	E_{eff} (kg)	E_{eff}/L
	MB4	448	140	1 215	46	0,86	349	0,59
BAPL I	MB5	495	155	1 085	41	0,30	378	0,58
	MB6	538	169	960	36	0,34	406	0,57

Tableau 5.10
Compositions théoriques des pâtes dans les bétons de la famille BAPL I

	N°	C (kg)	AC (kg)	Vc (%)	SP (kg)	E_{eff} (kg)	E_{eff}/L
	PB4	864	271	27	1,66	642	0,59
BAPL I	PB5	869	272	28	0,53	638	0,58
	PB6	869	272	28	0,54	635	0,57

5.3.2.2 Propriétés à l'état frais

La masse volumique réelle, la teneur en air occlus et l'étalement des bétons de la famille BAPL I sont présentés au **Tableau 5.11**. Les valeurs d'étalement sont respectivement de 445, 530 et 750 mm pour des volumes de pâte de 350, 400 et 450 l/m^3. Une variation logique de l'étalement est observée avec l'augmentation du volume de pâte. L'augmentation du volume de pâte permet d'améliorer le caractère auto-plaçant des bétons.

Ces résultats indiquent que l'objectif vis-à-vis de l'auto-plaçance est atteint pour les bétons B5 et B6 dont les volumes de pâte sont respectivement de 400 et 450 l/m^3. Les classes d'étalement des bétons B5 et B6 sont respectivement SF1 et SF2. En revanche le béton B4 avec un volume de pâte de 350 l/m^3 n'est pas auto-plaçant sans doute du fait d'un volume de pâte insuffisant.

Tableau 5.11
Propriétés à l'état frais des bétons de la famille BAPL I

Famille	N°	MVR (kg/m^3)	Tair (%)	SF (mm)	K
BAPL I	B4	1 884	9,5/4,1	445	4,7
	B5	1 858	10,0/3,3	550	4,0
	B6	1 841	8,6/2,6	750	3,4

Tair : aéromètre/roll-a-meter

5.3.2.3 Propriétés à l'état durci

Le **Tableau 5.12** présente la masse volumique réelle sèche et la résistance moyenne à la compression à 28 jours des BAPL I. La masse volumique réelle sèche diminue et passe 1 690 à 1 590 kg/m^3 lorsque la proportion volumique de sable normal passe 46 à 36 %. La résistance moyenne à la compression est de 34 MPa pour le béton B4 et de 30 MPa pour les bétons B5 et B6. La **Figure 5.2** montre une distribution homogène des gravillons légers dans la matrice des trois bétons.

Tableau 5.12
Propriétés physiques et mécaniques des BAPL I

Famille	N°	MVR sèche (kg/m^3)	fcm,cube (MPa)
BAPL I	B4	1 690	34
	B5	1 650	30
	B6	1 590	30

Ces résultats indiquent que les bétons proposés pour la famille BAPL I ont une masse volumique réelle sèche supérieure à 1 500 kg/m^3 même si le critère de résistance est atteignable.



B4	B5	B6

Figure 5.2 Distribution des gravillons légers dans les matrices des bétons de la famille BAPL I

5.3.2.4 Bilan sur la formulation des bétons de la famille BAPL I

Les formules de bétons de la famille BAPL I ont une masse volumique réelle sèche supérieure à 1 500 kg/m^3 et une résistance à compression à 28 jours proche de l'objectif de 35 MPa. Ces résultats indiquent que les formules proposées ne satisfont pas pleinement aux objectifs en termes de masse volumique réelle sèche même si la formule B6 affiche une masse volumique réelle sèche de 1 590 kg/m^3 qui n'est pas trop éloignés de l'objectif. Les résultats laissent à penser qu'en augmentant le rapport gravillons/sable et en diminuant le rapport E_{eff}/L nous parviendrons à diminuer la masse volumique réelle et à élever la résistance à la compression pour satisfaire aux critères de cette famille.

L'autre piste explorée est de tester des bétons auto-plaçants légers de sable léger (BAPLSL) pour cette famille de bétons. Les BAPLSL donnent l'avantage d'être plus légers que les BAPLSN et offrent la possibilité de proposer des bétons de masse volumique réelle plus faible que 1 500 kg/m^3. Cependant, ils présentent l'inconvénient d'être plus ségrégeants et par conséquent, le risque d'hétérogénéité est plus accru. C'est pourquoi, la méthode de formulation et les paramètres de composition vont être adaptés pour proposer de nouveaux bétons de sable léger compatibles avec les critères de la famille BAPL I. La démarche de formulation des BAPLSL est exposée plus loin dans le **Paragraphe 5.5**.

5.3.3 Formulation des bétons de la famille BAPL II

Rappelons que les bétons de la famille BAPL II pour être satisfaisants doivent présentés une masse volumique réelle sèche de 1 800 kg/m^3 et une résistance moyenne à la compression à 28 jours de 50 MPa. La formule B1 développée dans phase de validation de la méthode présente des propriétés proches de ces critères. Ainsi, pour atteindre un niveau de résistance plus élevé que celui des bétons de la famille BAPL I, nous avons choisi une concentration de liant de 0,49 proche de celle de la formule B1 (soit un rapport E_{eff}/L constant autour de 0,4). La formulation des bétons de la famille BAPL II s'est déroulée en deux étapes.

La première étape a consisté à simuler trois bétons (noté B7, B8 et B9) dont les volumes respectifs sont 350, 400 et 450 l/m^3. Les compositions sont réalisées avec des gravillons légers d'argile expansée. A l'issue de cette étape, des enseignements sont tirés afin de proposer des améliorations.

La seconde étape a consisté à fixer le volume de pâte à 415 l/m^3 et à augmenter la quantité de superplastifiant pour garantir l'ouvrabilité désirée. Deux compositions dont l'une d'argile expansée (notée B10) et l'autre d'ardoise expansée (notée B11) pour réalisées. La synthèse des résultats est présentée et analysée pour chacune des deux étapes.

5.3.3.1 Synthèse et analyse des résultats de la première étape

Trois compositions sont réalisées et caractérisées à l'état frais et l'état durci. L'étalement, la masse volumique réelle sèche et la résistance moyenne à la compression à 28 jours sont analysés par rapport aux objectifs de la famille BAPL II.

a) Présentation des compositions

Le **Tableau 5.13** présente les compositions réelles des bétons proposées pour la famille BAPL II. Pour les bétons B7, B8 et B9, le dosage en ciment est respectivement de 374, 432 et 487 kg/m^3. Le dosage en superplastifiant est de 0,75 % d'extrait liquide (rapporté à la masse de liant). La proportion volumique de gravillons légers varie de 32 à 28 %.

Les **Tableaux 5.14** et **5.15** donnent les compositions théoriques des mortiers et des pâtes dans les bétons de la famille BAPL II. La proportion volumique de sable normal dans les mortiers des bétons B7, B8 et B9 est respectivement de 45, 40 et 35 % tandis que celle du ciment dans les pâtes est de 35 %.

Tableau 5.13
Compositions réelles des bétons de la famille BAPL II

Famille	N°	C (kg)	AC (kg)	SIL (kg)	ARG 4/8-750 (kg)	SCH 4/8-780 (kg)	Vg (%)	SP (kg)	E_{tot} (kg)	E_{eff}/L	Vp (l)	ωc
BAPL II	B7	374	117	782 (4,0)	404 (11,0)	-	32	0,73	199	0,40	350	0,49
	B8	432	135	730 (3,7)	377 (11,6)	-	30	0 ,86	224	0,40	400	0,49
	B9	487	152	670 (4,2)	346 (12,8)	-	28	0,95	247	0,39	450	0,49
BAPL II+	B10	488	103	757 (5,8)	373 (11,7)	-	30	1,26	238	0,40	415	0,47
	B11	489	103	754 (4,6)	-	381 (7,2)	30	1,23	224	0,38	415	0,47

Tableau 5.14
Compositions théoriques des mortiers des bétons de la famille BAPL II

Famille	N°	C (kg)	AC (kg)	SIL (kg)	Vs (%)	SP (kg)	E_{eff} (kg)	E_{eff}/L
BAPL II	MB7	571	179	1 193	45	1,11	304	0,40
	MB8	630	197	1 064	40	1,25	326	0,40
	MB9	686	215	944	35	1,33	347	0,39
BAPL II+	MB10	683	144	1 055	40	1,76	332	0,40
	MB11	696	147	1 074	40	1,75	320	0,38

Tableau 5.15
Compositions théoriques des pâtes des bétons de la famille BAPL II

Famille	N°	C (kg)	AC (kg)	Vc (%)	SP (kg)	E_{eff} (kg)	E_{eff}/L
BAPL II	PB7	1 119	350	35	2,19	551	0,40
	PB8	1 118	350	35	2,22	544	0,40
	PB9	1 119	350	35	2,18	539	0,39
BAPL II+	PB10	1 176	249	37	2,28	550	0,40
	PB11	1 178	249	37	2,97	536	0,38

b) Propriétés à l'état frais

La masse volumique réelle, la teneur en air et l'étalement des bétons B7, B8 et B9 sont présentés au **Tableau 5.16**. L'étalement des bétons est inférieur à 500 mm. Le caractère auto-plaçant n'est pas assuré par cette première approche sans doute en raison d'une faible quantité de superplastifiant.

Tableau 5.16
Propriété à l'état frais des BAPL II

Famille	N°	MVR (kg/m³)	Tair (%)	SF (mm)	K
BAPL II	B7	1 926	6,5/1,5	200	5,6
	B8	1 947	7,5/2,1	445	4,8
	B9	1 952	6,4/1,5	485	4,3

Tair : aéromètre/roll-a-meter

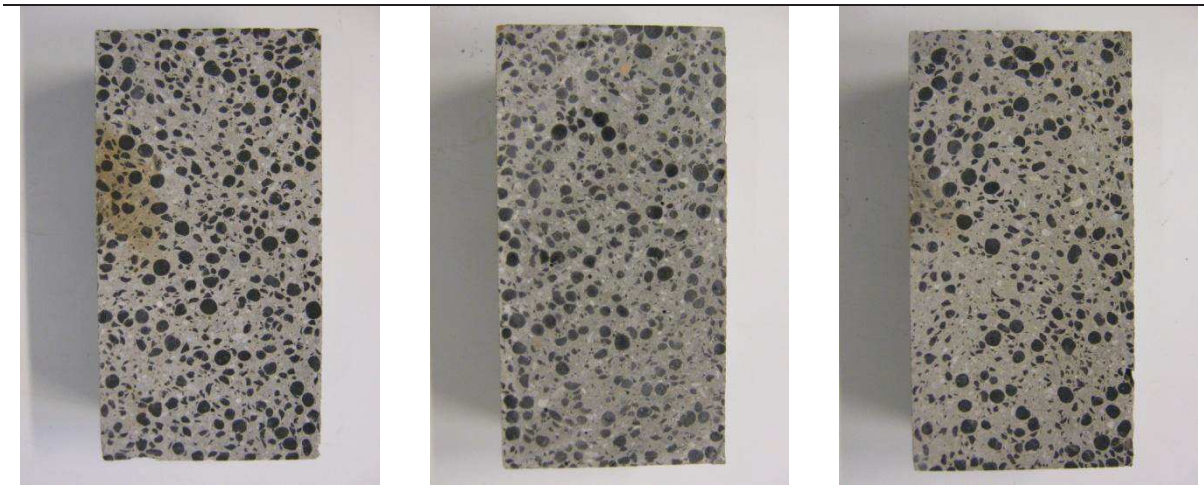
c) Propriétés à l'état durci

Le **Tableau 5.17** présente la masse volumique réelle sèche et la résistance moyenne à la compression à 28 jours des bétons B7, B8 et B9. La classe de masse volumique des bétons est D1.6 (masse volumique réelle sèche comprise entre 1 600 et 1 800 kg/m³) et leur résistance moyenne à la compression est proche de 50 MPa. Ces résultats indiquent que les bétons proposés présentent des propriétés à l'état durci proches des objectifs de la famille BAPL II en termes de masse volumique réelle et de résistance.

Tableau 5.17
Propriétés physiques et mécaniques à 28 jours des bétons B7, B8 et B9 de la famille BAPL II

Famille	N°	MVR sèche (kg/m³)	fcm,cube (MPa)
BAPL II	B7	1 775	45
	B8	1 800	48
	B9	1 780	48

La résistance à la ségrégation des bétons est contrôlée par une valeur d'indice de serrage compris entre 4,5 et 5,5. La **Figure 5.3** montre une distribution homogène des gravillons légers. Ce qui témoigne de la stabilité du béton après la mise en place.



B7 *B8* *B9*

Figure 5.3 Distribution des gravillons légers dans la matrice des bétons B7, B8 et B9 de la famille BAPL II

5.3.3.2 Synthèse et analyse des résultats de la seconde étape

A l'issue de la première étape, nous constatons que les bétons proposés ne sont pas auto-plaçants même s'ils respectent les exigences vis-à-vis de la masse volumique réelle sèche. Quelques améliorations telle que l'augmentation du dosage de superplastifiant sont envisagées afin d'améliorer l'ouvrabilité des bétons dans la seconde étape. D'où les formules B10 et B11 réalisées, testées et présentées dans cette partie. Deux compositions de bétons auto-plaçants légers de sable normal (BAPLSN) dont l'une d'argile expansée (B10) et l'autre d'ardoise expansée (B11) sont réalisées. Une caractérisation plus approfondie est effectuée sur chacune des compositions pour valider l'ouvrabilité, la résistance et la durabilité des bétons.

a) Présentation des compositions

Les compositions réelles et théoriques des bétons B10 et B11 sont présentées aux **Tableaux 5.13, 5.14 et 5.15**. Le volume de pâte des bétons est fixé à 415 l/m^3. La proportion volumique des gravillons légers est limitée à 30 %. Le rapport E_{eff}/L du BAPLSN de gravillons d'argile expansée B10 est de 0,40 tandis que celui du BAPLSN de gravillons d'ardoise expansée B11 est de 0,38. Le dosage en superplastifiant est de 1,07 % et 1,04 % d'extrait liquide (rapporté à la masse de liant) respectivement pour les formules B10 et B11.

b) Propriétés à l'état frais

Le **Tableau 5.18** donne les propriétés à l'état frais des BAPLSN B10 et B11 de la famille BAPL II. En plus des essais de masse volumique réelle, de teneur en air et d'étalement, des propriétés d'écoulement telles que le temps d'écoulement à l'entonnoir en V et le taux de remplissage à la boite en L sont déterminées.

La masse volumique réelle est autour de 2 000 kg/m^3 et la teneur air mesurée au roll-a-meter est voisine des 2 % comme dans les bétons traditionnels sans entraîneur d'air.

L'étalement des BAPLSN B10 et B11 est respectivement de 650 et 630 mm comme l'illustre la **Figure 5.4**. Ils sont classés SF1 (étalement moyen compris entre 550 et 650 mm). Le temps

d'écoulement à l'entonnoir en V qui donne une indication sur la viscosité apparente des bétons est de 3,87 secondes pour le B10 et de 4,30 secondes pour le B11. Les formules B10 et B11 ont une classe de viscosité apparente VF1 (temps d'écoulement inférieur à 9 secondes). Le taux de remplissage à la boite en L qui renseigne sur l'aptitude à l'écoulement du béton en présence d'obstacle est réalisé avec le système de positionnement de 3 barres. Les BAPLSN B10 et B11 présentent respectivement un taux de remplissage de 92 et 80 % et sont donc classés PL2 (taux de remplissage supérieur ou égal à 80 % avec le système de positionnement de 3 barres).

Le BAPLSN B10 a un indice de ségrégation de 6,1 % (supérieur aux 5 % requis) mais ne présente pas de signes visibles de ségrégation à l'étalement comme l'illustre la **Figure 5.4**. Le BAPLSN B11 est parfaitement homogène comme le montre la même figure et affiche un indice de ségrégation de 4,6 %. L'indice de serrage des BAPLSN B10 et B11 est respectivement de 4,4 et 5,0. Le choix d'un indice de serrage supérieur ou proche de 4,5 a contribué à l'homogénéité des mélanges.

Tableau 5.18
Propriétés à l'état frais des bétons B10 et B11 de la famille BAPL II

Famille	N°	MV réelle (kg/m³)	Tair (%)	SF (mm)	K	T500 (s)	Tv (s)	PL (%)	Iseg (%)
BAPL II	B10	2 012	-/2,2	650	4,4	2,03	3,87	92	6,1
	B11	1 985	-/2,0	630	5,0	2,26	4,30	80	4,6



B10 *B11*

Figure 5.4 Etalement des bétons B10 et B11 de la famille BAPL II

c) Propriétés à l'état durci

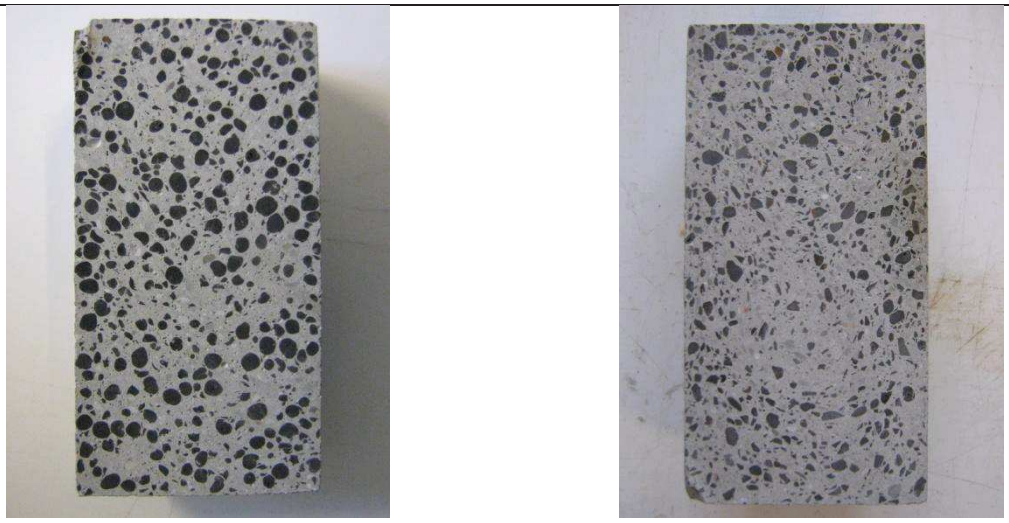
La masse volumique réelle sèche, la résistance à la compression, la traction par fendage et le module d'élasticité des bétons B10 et B11 de la famille BAPL II sont déterminés et présentés au **Tableau 5.19**. Les formules B10 et B11 ont une masse volumique réelle sèche respectivement de

1 820 et 1 830 kg/m^3 et sont donc classés D2.0 (masse volumique réelle sèche comprise entre 1 800 et 2 000 kg /m^3).

Tableau 5.19
Propriétés des bétons à l'état durci

Famille	N°	MVR sèche (kg/m^3)	fcm,cube (MPa)		ft,b (MPa)	E_b (GPa)
		28j	1j	28j	28j	28j
BAPL II	B10	1 820	36	50	4,3	22,0
	B11	1 830	32	56	3,3	27,6

Le BAPLSN B10 contenant des gravillons d'argile expansée affiche des résistances moyennes à la compression à 1 et 28 jours respectivement de 36 et 50 MPa tandis que le BAPLSN B11 d'ardoise expansée développe des résistances de 32 et 56 MPa respectivement. Ils sont respectivement classés LC35/38 et LC40/44. La résistance à la compression à 28 jours du béton B11 est légèrement supérieure à celle du béton B10 en raison de la nature des gravillons légers. Les gravillons légers d'ardoise expansée semblent plus rigides que les gravillons d'argile expansée.



B10 *B11*

Figure 5.5 Distribution des gravillons légers dans les mortiers des bétons B10 et B11 de la famille BAPL II

Le module d'élasticité à 28 jours des BAPLSN B10 et B11 est respectivement de 22,0 et 27,6 GPa. Ce résultat semble confirmer l'hypothèse sur la différence de rigidité entre les gravillons légers d'ardoise expansée et d'argile expansée.

La traction par fendage est réalisée sur des corps d'épreuve âgés de 28 jours. La résistance à la traction par fendage des BAPLSN B10 et B11 est respectivement de 4,3 et 3,3 MPa. Paradoxalement, le béton B10 résiste mieux à la traction par fendage que le béton B11. La **Figure 5.5** montre une distribution quasi homogène des gravillons légers dans la matrice cimentaire des deux bétons. Cette observation confirme la stabilité et l'homogénéité des BAPLSN B10 et B11 même après la mise en place.

d) Propriétés de durabilité

Les essais de durabilité regroupent la porosité accessible à l'eau, l'absorption dans l'eau et la carbonatation. Les résultats des caractérisations réalisées sur les BAPLSN B10 et B11 sont présentés dans le **Tableau 5.20**.

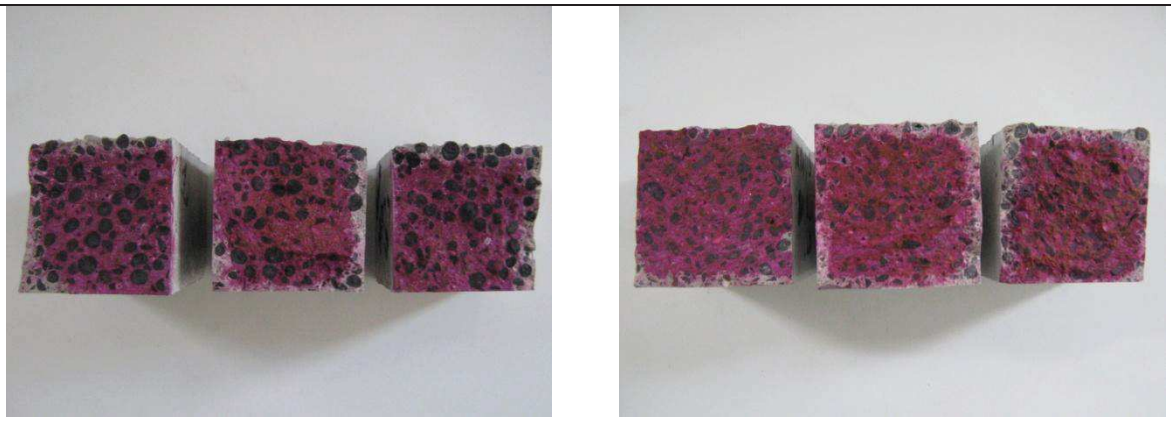
Les BAPLSN B10 et B11 ont une porosité accessible à l'eau autour de 17 % et une absorption dans l'eau autour de 10 %. Ces valeurs d'absorption sont supérieures à l'absorption d'eau maximale de produits en béton préfabriqués indiquée dans le Tableau NA. F.2 de la norme NF EN 206-1/CN qui se situe plutôt entre 6 et 6,5 % pour la classe de résistance C35/40 par exemple. La porosité des gravillons légers est en grande partie à l'origine de l'écart.

L'essai de carbonatation accélérée est réalisé sur des éprouvettes préalablement conservées pendant 14 jours dans une ambiance contrôlée à une température de 20 ± 2 °C et à une humidité relative de 65 ± 5 % avant d'être placées dans l'enceinte de carbonatation contenant du CO_2 à 4 %. L'épaisseur carbonatée mesurée après plus de 28 jours est de 4,6 mm pour le BAPLSN B10 et de 4,1 mm pour le BAPLSN B11. Les zones colorées sur la **Figure 5.6** illustrent l'étendue des régions non carbonatées des éprouvettes à l'issue de l'essai de carbonatation.

Tableau 5.20
Propriétés de durabilité sur les bétons B10 et B11 de la famille BAPL II

Famille	N°	Porosité accessible à l'eau (%)	Absorption d'eau (%)	Carbonatation (mm)
BAPL II+	B10	17,5	9,9	4,6
	B11	16,9	9,7	4,1

Le niveau de porosité accessible à l'eau des compositions B10 et B11 porterait à croire qu'ils se carbonateraient un peu plus vite qu'un béton traditionnel de résistance équivalente du fait de la porosité du granulat léger. (Haque and Al-Khaial 1999) ont montré que l'épaisseur carbonatée d'un béton « tout léger » est plus importante que celle d'un béton traditionnel de résistance équivalente en raison d'une perméabilité à l'eau du béton « tout léger » plus importante que celle du béton traditionnel. Ainsi les auteurs établissent un lien de causalité entre la perméabilité à l'eau et la vitesse de carbonatation du béton léger. En d'autres termes, la diminution de la porosité accessible à l'eau permettrait de réduire la carbonatation du béton léger.



B10 (Argile expansée)	B11 (ardoise expansée)

Figure 5.6 Epaisseur carbonatée sur les bétons B10 et B1 de la famille BAPL II.

5.3.3.3 Bilan sur la formulation des bétons de la famille BAPL II

Les résultats à l'issue de la seconde étape ont permis de proposer des BAPLSN qui satisfont pleinement aux objectifs de la famille BAPL II en termes d'auto-plaçance, de masse volumique réelle sèche et de performance mécanique.

Cependant, les bétons B10 et B11 affichent un dosage en ciment plus élevé que le dosage d'un béton normal qui se situe plutôt autour de 350 kg/m^3 selon la norme NF EN 206-1/CN pour un niveau de résistance équivalent. Ce dosage en ciment élevé est lié au choix du volume de pâte et du modèle série/parallèle.

Le choix du volume de pâte est guidé d'une part par un souci d'optimisation de l'adjuvantation pour une auto-plaçance optimale et d'autre part la limitation de l'indice de serrage du béton frais autour de 5,5. Plus le volume de pâte sera élevé et proche de 450 l/m^3 plus grand sera l'étalement. Cette démarche a conduit à un niveau de dosage en liant élevé.

Le choix du modèle série/parallèle pour estimer la résistance à la compression des bétons légers peut conduit à un dosage en ciment élevé dans le liant. La résistance à la compression du béton léger est pilotée par les propriétés mécaniques du mortier et donc par la qualité de la pâte de ciment. La relation entre la performance de la matrice cimentaire et la résistance du béton léger est signalée dans la thèse de (Shink 2003) et dans celle de (Ke 2008).

Il est clair que d'un point de vue industriel, les BAPL avec un dosage en ciment aussi élevé sont moins viables économiquement. C'est pourquoi nous avons exploré des voies d'amélioration à partir de trois leviers pour optimiser la composition des bétons B10 et B11 dont les formules optimisées sont présentées au **Tableau 5.21**.

Le premier levier concerne la diminution du volume de pâte aux dépens de l'indice de serrage. Le volume de pâte est passé de 415 l/m^3 dans les bétons B10 et B11 à respectivement 380 et 390 l/m^3 dans les bétons théoriques B10* et B11*. Le deuxième a consisté à réduire le rapport E_{eff}/L pour maintenir le même niveau de résistance et augmenter le dosage en superplastifiant afin de compenser la baisse d'étalement. Le rapport E_{eff}/L est passé de 0,40 pour les bétons B10

et B11 à 0,32 dans les bétons B10* et B11* respectivement. Le troisième a consisté à maintenir la proportion de sable naturel dans le mortier en gardant le rapport Vg/Vs autour de 1 et ainsi contrôler la masse volumique réelle du béton. Le rapport Vg/Vs est passé de 1,05 pour les B10 et B11 à 1,1 pour les B10* et B11*. Le dosage en superplastifiant sera ajusté expérimentalement avec vraisemblablement une proportion plus élevée que celle des bétons B10 et B11.

Tableau 5.21
Compositions théoriques après optimisation des compostions B10 et B11en kg/ m³

N°	C	AC	SIL	ARG	SCH	SP	E_{eff}	E_{eff}/L	Vp	ωc	K
B10*	439	161	785	406	-	-	194	0,32	380	0,52	5,9
B11*	440	161	773	-	409	-	184	0,31	390	0,51	6,6

Les améliorations apportées à la formulation de bétons de la famille BAPL II ont porté leurs fruits puisqu'elles ont permis de réduire de 10 % le dosage en ciment dans les compositions théoriques. Il est vraisemblable que si ces deux bétons avaient été testés, ils présenteraient un caractère auto-plaçant et des performances mécaniques similaires à celles des bétons B10 et B11.

5.3.4 Formulation des bétons de la famille BAPL III

Les bétons de la famille BAPL III sont destinés aux produits précontraints et doivent justifiés d'une masse volumique réelle sèche inférieure à 2 000 kg/m^3 et d'une résistance moyenne à la compression à 28 jours d'au moins 60 MPa. De plus, la résistance moyenne à la compression à 1 jour doit être supérieure à 30 MPa pour optimiser le processus de fabrication des produits.

Les leviers d'amélioration présentés au paragraphe précédent sont également mis en œuvre pour proposer deux compositions de bétons auto-plaçants de sable normal (BAPLSN) dont l'une avec des gravillons d'argile expansée (notée B12) et l'autre avec des gravillons d'ardoise expansée (notée B13). Les formules testées sont ensuite caractérisées à l'état frais et à l'état durci.

5.3.4.1 Présentation des compositions

Les compositions réelles des BAPLSN B12 et B13 sont présentées au **Tableau 5.22**. Le volume de pâte est maintenu constant à 380 l/m^3 et le rapport E_{eff}/L autour de 0,35. La proportion volumique de gravillons légers est fixée à 25 %. Le dosage en liant est autour de 550 kg/m^3 dont 450 kg/m^3 de ciment. Le dosage en superplastifiant des BAPLSN B12 et B13 est respectivement de 1,65 et 1,9 % d'extrait liquide rapporté à la masse de liant.

Les **Tableaux 5.23 et 5.24** présentent la composition théorique des mortiers et des pâtes dans les BAPLSN B12 et B13. La proportion volumique du sable normal dans les mortiers est de 48 % et celle du ciment dans les pâtes de 38 %.

Tableau 5.22
Compositions réelles des bétons de la famille BAPL III

Famille	**N°**	C (kg)	AC (kg)	SIL (kg)	ARG 4/8-750 (kg)	SCH 4/8-780 (kg)	Vg (%)	SP (kg)	E_{tot} (kg)	E_{eff}/L	Vp (l)	ωc
BAPL III	B12	446	114	934 (8,9)	308 (12,5)	-	25	1,80	197	0,35	380	0,50
	B13	448	115	938 (8,9)	-	316 (7,2)	25	2,14	190	0,34	380	0,50

Tableau 5.23
Compositions théoriques des mortiers des bétons de la famille BAPL III

Famille	N°	C (kg)	AC (kg)	SIL (kg)	Vs (%)	SP (kg)	E_{eff} (kg)	E_{eff}/L
BAPL III	MB12	608	156	1 273	48	2,48	269	0,35
	MB13	614	157	1 286	48	2,94	261	0,34

Tableau 5.24
Compositions théoriques des pâtes des bétons de la famille BAPL III

Famille	N°	C (kg)	AC (kg)	Vc (%)	SP (kg)	E_{eff} (kg)	E_{eff}/L
BAPL III	PB12	1 204	308	38	4,91	516	0,35
	PB13	1 199	307	38	5,73	505	0,34

5.3.4.2 Propriétés à l'état frais

Les propriétés physiques telles que la masse volumique réelle et la teneur en air occlus sont déterminées pour chacun des deux bétons. Ces propriétés sont complétées par des propriétés d'écoulement telles que l'étalement au cône, le temps d'écoulement à l'entonnoir en V et le taux de remplissage à la boite en L. La stabilité des compositions est vérifiée par la détermination de l'indice de ségrégation à partir de l'essai à la colonne. Les propriétés à l'état frais des BAPLSN B12 et B13 sont présentées au **Tableau 5.25**.

La masse volumique réelle des BAPLSN B12 et B13 est respectivement de 2 046 et 2 018 kg/m^3. La teneur en air des bétons est proche des 2 % généralement admis pour les bétons traditionnels.

L'étalement des BAPSN B12 et B13 est respectivement de 765 et 830 mm. Ils sont donc classés SF3 (étalement moyen compris entre 760 et 850 mm). Le temps d'écoulement à l'entonnoir en V est de 19,20 secondes pour le BAPLSN B12 et de 16,89 secondes pour le BAPLSN B13 et la classe de viscosité apparente associée est VF2 (temps d'écoulement compris entre 9 et 25 secondes). Le taux de remplissage à la boite en L des BAPLSN B12 et B13 est respectivement de 80 et 91 % ; ce qui classe ces bétons dans la classe PL2 vis-à-vis de leur aptitude à l'écoulement.

L'indice de ségrégation à la colonne est de 3,8 % pour le BAPLSN B12 et de 3,7 % pour le BAPLSN B13. Ce résultat indique une bonne stabilité des mélanges comme le témoigne l'homogénéité des galettes présentées à la **Figure 5.7**.

Tableau 5.25
Propriétés à l'état frais des BAPLSN B12 et B13 de la famille BAPL III

Famille	N°	MVR (kg/m^3)	Tair (%)	SF (mm)	K	T500 (s)	Tv (s)	PL (%)	Iseg (%)
BAPL III	B12	2 046	-/2,5	765	5,9	2,87	19,20	80	3,8
	B13	2 018	-/2,2	830	6,5	2,82	16,89	91	3,7



B12 B13

Figure 5.7 Etalement des BAPLSN B12 et B13 de la famille BAPL III

5.3.4.3 Propriétés à l'état durci

La masse volumique réelle (MVR), les résistances moyennes à 1 et 28 jours, la résistance à la traction par fendage et le module d'élasticité des bétons proposés pour la famille BAPL III sont présentés au **Tableau 5.26**.

Les BAPLSN B12 et B13 ont respectivement pour masse volumique réelle sèche 1 925 et 1 950 kg/m^3 et sont donc classés D2.0. La **Figure 5.8** montre une distribution homogène des gravillons légers dans la matrice cimentaire et confirme l'absence de ségrégation constatée à l'état frais.

Les résistances à 1 et 28 jours sont de 34 et 62 MPa pour le BAPLSN B12 et de 37 et 63 MPa pour le BAPLSN B13. La classe de résistance associée est LC50/55. Le module d'élasticité des BAPLSN B12 et B13 est respectivement de 27 et 30 GPa. Nous constatons une fois de plus que le module d'élasticité du BAPLSN contenant des gravillons d'argile expansée (B12) est inférieur à celui du BAPLSN d'ardoise expansée (B13). Le même constat est fait sur les bétons de la famille BAPL II.

La résistance à la traction par fendage est de 3,1 MPa pour le BAPLSN B12 et de 4,6 MPa pour le BAPLSN B13. Le béton B13 d'ardoise expansée résiste mieux à la traction par fendage que le béton B12 d'argile expansée. Cette observation est logique puisque B13 est plus rigide que B12 au regard des valeurs de module d'élasticité.

Tableau 5.26
Propriétés à l'état durci des BAPLSN B12 et B13 de la famille BAPL III

Famille	N°	MVR sèche (kg/m^3)	fcm,cube (MPa)		ft,b (MPa)	E_b (GPa)
		28j	1j	28j	28j	28j
BAPL III	B12	1 925	34,0	62,0	3,1	27,0
	B13	1 950	37,0	63,0	4,6	30,0



B12 B13

Figure 5.8 Distribution des gravillons légers dans la matrice des BAPLSN B12 et B13 de la famille BAPL III

5.3.4.4 Propriétés de durabilité

La porosité accessible à l'eau et l'absorption d'eau des éprouvettes de BAPLSN B12 et B13 sont déterminées et présentées au **Tableau 5.27**. La porosité accessible à l'eau est de 15,6 % pour le BAPLSN B12 et de 14,1 % pour le BAPLSN B13 tandis que l'absorption d'eau est respectivement de 7,7 et 6,5 %. Le BAPLSN B13 d'ardoise expansée absorbe moins d'eau que le BAPLSN B12 du fait vraisemblablement de la porosité des granulats légers qui les composent. Pour mémoire, le coefficient d'absorption d'eau à 24 heures des gravillons d'ardoise expansée (SCH 4/8-780) est de 7,6 % et celui des gravillons d'argile expansée (ARG 4/8-750) est de 12,8 %.

En dépit de la porosité des gravillons légers, les BAPLSN proposés ont une porosité et une absorption d'eau proche de celles des bétons traditionnels. A titre d'exemple, l'absorption d'eau maximale pour les produits en béton préfabriqués est comprise entre 5 et 5,5 % pour une classe résistance de C40/50.

Tableau 5.27
Propriétés de durabilité des BAPLSN B12 et B13 de la famille BAPL III

Famille	N°	Porosité accessible à l'eau (%)	Absorption (%)
BAPL III	B12	15,6	7,7
	B13	14,1	6,5

5.3.4.5 Bilan sur la formulation des bétons de la famille BAPL III

Les propriétés à l'état frais telles que l'étalement au cône, le temps d'écoulement à l'entonnoir en V et le taux de remplissage à la boite en L indiquent clairement que les BAPLSN B12 et B13 satisfont aux exigences de la famille BAPL III vis-à-vis du caractère auto-plaçant.

Les propriétés à l'état durci telles que la masse volumique réelle sèche et les résistances moyennes à la compression à 1 et 28 jours montrent que les bétons proposés respectent les exigences de légèreté et de performance mécanique.

Les objectifs vis-à-vis du cahier des charges en termes d'auto-plaçance, de masse volumique réelle et de performance mécanique sont donc pleinement atteints pour cette famille de bétons auto-plaçants légers.

5.4 Confrontation des résultats expérimentaux des BAPLSN avec des modèles de la littérature

L'objectif de ce paragraphe est d'étudier les relations empiriques pouvant exister entre les propriétés à l'état frais et à l'état durci et la masse volumique réelle sèche. L'intérêt de ce type de relation est de pouvoir vérifier à priori si les formulations calculées par l'outil de composition mis au point présentent à terme, la bonne gamme de masse volumique réelle sèche. Une relation entre la masse volumique réelle sèche et la résistance à la compression permettra en perspective,

d'introduire des critères de vérification sur la légèreté de la formule dès la pré-formulation même si cela n'a pas été le cas dans la thèse.

5.4.1 Relation entre la masse volumique réelle sèche et la masse volumique réelle à l'état frais

La **Figure 5.9** donne l'évolution de la masse volumique réelle sèche en fonction de la masse volumique réelle de bétons auto-plaçants légers de sable normal (BAPLSN) contenant des gravillons légers pré-mouillés. En basant sur ces résultats, nous proposons une relation de proportionnalité entre la masse volumique réelle sèche à l'état durci ρ_s et la masse volumique réelle à l'état frais ρ_h des BAPLSN. Cette relation s'exprime de la façon suivante :

$$\rho_s = 1{,}395 * \rho_h - 925 \qquad (5\text{-}1)$$

L'écart entre les valeurs expérimentales de la masse volumique réelle sèche et les valeurs du modèle se situe entre -3,0 et 78,0 kg/m^3 soit un écart moyen de 2,7 kg/m^3. L'erreur varie entre 0,04 et 4,5 % soit une erreur moyenne 0,2 %. Avec un coefficient de détermination de 0,879, ce modèle peut être utilisé en bonne approximation pour estimer plus rapidement la masse volumique réelle sèche connaissant la masse volumique réelle déterminée à l'issue du malaxage.

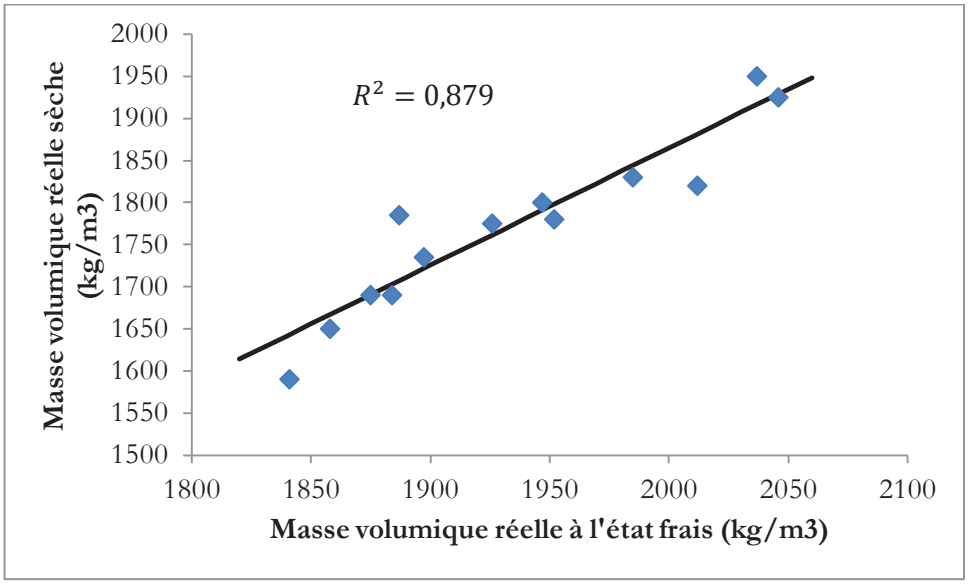


Figure 5.9 Relation entre la masse volumique réelle sèche à l'état durci et la masse volumique réelle à l'état frais

La perte de masse qui s'exprime par la différence entre la masse volumique réelle à l'état frais et celle à l'état sec, varie de 90 à 250 litres d'eau par unité de volume du béton comme l'illustre la **Figure 5.10**. (Papanicolaou and Kaffetzakis 2011) ont aussi observé que la différence entre la masse volumique réelle à l'état frais et la masse volumique sèche à l'état durci se situent entre 100 et 250 litres par unité de volume de BAPLSN, ce qui conforte nos observations. Cette perte de

masse va dépendre principalement de la proportion volumique, de la teneur en eau initiale des granulats légers et de la quantité d'eau de gâchage.

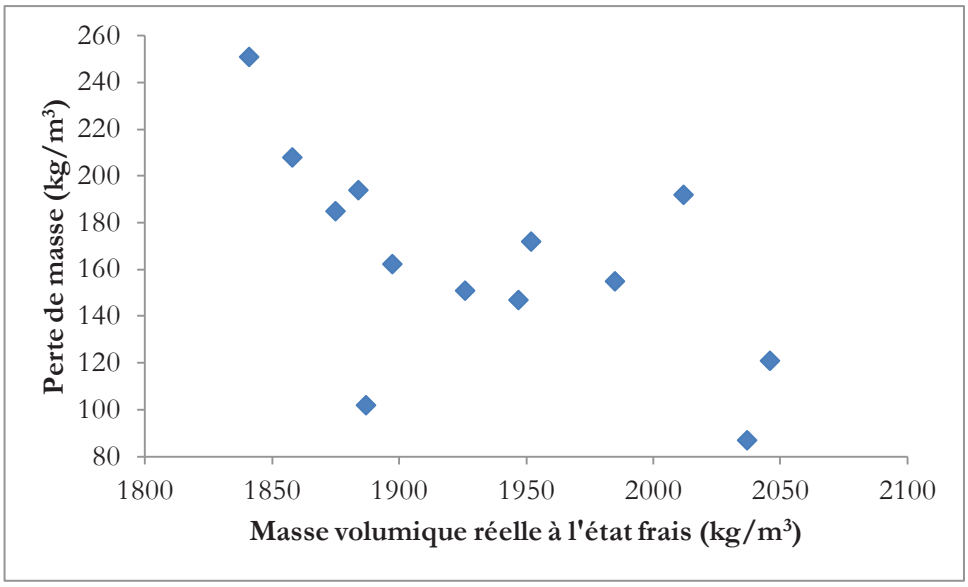


Figure 5.10 Rapport entre la perte de masse et la masse volumique réelle à l'état frais de BAPLSN

5.4.2 Estimation de la résistance moyenne à la compression des BAPLSN

La première approche a été d'estimer la résistance à la compression des bétons auto-plaçants légers de sable normal (BAPLSN) à partir du modèle série/parallèle dont le détail est exposé au **Chapitre 4**. La **Figure 5.11** donne la relation entre la résistance moyenne à la compression calculée et celle mesurée. Ces résultats indiquent que l'écart se situe entre - 5,2 et 8 MPa soit un écart moyen de 0,6 MPa. L'erreur peut atteindre 17 % même si l'erreur moyenne est plutôt autour de 6 %. Cet écart n'est pas négligeable et devra être prise en compte dans la mise en œuvre de la méthode de formulation. En d'autres termes, pour formuler un BAPLSN de résistance moyenne visée de 50 MPa, il est préférable de choisir 55 MPa dans l'outil de formulation.

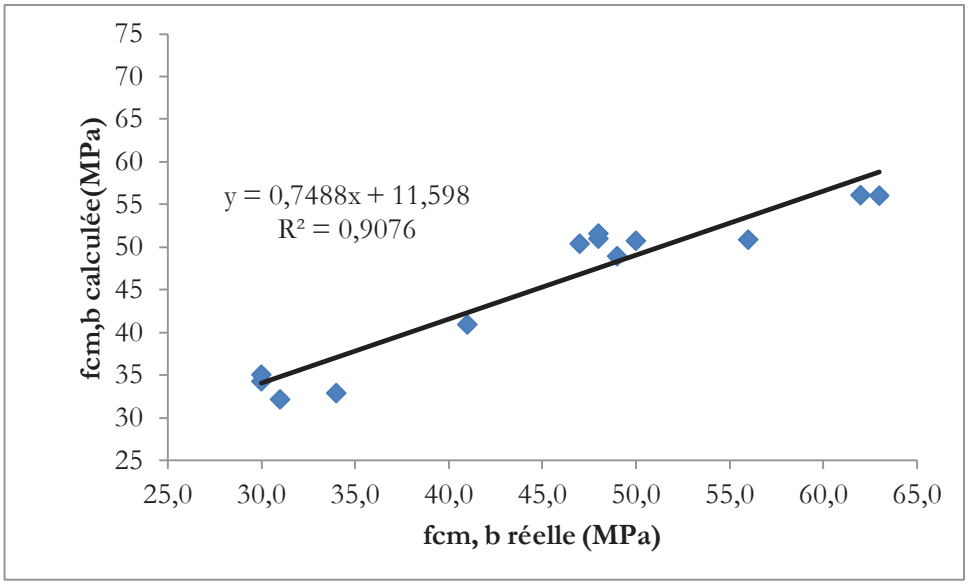


Figure 5.11 Comparaison entre modèle et expérience relative à la résistance moyenne à la compression à 28 jours de BAPLSN

La seconde approche est établie à partir des résultats obtenus sur les différentes compositions de BAPLSN. Partant d'une bonne corrélation entre la résistance à la compression et la masse volumique réelle sèche, cette approche vise à établir une relation entre ces deux paramètres. La **Figure 5.12** donne la relation entre la résistance moyenne à la compression et la masse volumique réelle sèche des BAPLSN. Sur la base de ces résultats expérimentaux nous proposons la relation suivante pour estimer la résistance à compression des BAPLSN connaissant leur masse volumique réelle sèche :

$$f_{cm,b\,28} = 111 * \rho_{bs} - 150 \qquad (5\text{-}2)$$

ρ_{bs} masse volumique réelle sèche du BAPLSN exprimée en t/m^3

L'écart entre la résistance réelle et la valeur du modèle se situe entre -6,6 MPa et 3,5 MPa soit un écart moyen de 0,12 MPa. L'erreur moyenne est estimée à 3,0 % et le coefficient de détermination est de 0,942 ; ce qui est satisfaisant pour la pré-formulation des bétons auto-plaçants légers de sable normal. Cette relation est valide pour les BAPLSN de masse volumique réelle à l'état frais comprise entre 1 600 et 2 000 kg/m^3.

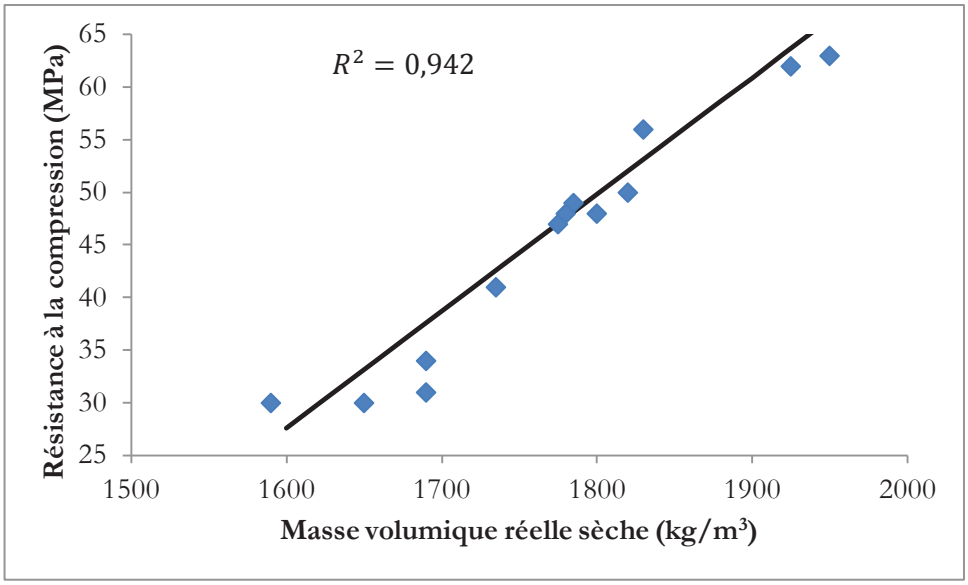


Figure 5.12 Rapport entre la résistance moyenne à la compression et la masse volumique réelle sèche de BAPLSN

Les résultats expérimentaux sont confrontés à d'autres relations expérimentales d'estimation de la résistance moyenne à la compression de bétons légers à partir de la masse volumique réelle sèche. Les trois formules empiriques identifiées sont :

- formule proposée par (Arnauld et Virlogeux 1986):

$$f_{cm,b28} = 20 + 50 * (\rho_{bs} - 1{,}45) \tag{5-3}$$

- formule proposée dans le BPEL 91:

$$f_{cm,b28} = 30 + 50 * (\rho_{bs} - 1{,}7) + 8 \tag{5-4}$$

- formule proposée par (KE 2008):

$$f_{cm,b28} = 127 * \rho_{bs} - 378 * \rho_{bs} + 314 \tag{5-5}$$

La Figure 5.13 montre le résultat de la comparaison entre les différents modèles de prédiction de la résistance et les données expérimentales. L'erreur moyenne est respectivement de 24 %, 8 % et 2 % pour les modèles de (Arnauld et Virlogeux 1986), du (BPEL 1991) et de (Ke 2008).

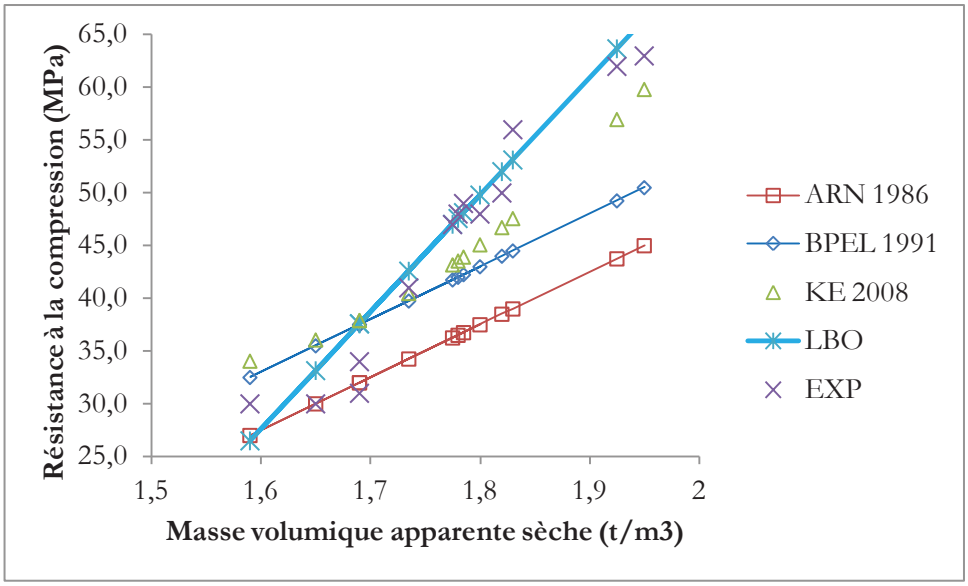


Figure 5.13 Comparaison des modèles d'estimation de la résistance à compression avec les résultats expérimentaux

Les modèles de (Arnauld et Virlogeux 1986) et du (BPEL 1991) divergent pour les résistances élevées avec une erreur pouvant atteindre respectivement 45 % et 26 %. En revanche le modèle proposé par (Ke 2008) donne une estimation plus exacte que les deux premiers modèles avec une erreur maximale de 18 %.

Pour revenir à l'estimation de la résistance des BAPLSN, nous pensons qu'il est possible de simplifier l'outil de formulation en combinant les relations (5-1) et (5-2). Cette démarche revient à estimer la résistance à la compression des BAPLSN à partir de la masse volumique réelle à l'état frais. A juste titre, cette démarche a été appliquée pour estimer la résistance à la compression des simulations B10* et B11* présentées au **Tableau 5.21** du **Paragraphe 5.3**. En partant de la masse volumique réelle théorique de 1985 kg/m^3 pour le B10* et de 1 970 kg/m^3 pour le B11*, les résistances à la compression estimées sont respectivement de 54 et de 52 MPa. Toutefois, ces compositions doivent être expérimentalement réalisées et testées pour confirmer la pertinence de la démarche.

5.4.3 Estimation du module d'élasticité des BAPLSN

La **Figure 5.14** donne le rapport entre le module d'élasticité et la résistance à la compression mesuré sur quelques uns des BAPLSN formulés. La valeur moyenne du module d'élasticité à 28 jours se situe entre 18 et 30 GPa. Le module d'élasticité des BAPLSN augmente avec la résistance moyenne à la compression. A résistance équivalente, le module d'élasticité des BAPLSN d'ardoise expansée (SCH 4/8-780) semble légèrement supérieur à celui des BAPLSN d'argile expansée (ARG 4/8 -750). Ce constat est vraisemblablement dû à la différence de nature entre les types de granulats légers. Les granulats d'ardoise expansée ayant une masse volumique réelle plus grande, ils ont donc un module d'élasticité plus élevé.

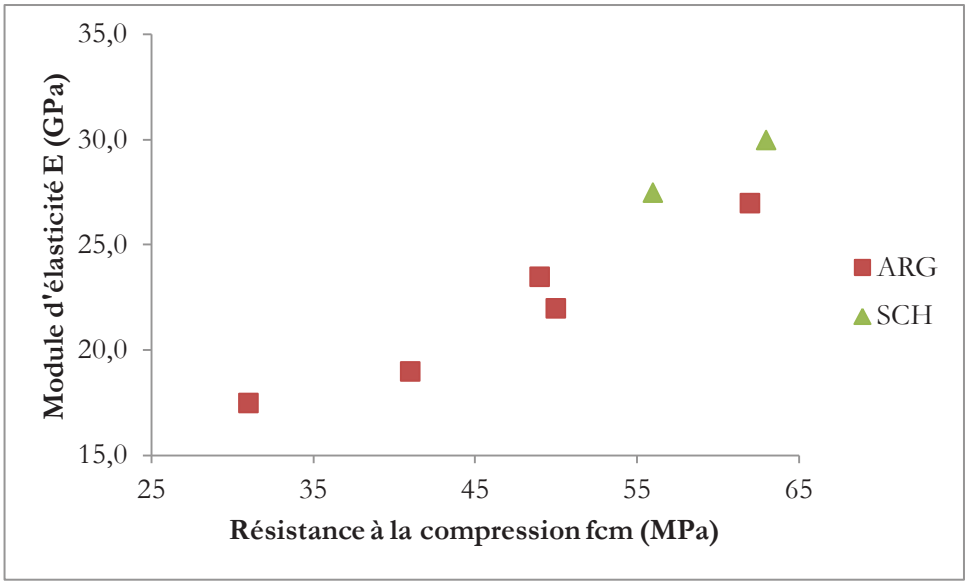


Figure 5.14 Relation entre le module d'élasticité et la résistance à la compression de BAPLSN

Les résultats expérimentaux sur le module d'élasticité de BAPLSN sont comparés aux valeurs de module calculées à partir de quelques modèles identifiés dans la littérature. Il s'agit entre autre du:

- modèle proposé par (Slate et al. 1986) et donné par la relation :

$$E_{b,l} = \left(3\,320 * \sqrt{f_{ck}} + 6\,895\right) * \left(\frac{\rho_{bs}}{2\,320}\right)^{1,5} \quad (5\text{-}6)$$

- modèle proposé par (Zhang and Gjørv 1991) et donné par la relation :

$$E_{b,l} = 9\,500 * {f_{ck}}^{0,3} * \left(\frac{\rho_{bs}}{2\,400}\right)^{1,5} \quad (5\text{-}7)$$

- modèle proposé dans la norme NF EN 1992-1-1(Eurocode 2)

$$E_{b,l} = 22\,000 * \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0,3} * \left(\frac{\rho_{bs}}{2\,200}\right)^{2} \quad (5\text{-}8)$$

- modèle proposé dans la norme ACI 213R- 2003 et donné par la relation :

$$E_{b,l} = 0{,}043 * {\rho_{bs}}^{1,5} * \sqrt{f_{ck}} \quad (5\text{-}9)$$

- modèle proposé par (Ke 2008) et donné par la relation :

$$E_{b,l} = 22\,000 * \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0,3} * \left(\frac{\rho_{bs}}{2\,200}\right)^{1,5} \quad (5\text{-}10)$$

La **Figure 5.15** montre le rapport entre les données des modèles et les données expérimentales. L'erreur moyenne entre le module mesuré et le module calculé est de 20 %, 23 % 3 % 10 % et 12 % respectivement pour les modèles de (Slate et al. 1986), de (Zhang and Gjørv 1991), de la norme (NF EN 1992-1-1), de la norme (ACI 213R- 2003) et de (Ke 2008).

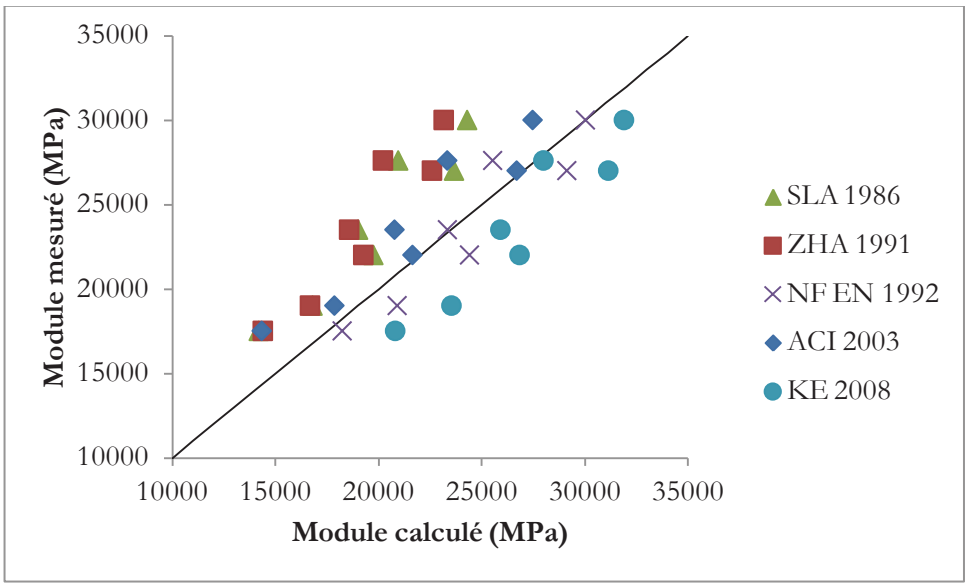


Figure 5.15 Comparaison entre les modèles de prédiction du module d'élasticité et les résultats expérimentaux

Le modèle de l'Eurocode 2 donne la prévision la plus précise des différents modèles avec un écart compris entre 0,2 et 2,4 GPa soit un écart moyen de 0,7 GPa. Ce modèle convient donc pour estimer le module d'élasticité des BAPLSN.

Les résultats obtenus sur BAPLSN en termes de masse volumique réelle sèche et de résistance à la compression témoignent de la robustesse de la méthode de formulation. Pour les familles de BAPL II et III, les résultats sont satisfaisants. Pour la famille BAPL I les résultats sont encourageants mais méritent d'être approfondis et améliorés. C'est dans ce souci d'amélioration que nous avons exploré les bétons auto-plaçants de sable léger (BAPLSL) qui peuvent avoir l'avantage d'être plus légers avec des performances mécaniques intéressantes.

5.5 Formulation des bétons auto-plaçants légers de sable léger (BAPLSL)

Les résultats à l'issue de la première série d'essais lancée pour proposer des bétons auto-plaçants légers de la famille BAPL I ont montré qu'avec du sable normal qu'il serait plus difficile d'atteindre une masse volumique réelle sèche inférieure ou égale à 1 500 kg/m^3.

L'une des solutions a été de tester le béton auto-plaçant léger de sable léger (BAPLSL) dans lequel le sable naturel est remplacé totalement ou partiellement par du sable léger et les gravillons de masse volumique normale sont remplacés totalement par des gravillons légers.

Ce paragraphe décrit le processus de formulation de ce type de béton auto-plaçant léger et présente la synthèse et l'analyse des résultats expérimentaux tout en soulignant les limites de la démarche.

5.5.1 Particularité des bétons de sable léger

La substitution totale ou partielle du sable naturel par du sable léger peut avoir des conséquences sur la composition et le comportement du béton à l'état frais et l'état durci.

Le sable léger pour la plupart provient du concassage et du criblage des gravillons légers. Il est constitué d'un mélange de grains ronds et de grains cassés. Ainsi, le sable léger est en général plus poreux et donc plus absorbant que les gravillons légers. Le coefficient d'absorption à 24 heures déterminé selon la procédure décrite dans la norme NF EN 1097-6 est de 24,9 % pour le sable d'argile expansée (ARG 0/4-650) et de 13,2 % pour le sable d'ardoise expansée (SCH 0/4-850). Pour mémoire, le coefficient d'absorption à 24 heures des gravillons d'argile expansée (ARG 4/8-750) et d'ardoise expansée (SCH 4/8-780) est respectivement de 12,8 et de 7,6 %. Toutefois, (Castro et al. 2011) relativisent le phénomène et affirment que l'absorption dépend de la taille du grain. Les auteurs indiquent que sur un échantillon de grains concassés, les grains de petites tailles absorbent moins que les grains de grandes tailles.

La forte absorption du sable léger peut certainement modifier la demande en eau du squelette du BAPLSL et accroitre potentiellement la viscosité apparente du mélange. Cet accroissement de la viscosité apparente du béton à l'échelle macroscopique se caractérise par un raidissement prématuré du béton dans le malaxeur et une augmentation de la cohésion du matériau. Pour limiter le risque de raidissement, l'utilisation d'un superplastifiant est préférée au pré-mouillage du sable léger afin de maintenir la cohésion au bénéfice de la stabilité du matériau. D'ailleurs, les travaux de (Haist et al. 2003) sur la pompabilité des bétons auto-plaçants légers ont révélé que le béton auto-plaçant léger de sable léger garde une structure plus homogène que celle du béton auto-plaçant léger de sable normal au bout de 7 cycles de pompage. Les auteurs expliquent cette performance par la forte absorption du sable léger qui modifie la viscosité apparente de la pâte et améliore ainsi la résistance à la ségrégation du mélange sur l'effet de la dépression.

En s'inspirant une fois de plus de ces résultats, nous avons fait le choix de ne pas pré-mouiller le sable léger. Les sables légers utilisés sont préalablement mis en dépôt dans des big bag exposés à l'atmosphère ambiante. Ils sont prélevés dans les big bag et directement introduits dans le malaxeur à l'exception de la composition BS1 dans laquelle le sable léger a été séché à 105 °C jusqu'à masse constante. Il est à noter que la teneur en eau des sables légers est déterminée pour tenir compte de leur apport d'eau dans la formulation des BAPLSL.

(Topçu and Uygunoglu 2010) ont montré que la substitution des granulats naturels par des granulats légers naturels très poreux (coefficient d'absorption à 24 heures compris entre 23 et 95 %) tels que la pierre ponce et la diatomite peut réduire le module d'élasticité du béton de 54 à 87 %. Dans le cas du béton léger de sable léger, le module du mortier de sable léger ne peut être suffisamment grand devant le module des gravillons pour appliquer le modèle série/parallèle. Il faut donc trouver une relation appropriée. D'où la nouvelle approche de formulation proposée.

5.5.2 Approche de formulation

Nous rappelons que l'objectif est de formuler des bétons auto-plaçants légers de sable léger (BAPLSL) destinés aux produits de structure en béton armé. Les bétons proposés pour la famille BAPL I doivent justifier à l'état frais, d'une bonne ouvrabilité et à l'état durci, d'une masse volumique réelle sèche inférieure ou égale à 1 500 kg/m^3 et d'une résistance moyenne à la compression à 28 jours de 35 MPa.

Le retour d'expérience sur la formulation des BAPLSN a servi de tremplin pour adapter la méthode de formulation développée à une approche dédiée aux BAPLSL. Pour mémoire, le processus de formulation des BAPLSN s'articule autour des points suivants :

- l'optimisation de la demande en eau des gravillons légers à l'aide de l'essai d'absorption dans la pâte de ciment ;
- le pré-mouillage de gravillons légers à l'aide du protocole de pré-mouillage développé ;
- le contrôle de l'ouvrabilité à partir du niveau de serrage du béton frais et l'adjuvantation ;
- le contrôle de la ségrégation par la définition d'une valeur seuil d'indice de serrage fixé à 4,5 ;
- l'estimation de la résistance à la compression par le modèle série/parallèle.

Dans la formulation des BAPLSL, les gravillons légers sont pré-mouillés. L'essai d'absorption dans la pâte de ciment réalisé sur des gravillons légers pré-mouillés a indiqué que l'absorption dans la pâte est nulle et par conséquent, la demande en eau des gravillons légers pré-mouillés dans le béton l'est aussi.

L'ouvrabilité pour assurer l'auto-plaçance des BAPLSL est contrôlée par le niveau de serrage du béton frais comme pour les BAPLSN. Le niveau de serrage des compositions de BAPLSL est relevé et l'adjuvantation est adapté expérimentalement pour atteindre l'étalement souhaité.

L'estimation de la résistance à la compression des BAPLSL n'a pu être réalisée en l'absence de relation efficace. Cependant nous avons intuitivement supposé une relation de proportionnalité entre la résistance à la compression des BAPLSL et le rapport E_{eff}/L comme dans le cas des bétons de masse volumique normale.

5.5.2.1 Contrôle de l'ouvrabilité et de la résistance à la compression

Concrètement, le choix des paramètres de composition pour satisfaire aux critères d'ouvrabilité et de performance mécanique est présidé par deux idées maîtresses. La première relative à l'auto-plaçance, vise à définir un volume de pâte optimisé à l'instar des compositions de BAPLSN B12 et B13. Le volume de pâte dans les compostions de BAPLSL est maintenu autour de 380 l/m^3. L'adjuvantation est ajustée expérimentalement pour atteindre l'étalement souhaité. La seconde relative à la performance mécanique est liée à l'optimisation du dosage en ciment et au choix du rapport E_{eff}/L. Le rapport est pris entre 0,45 et 0,5. La proportion volumique d'addition calcaire dans le liant est comprise entre 0,2 et 0,36.

5.5.2.2 Contrôle de la ségrégation

La stabilité du BAPLSL va dépendre de la proportion volumique de gravillons. Il est donc important définir un rapport volumique gravillons/sable approprié pour assurer l'homogénéité du béton. Le rapport volumique gravillons/sable est pris entre 0,65 et 0,90. De plus, l'indice de serrage est pris entre 5,0 et 6,5 pour garder une bonne cohésion dans les mélanges. L'utilisation d'un agent de viscosité est parfois associée à celle d'un superplastifiant pour contrôler la viscosité apparente du mélange.

5.5.3 Synthèse et analyse des résultats

Les compositions de béton auto-plaçants de sable léger (BAPSL) sont simulées, réalisées et testées à l'état frais et à l'état durci. La masse volumique réelle et l'étalement sont mesurés à l'état frais tandis que la masse volumique réelle sèche et la résistance à la compression sont mesurées à l'état durci.

5.5.3.1 Composition des BAPLSL

Le **Tableau 5.28** présente les compositions réelles des BAPLSL. La proportion volumique de gravillons légers est autour de 30 %. Le dosage en ciment varie entre 408 et 440 kg/m^3 de béton. La proportion volumique d'addition calcaire est fixée autour de 20 % du dosage en ciment à l'exception de la composition BS3 où ce paramètre est porté à 0,36. Le rapport E_{eff}/L des différentes compositions est compris entre 0,45 et 0,48 à l'exception de la composition BS3 où ce rapport est de 0,31. Les compositions BS1, BS2 et BS3 sont constituées de granulats légers (sable et gravillons) alors que la composition BS4 contient en plus des granulats légers, 7 % (en volume) de sable naturel.

L'utilisation d'un agent de viscosité a été utile dans les compositions BS2 et BS4 pour limiter le risque de ségrégation du béton. L'ajout du sable naturel en complément au sable léger dans la composition BS4 a permis sans doute de stabiliser le mélange.

Les dosages en ciment dans les compostions de BAPLSL sont comparables aux dosages pratiqués dans l'industrie. Par exemple les dosages de ciment proposés par les producteurs de bétons légers Argex et Granulex sont autour de 400 kg/m^3 pour un niveau de résistance similaire (www.argex.eu/fr) et (www.granulex.fr).

5.5.3.2 Composition des mortiers et des pâtes

La composition des mortiers et des pâtes qui constituent les différents bétons est déduite des compositions réelles. Les **Tableaux 5.29** et **5.30** présentent les détails des compositions de mortiers et de pâtes des BAPLSL. Dans les mortiers, la proportion volumique de sable léger est comprise entre 46 et 49 % et le volume de pâte se situe autour de 500 l/m^3. La proportion volumique de ciment dans la pâte est autour de 35 %.

Tableau 5.28
Compositions réelles des BAPLSL de la famille BAPL I

	N°	C (kg)	AC (kg)	SIL (kg)	ARG 0/4 (kg)	SCH 0/4 (kg)	ARG 4/8 (kg)	SCH 4/8 (kg)	Vg (%)	SP (kg)	AV (kg)	E_{eff} (kg)	E_{eff}/L	Vp (l)	ωc
Compositions	BS1	425	90	-	341 (0)	-	426 (12,6)	-	34	0,75	-	246	0,47	380	0,40
	BS2	430	91	-	353 (22,3)		332 (11,7)	-	27	0,83	4,16	252	0,48	375	0,40
	BS3	439	223	-	-	503 (9)	-	410 (12,5)	32	0,93	-	202	0,31	383	0,52
	BS4*	408	87	185 (5,2)	-	424 (8,5)	- (8,5)	356	28	0,48	1,98	221	0,45	378	0,41

Tableau 5.29
Compositions théoriques des mortiers de BAPLSL de la famille BAPL I

	N°	C (kg)	AC (kg)	SIL (kg)	ARG 0/4 (kg)	SCH 0/4 (kg)	Vs (%)	SP (kg)	AV (kg)	E_{eff} (kg)	E_{eff}/L	Vp (l)
Compositions	MBS1	530	112	-	425	-	48	0,94	-	257	0,47	467
	MBS2	519	109	-	427		49	1,00	5,03	271	0,48	482
	MBS3	560	285	-	-	642	46	1,19	-	258	0,31	542
	MBS4	539	114	244	-	559	49	0,64	2,61	287	0,45	503

Tableau 5.30
Compositions théoriques des pâtes de BAPLSL de la famille BAPL I

	N°	C (kg)	AC (kg)	Vc (%)	SP (kg)	AV (kg)	E_{eff} (kg)	E_{eff}/L
Compositions	PBL1	1 135	240	36	2,01	-	550	0,47
	PBL2	1 077	227	34	2,08	10,43	563	0,48
	PBL3	1 034	525	33	2,19	-	476	0,31
	PBL4	1 072	227	34	1,27	5,19	570	0,45

5.5.3.3 Propriétés à l'état frais

a) Ouvrabilité des compositions de BAPLSL

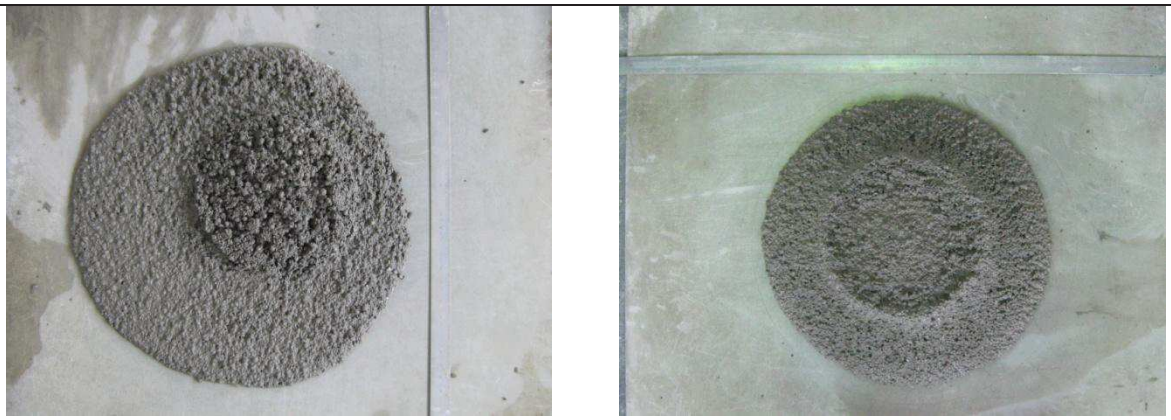
La masse volumique réelle (MVR) et l'étalement des BAPLSL sont présentés au **Tableau 6.4**. Ces bétons affichent un étalement entre 555 et 650 mm à l'exception de la composition BS2 qui présente un étalement de 450 mm. Les BAPLSL BS1, BS3 et BS4 sont classés SF1. La valeur de l'indice de serrage est autour de 6,0 pour les compositions BS1, BS2, BS3 et autour de 5,0 pour le béton BS4.

D'après (De Larrard 1999) il existe essentiellement deux techniques pour formuler les bétons auto-plaçants (BAP). La première consiste à utiliser une grande quantité d'éléments fins (de l'ordre de 500 à 600 kg/m^3) et la seconde consiste à compenser l'effet filler des éléments fins par l'emploi d'agent de viscosité. L'utilisation d'un agent de viscosité a été nécessaire pour accroitre la viscosité apparente du béton à volume de pâte constant. Dans la composition BS4, la diminution de la quantité de liant est compensée par l'ajout d'un agent de viscosité. Les **Figures 5.16 (b)** et **5.17 (b)** illustrent l'étalement des BAPLSL BS2 et BS4.

La composition BS4 est homogène et auto-plaçant. La diminution du dosage en gravillons a permis d'améliorer l'homogénéité du béton. L'ajout à faible proportion (7 % en volume) du sable naturel à sans doute contribuer à la stabilité du béton.

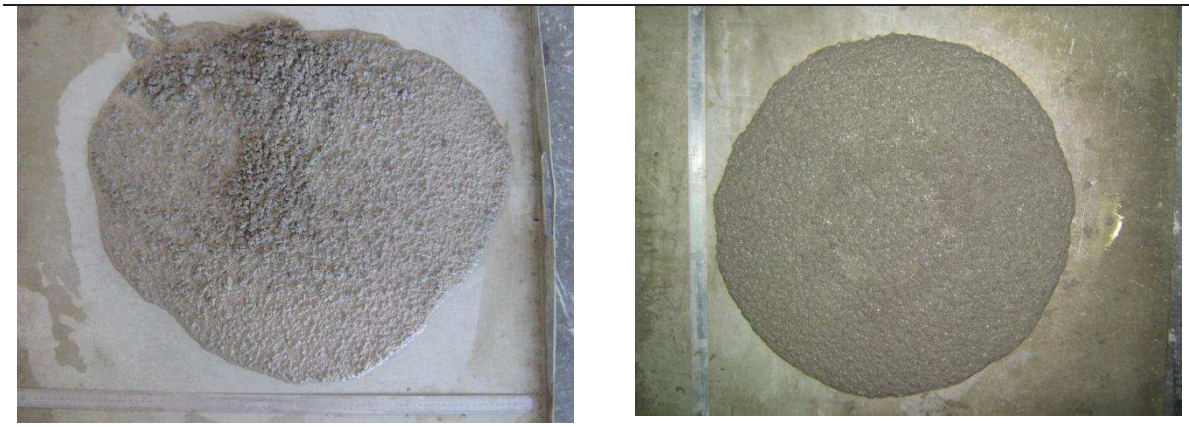
Tableau 5.31
Propriété à l'état frais des BAPLSL

Famille	N°	MVR (kg/m^3)	SF (mm)	K
BAPL I	BS1	1 582	555	5,8
	BS2	1 580	450	6,0
	BS3	1 845	650	5,9
	BS4	1 748	593	5,1



a) BS1-ARG b) BS2-ARG

Figure 5.16 Etalement des BAP de sable léger d'argile expansée



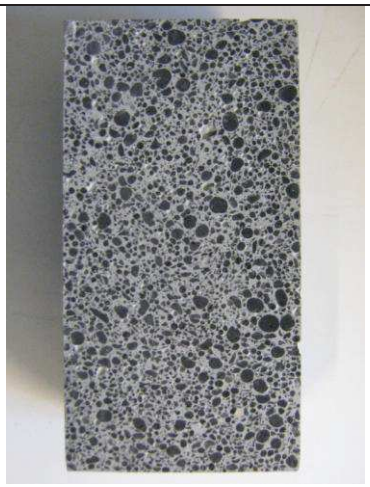
a) BS3-SCH b) BS4- SCH

Figure 5.17 Etalement des BAP de sable léger d'ardoise expansée

Les résultats sur les propriétés à l'état frais montrent que l'approche proposée pour donner un caractère auto-plaçant aux BAPLSL permet d'être proche des l'objectifs visés en termes d'ouvrabilité même si elle reste à améliorer.

b) Stabilité des mélanges de BAPLSL

Les bétons BS1 et BS3 sont lancées pour valider le choix des paramètres respectivement pour les bétons de sable léger d'argile expansée et d'ardoise expansée. Les résultats montrent que ces bétons présentent des signes visibles de ségrégation marqués par une accumulation des gravillons au cœur de la galette voire la formation d'un dôme pour le béton BS1. Les **Figures 5.16 (a)** et **5.17 (a)** illustrent l'hétérogénéité des bétons de sable léger BS1 et BS3.



BS2-ARG

Figure 5.18 Distribution des granulats légers d'argile expansée dans la matrice cimentaire du béton BS2

Pour formuler des bétons plus homogènes, les compositions de sable léger BS2 et BS4 sont proposées avec des aménagements tenant compte de la proportion volumique de gravillons légers

et de la viscosité apparente de la pâte. Ainsi, le rapport volumique gravillons/sable est passé de 0,88 pour le béton BS1 à 0,66 le béton BS2 et de 0,95 pour le béton BS3 à 0,75 pour le béton BS4. La composition BS2 bien qu'étant plus homogène n'atteint pas l'étalement minimum requis de 550 mm vraisemblablement du fait de l'adjuvantation. Cependant, la **Figure 5.18** montre une distribution homogène des granulats légers dans la matrice cimentaire de la composition BS2. Il n'y a donc pas de ségrégation à l'échelle de l'éprouvette. La quantité d'agent de viscosité (0,4 % d'extrait liquide rapporté à la masse du liant) a vraisemblablement contribué à l'augmentation de la viscosité apparente du béton et donc à réduire l'ouvrabilité du matériau. L'indice de serrage est passé de 5,8 à 6,0 ; ce qui accréditerait cette hypothèse.

5.5.3.4 Propriétés à l'état durci

La masse volumique réelle sèche et les résistances moyennes à la compression à 1 et à 28 jours des bétons de sable léger sont présentées au **Tableau 5.32**. La masse volumique réelle sèche des formules BS1 et BS2 est respectivement de 1 350 et 1 330 kg/m^3 tandis que celle des formules BS3 et BS4 est respectivement de 1 665 et 1 590 kg/m^3. Nous constatons que les BAPLSL contenant des granulats d'argile expansée (BS1 et BS2) sont plus légères que les BAPLSL de granulats d'ardoise expansée.

Les résultats sur la résistance à la compression des bétons de sable léger indiquent que la performance mécanique des compositions proposées est proche de l'objectif de 35 MPa. Les aménagements réalisés sur les compositions BS1 et BS3 pour améliorer l'homogénéité du béton ont réduit la résistance à la compression des bétons de BS2 et BS4. La résistance à la compression passe de 40 MPa pour le béton BS1 à 29 MPa pour le béton BS2 et de 62 MPa pour le béton BS3 à 41 MPa pour le béton BS4. La **Figure 5.19** montre que la résistance moyenne à la compression à 28 jours augmente lorsque le rapport E_{eff}/L diminue. (Lo et al. 2007) soulignent qu'avec un rapport E_{eff}/L plus faible que 0,3, il est possible de produire des BAPLSL de résistance équivalente à celle des bétons auto-plaçants de masse volumique normale (BAPN) moyennant un dosage conséquent de superplastifiant et d'agent de viscosité.

Tableau 5.32
Propriétés mécaniques des BAPLSL

Famille	N°	MVR sèche (kg/m^3)	fcm,cube (MPa)	
			1 j	28 j
BAPL I	BS1	1 350	23	40
	BS2	1 330	14	29
	BS3	1 665	-	62
	BS4	1 590	17	41

La composition BS1 affiche un résultat intéressant vis-à-vis des objectifs attendus. Ce béton présente une masse volumique réelle sèche de 1 350 kg/m^3 et une résistance à la compression à 28 jours de 40 MPa. Cependant, un détail d'hétérogénéité subsiste et il conviendra de le corriger. Il est envisageable d'améliorer la stabilité des compositions BS1 et BS2 dont la gamme de masse

volumique réelle sèche reste très intéressante pour l'industrie en agissant sur différents leviers. Le rééquilibrage du squelette granulaire en diminuant le rapport gravillons/sable et l'augmentation du volume de pâte permettrait sans doute d'améliorer le caractère auto-plaçant et les performances mécaniques de ces bétons.

La composition BS4 est la plus aboutie des BAPLSL. Ce béton est auto-plaçant et homogène. Il affiche une masse volumique réelle sèche de 1 590 kg/m^3 et une résistance moyenne à la compression à 28 jours de 41 MPa.

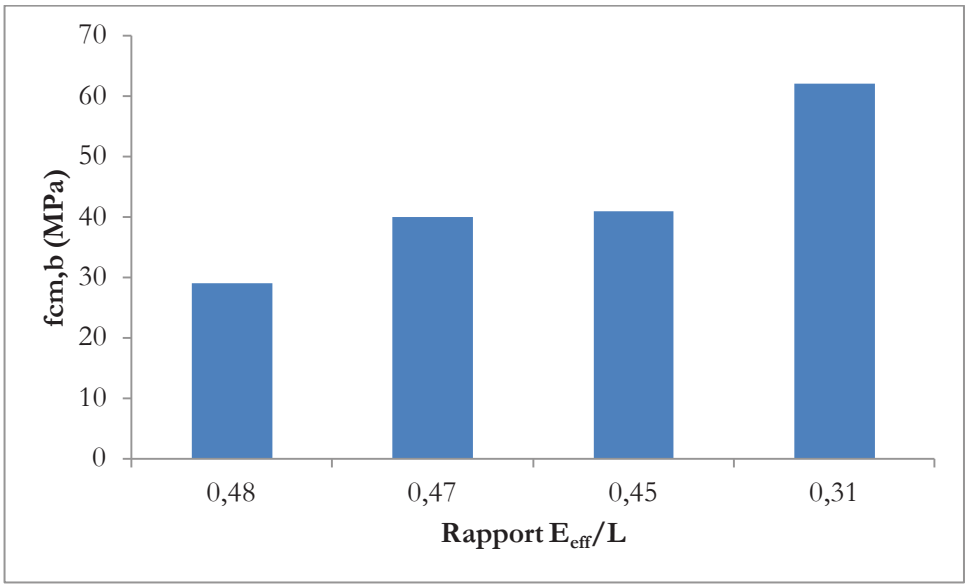


Figure 5.19 Rapport entre la résistance à la compression à 28 jours et le rapport E_{eff}/L des BAPLSL

Même si les formules de BAPLSL sont proches des objectifs visés en termes de résistance, l'ouvrabilité de ces bétons devra être améliorée. Il y a sans doute un travail d'optimisation qui reste à parfaire pour proposer une plus large gamme de BAPLSL couvrant les classes d'étalement de SF1 à SF3.

5.5.3.5 Bilan sur la formulation des BAPLSL de la famille BAPL I

Les compostions de BAPLSL présentées sont proches des objectifs industriels en termes de masse volumique réelle sèche et de résistance à la compression. Le béton BS4 qui est la composition la plus aboutie présente une masse volumique réelle sèche de 1 590 kg/m^3 et une résistance moyenne à la compression à 28 jours de 41,0 MPa. Le béton BS1 est aussi un pari intéressant car cette composition allie une masse volumique réelle sèche de 1 350 kg/m^3 avec un niveau de résistance équivalent à celui du béton BS4.

La démarche de formulation adoptée pour les BAPLSL donne in fine des résultats satisfaisants puisqu'elle a permis de proposer des bétons compatibles avec les exigences de la famille BAPL I. Néanmoins, la démarche reste perfectible et mérite d'être approfondie pour contrôler davantage l'ouvrabilité et l'homogénéité du béton.

5.6 Conclusion

Les bétons auto-plaçants légers de sable normal (BAPLSN) sont simulés à partir de la méthode de formulation développée pour proposer des formules de bétons répondant aux critères des trois familles de BAPL. La mise en œuvre de la méthode a permis de formuler des bétons auto-plaçants légers de sable normal (BAPLSN) de classes d'étalement allant de SF1 à SF3, de classes de masse volumique D1.8 et D2.0 et de classes de résistance allant de LC35/38 à LC50/55. Les compositions sont testées sur des BAPLSN avec des gravillons d'argile expansée et sur des BAPLSN avec des gravillons d'ardoise expansée.

Grace à la méthode de formulation, des bétons des familles BAPL II et III sont réalisés de façon satisfaisante vis-à-vis des exigences du cahier des charges en termes d'ouvrabilité, de masse volumique réelle sèche et de résistances moyennes à la compression. Sur la base des propriétés à l'état frais et l'état durci, nous pouvons valider la méthode pour la formulation de BAPLSN même si les compositions de la famille BAPL II affichent un dosage en ciment plus élevé. Les mesures correctives telles que l'augmentation du rapport E_{eff}/L et du dosage en superplastifiant, la diminution du volume de pâte devront permettre de corriger ce défaut.

Les formules de BAPLSN proposées pour la famille BAPL I bien qu'étant proches des objectifs de résistance ne sont pas tout à fait satisfaisants vis-à-vis des objectifs de masse volumique réelle sèche. Cependant, la proximité des résultats par rapport aux critères du cahier des charges laisse croire que la diminution du rapport E_{eff}/L et l'augmentation du rapport gravillons/sable permettront de répondre aux exigences de cette famille.

Les bétons auto-plaçants légers de sable léger (BAPLSL) sont aussi explorés. La principale difficulté rencontrée pour la formulation de ce type de matériau reste le contrôle de la ségrégation. La méthode de formulation élaborée à partir des compostions de BAPLSN a donc été adaptée afin améliorer l'homogénéité des formules de BAPLSL. Ces améliorations portent notamment sur la diminution du rapport gravillons/sable pour limiter le risque de formation de dôme au centre de la galette et le recours à un agent de viscosité pour améliorer la cohésion entre la pâte et les granulats légers. Les formules de BAPLSL proposées répondent aux critères de la famille BAPL I même si des améliorations sur le caractère auto-plaçant sont à prévoir. Avec des masses volumiques réelles sèches autour de 1 350 kg/m^3 et une résistance moyenne à la compression de 40 MPa, les BAPLSL sont prometteurs pour l'industrie à la recherche de matériau plus léger et performant mécaniquement.

L'identification de relations efficaces entre la masse volumique réelle sèche à l'état durci, la masse volumique réelle à l'état frais et la résistance moyenne à la compression augure d'une approche de formulation simplifiée. Cette approche consisterait à piloter la résistance à la compression des BAPLSN à partir de la masse volumique réelle qui reste une donnée accessible rapidement. Cette approche permettra d'anticiper un arbitrage sur la légèreté de la formule dès la phase de pré-formulation pour atteindre après 28 jours de cure, la classe de masse volumique souhaitée à l'état durci.

Conclusion générale

La porosité des granulats légers est déterminante pour les propriétés thermiques et hydriques des bétons légers. Elle régit les transferts d'eau entre la pâte et les granulats et vice-versa. Ces transferts influent sur le comportement à l'état frais et l'état durci des bétons légers. Une forte absorption des granulats légers peut engendrer un raidissement précoce préjudiciable au bon maintien de rhéologie du béton. A contrario, l'introduction de granulats légers préalablement saturés d'eau dans des bétons à faible rapport eau/ciment agit comme une source additionnelle d'eau pour assurer une cure interne bénéfique à l'hydratation.

La synthèse bibliographique a montré que les deux problématiques majeures dans la formulation des bétons auto-plaçants légers (BAPL) restent l'absorption du fait de la grande porosité des granulats légers et la ségrégation du fait de la différence de masse volumique entre la pâte et les granulats légers. La structure poreuse qui apporte la légèreté aux granulats légers est à la fois un avantage (améliore l'adhérence à l'interface pâte/granulat) et un inconvénient (accroit la variabilité des propriétés à l'état frais) notamment dans la composition des bétons auto-plaçants légers. Les méthodes existantes bien qu'étant éprouvées conservent encore une bonne part d'empirisme.

Pour répondre aux objectifs industriels de la thèse, nous avons proposé une approche de formulation plus rationnelle qui repose sur des paramètres quantifiables et sur l'optimisation des propriétés de transfert des granulats légers.

Pour quantifier véritablement les transferts d'eau entre les granulats légers et la pâte, nous avons mis au point un protocole d'absorption dans la pâte de ciment.

Ce protocole a permis de montrer que l'absorption d'eau du granulat léger dans la pâte est différente de celle dans l'eau. Le granulat léger peut absorber de 20 à 25 % en moins dans une pâte de rapport eau/ciment de 0,4 que dans l'eau pendant les 2 premières heures. En revanche, pour un granulat de masse volumique normale, l'absorption dans la pâte est similaire à l'absorption dans l'eau sans doute en raison de la très faible porosité des grains.

La description du mécanisme d'absorption dans la pâte de ciment montre que la variable d'ajustement dans le transfert d'eau de la pâte vers le granulat est la quantité d'eau libre échangeable. L'absorption du granulat léger dans la pâte de ciment dépend de la disponibilité de l'eau libre et de la vitesse de raidissement de la pâte. Dans des systèmes de rapport eau/ciment de 0,4 ; 0,5 et 0,6, l'absorption d'eau du granulat léger évolue à vitesse décroissante jusqu'à 2 heures tandis que dans le système de rapport eau/ciment de 0,3, la vitesse d'absorption devient nulle au bout de 30 minutes par exemple.

L'absorption d'eau du granulat léger dans la pâte de ciment se traduit par un transfert d'eau de la pâte vers le granulat. Ce transfert entraine une diminution progressive du volume de pâte et une modification du comportement rhéologique du mélange pâte/granulat à l'état frais. La traduction macroscopique de la réduction de la quantité d'eau libre du fait de l'absorption du granulat est

l'accroissement de la viscosité apparente de la pâte. Cet accroissement de la viscosité apparente réduit l'ouvrabilité du mélange.

Le transfert d'eau de la pâte vers le granulat léger entraîne également une fluctuation des paramètres de composition tels que le volume de pâte, le rapport eau efficace/ciment et la masse volumique réelle. Par exemple, une absorption de 7 % (en masse) dans une pâte de rapport eau/ciment de 0,4 induit une diminution de 10 % du rapport eau/ciment dans un mélange pâte/granulat.

Le phénomène de raidissement de la pâte résulte de l'action combinée de l'absorption du granulat léger et du phénomène d'hydratation. Pour contrôler l'effet de l'absorption sur le raidissement précoce de la pâte, nous avons entrepris d'étudier l'impact de la teneur en eau initiale du granulat sur l'étalement et le maintien de rhéologie du mélange pâte/granulat. Cette étude a montré qu'une diminution de volume de pâte de 5 % du fait de l'absorption du granulat sec engendre une réduction de 10 % de l'étalement du mélange pâte/granulat par rapport à l'étalement initial. A contrario, une augmentation du volume de pâte de 3 % du fait de l'apport d'eau par le granulat saturé induit un accroissement d'étalement de 10 %. Les résultats ont révélé ainsi l'importance de l'action de la teneur en eau initiale du granulat sur l'ouvrabilité voire les performances du mélange pâte/granulat. L'introduction de granulat sec peut engendrer une diminution importante de l'étalement dans les premières minutes et donc une réduction du rapport eau/ciment tandis que l'utilisation de granulat saturé en eau peut conduire à une augmentation de l'étalement et donc du rapport eau/ciment. Le compromis est donc de lubrifier de façon optimale le granulat léger tout en favorisant une absorption résiduelle dans la pâte susceptible d'améliorer l'interface pâte/granulat. Nous avons donc opté pour un pré-mouillage à 5 minutes qui va préserver du raidissement précoce (avec des grains à surface humide) tout en laissant un degré de liberté pour une absorption volumique dans la pâte.

L'optimisation de la demande en eau des granulats légers a conduit à réaliser sur des granulats légers pré-mouillés, l'essai d'absorption dans la pâte afin de limiter les incertitudes dans le calcul de l'eau efficace. Cette démarche a permis de montrer que les granulats légers pré-mouillés n'absorbent pas d'eau dans la pâte au cours de la première heure. La transposition de ce résultat au béton a permis de calculer la quantité d'eau efficace dans les formules de bétons auto-plaçants légers (BAPL).

Après avoir traité la question de l'absorption des granulats légers dans le béton et de l'optimisation de leur demande en eau dans la définition de l'eau efficace, nous nous sommes penchés sur une approche de formulation de BAPL plus rationnelle. L'idée de la méthode de formulation est de définir l'auto-plaçance autour du niveau de serrage du béton frais. La méthode de formulation proposée est une méthode itérative qui repose sur deux paramètres quantifiables que sont le volume de pâte et la concentration de liant. Le volume de pâte permet de piloter l'ouvrabilité du matériau tandis que la concentration de liant associée à la qualité de la pâte, contrôle la résistance du béton.

Le niveau de serrage du squelette granulaire est contrôlé par l'indice de serrage mis en avant dans le modèle d'empilement compressible. L'application de ce modèle sur des compositions issues de l'industrie a permis de délimiter un intervalle d'intérêt de valeurs d'indice de serrage compatibles

avec les bétons auto-plaçants légers de sable normal faiblement adjuvantés. Un indice de serrage compris entre 4,5 et 5,5 permet de limiter le risque de ségrégation tout en garantissant le caractère auto-plaçant du béton. Le risque de ségrégation est quantifié à partir de l'indice de ségrégation déduit de l'essai à la colonne.

Le modèle série/parallèle a servi pour estimer la résistance à la compression des BAPL. La confrontation des données réelles et des données du modèle indique une erreur moyenne de 6 % ; ce qui est satisfaisant compte tenu de la variabilité de ce matériau.

La méthode de formulation a été validée sur trois familles de BAPL (BAPL I, BAPL II et BAPL III) et sur deux types de granulats légers dont l'un d'argile expansée et l'autre d'ardoise expansée. Sa mise en œuvre a permis de simuler et de réaliser des formules de bétons auto-plaçants légers de sable normal (BAPLSN) de classes d'étalement allant de SF1 à SF3, de classes de masse volumique D1.8 et D2.0 et de classes de résistance allant de LC35/38 à LC50/55.

Les formules proposées pour les bétons des familles BAPL II et III sont satisfaisantes vis-à-vis des exigences du cahier des charges en termes d'ouvrabilité, de masse volumique réelle sèche et de résistances moyennes à la compression. Des mesures correctives telles que l'augmentation du rapport E_{eff}/L et du dosage en superplastifiant, la diminution du volume de pâte ont permis de réduire la quantité en ciment des formules. Toutefois, elles ont conduit à des systèmes plus adjuvantés dont l'indice de serrage est naturellement plus élevé (5,9 et 6,5 pour les BAPLSN III contre 4,4 et 5,0 pour les BAPLSN II).

Pour la famille BAPL I, deux séries de formules sont proposées. La première est constituée de formules de BAPLSN qui affichent des masses volumiques réelles sèches et des résistances proches des objectifs du cahier des charges. L'analyse des résultats laisse penser que la diminution du rapport E_{eff}/L et l'augmentation du rapport gravillons/sable permettront de satisfaire pleinement aux critères de cette famille de BAPL. La seconde série est constituée de bétons auto-plaçants légers de sable léger (BAPLSL) dont la principale difficulté reste le risque de ségrégation. La méthode de formulation élaborée à partir des compostions de BAPLSN a donc été adaptée pour améliorer l'homogénéité des formules de BAPLSL. Ces améliorations ont porté notamment sur la diminution du rapport gravillons/sable et le recours à un agent de viscosité. Cette adaptation a permis de proposer des formules de BAPLSL qui satisfont aux critères de la famille BAPL I même si l'homogénéité et le caractère auto-plaçant restent à parfaire. Cette piste est intéressante car elle conduit à des formules plus légères avec des masses volumiques réelles sèches autour de 1350 kg/m^3 et une résistance moyenne à la compression de 40 MPa. Les BAPLSL peuvent constituer une solution innovante pour l'industrie du béton dans le contexte de la nouvelle réglementation thermique pour les bâtiments.

L'établissement de relations efficaces entre la masse volumique réelle sèche à l'état durci, la masse volumique réelle à l'état frais et la résistance moyenne à la compression augure d'une approche de formulation simplifiée. Cette approche consisterait à piloter la résistance à la compression des BAPLSN à partir de la masse volumique réelle à l'état frais qui reste une donnée accessible rapidement. Cette approche permettra d'anticiper un arbitrage sur la légèreté de la formule durcie dès la phase de pré-formulation.

Perspectives

Une perspective immédiate serait de simplifier la méthode de formulation des bétons auto-plaçants de sable normal (BAPLSN) en intégrant des relations entre les masses volumiques réelles et la résistance à la compression. L'estimation de la résistance à partir de la masse volumique réelle à l'état frais ou à l'état durci permettrait d'anticiper et d'arbitrer la composition des bétons à partir du critère de légèreté dès la phase de pré-formulation.

L'approche de formulation proposée pour les bétons auto-plaçants légers de sable léger (BAPLSL) doit être approfondie afin d'améliorer le caractère auto-plaçant et la résistance à la ségrégation de ces bétons. Les améliorations porteront notamment sur la définition du rapport gravillons/sable optimal pour assurer l'homogénéité du béton et le choix des dosages optimaux de superplastifiant et d'agent de viscosité pour éviter un effet d'accumulation qui limiterait l'ouvrabilité. L'identification d'une relation efficace entre la masse volumique réelle à l'état et l'état durci et la résistance à la compression sur une série de données plus importante serait un atout pour estimer la résistance de ce type de béton.

La durabilité des bétons auto-plaçants légers de sable normal (BAPLSN) a été abordée en première approche par des essais de porosité accessible à l'eau et de carbonatation accélérée. Il conviendra d'approfondir ces expérimentations et de les compléter par d'autres paramètres de durabilité tels que les chlorures. Ces expérimentations devront être étendues aux bétons auto-plaçants légers de sable léger (BAPLSL).

Références bibliographiques

Abrams M. S. and Gustaferro A. H. (1968)
Fire endurance of concrete slabs as influenced by thickness, aggregate type and moisture
Journal PCA Research Development Laboratories, V. 10, N° 2, pp. 9-24

ACI 213R-03 (2003)
Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete
Reported by ACI Committee 213, 2003

ACI 308R-01 (2001)
Guide to curing concrete
Reported by ACI Committee 308

ACI 211.2-98 (1998)
Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete (ACI 211.2-98)
Reported by ACI Committee 211, 1998

ACI 213 R-79 (1981)
At the high end of the lightweight concrete spectrum Structural lightweight concrete
Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete (ACI 213R-79); 1981

Adrian P. (1968)
Béton léger considéré comme un matériau porteur : technologie du béton léger, calcul des ouvrages
Rapport du congrès AIPC volume 8 (1968) publié le 14 05 2014 par Ein Dienst der ETH-bibliothek

Akcay B. and Tasdemir M. A. (2010)
Effect of distribution of lightweight aggregates on internal curing of concrete
Cement and Concrete Research 32 (2010) 611-616

Andreotti B., Forterre Y. et Poulliquen O. (2011)
Les milieux granulaires
CNRS Editions, 15 rue Malebranche, 75005 Paris

ARGEX
Fabricant de granulats d'argile expansée par four rotatif
www.argex.eu/fr

Arnould M. et Virlogeux M. (1986)
Granulats et Bétons Légers
Édition 1986, Presse de l'École Nationale des Ponts et Chaussées

Assaad J., Khayat K. H., Daczko J. A. (2004)
Evaluation of static stability of self consolidating concrete
ACI Materials Journal 101 (3), 2004, pp. 207-215

ASTM C173 (2009)
Standard test method of air content of freshly mixed concrete by the volumetric method
ASTM International Committee C09, 2009

Banfill P. F. G. (2011)
Additivity effects in the rheology of fresh concrete containing water-reducing admixtures
Construction and Building Materials 25 (2011) 2955-2960

Baronio G., Berra M., Bertolini L., and Pastore T. A. (1996)
Steel corrosion monitoring in normal and total lightweight concrete exposed to chloride and sulfate solutions, Part II : Polarization resistance measurements
Cement and Concrete Research 26 (5) (1996) 691-696

Belin P., Habert G., Thiery M., Roussel N. (2013)
Cement paste content and water absorption of recycled concrete coarse aggregates
Materials and Structures DOI 10.1617/s 11527-013-0128-z

Bentur A., Igarashi S., Kovler K. (2001)
Prevention of autogenous shrinkage in high-strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates
Cement and Concrete Research Vol. 31 pages 1587-1591; 2001

Bentz D. P. (2009)
Influence of internal curing using lightweight aggregates on interfacial transition zone percolation and chloride ingress in motars
Cement & Concrete Composites 31 (2009) 285-289

Bentz D. P., Lura P., Roberts J. W. (2005)
Mixture proportioning for internal curing
Concrete International 2005; 27 (2): 35-40

Bernier G. (2009)
Formulation des bétons.
Techniques de l'ingénieur C 2 210 – 2009

BPEL 1991
Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton précontraint suivant la méthode des états limites
Fascicule 62, Titre 1er du CCTG – Travaux, section 2 : béton précontraint
CSTB 2009

Bremner T. W., Holm T. A. and Stepanova V. F. (1994)
Lightweight concrete: A proven material for two millennia
Proceedings of Advances in Cement and Concrete, Universtity of New Hampshire, Durham, S.C pp. 37-41

Bremner T. W. and Holm T. A. (1986)
Elastic compatibility and the behavior of concrete
ACI journal, Proceedings V. 83 N. 2, pp. 244-250

Brouwers H. J. H. and Radix H. J. (2005)
Self compacting concrete: theorical and experimental study
Cement and Concrete Research 35 (2005) 2116-2136

Buenfeld N. R., Newman J. B., Page C. L. (1986)
The resistivity of mortar immersed in seawater.
Cement and Concrete Research 16 (41) (1986) pp. 511–524

Bui. V. K. and Montgomery D. (1999)
Mixture proportioning method for self-compacting high performance concrete with minimum paste volume
Proceedings of the 1st international RILEM Symposium, 1999, Stockholm, pp 373-384

CALIBE (2000)
MBE, Fabrication et suivi rhéologique des bétons - La méthode MBE, pp. 5-10
Projet National CALIBE 2000

Castro J., Keiser L., Golias M., Weiss J. (2011)
Absorption and desorption properties of fine lightweight aggregate for application to internally cured concrete mixtures
Cement & Concrete Composites 33 (2011); pp. 1001-1008

Cauberg N. and Kestemont X. (2009)
Lightweight self-consolidating concrete: systematic approach and case study
BFT International 08/2009

Chen H. J., Yang M. D., Tang C. W., Wang S. Y. (2012)
Producing synthetic lightweight aggregates from reservoir sediments
Construction and Building Materials 28 (2012) pp. 387-394

Chia K. S., Kho C. C. and Zhang M. H. (2005)
Stability of fresh lightweight aggregate concrete under vibration
ACI Materials Journal 102 (5) (2005): 347-354

Choi Y. W., Kim Y. J., Shin H. C. and Moon H. Y. (2006)
An experimental research on the fluidity and mechanical properties of high-strength lightweight self-compacting concrete
Cement and Concrete research 36 (2006) pp. 1596-1602

Cortas R., Rozière E., Loukili A. (2010)
Effet du taux de saturation des granulats sur le retrait du béton
XXVIIIième Rencontres Universitaires de Génie Civil – La Bourboule du 2 au 4 Juin 2010. Référence n° 160 - Session Matériaux - Pâtes cimentaires p. 642- 651

Couasnet Y. (2007)
Propriétés et caractéristiques des matériaux de construction
Éditions du Moniteur, Paris 2007

De Larrard F. (1999)
Structures granulaires et formulation des bétons
Collection Études et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° OA 34 ; 1999

De Larrard F., Bosc F., Catherine C. et de Florenne F. (1996)
La nouvelle méthode des coulis de l'AFREM pour la formulation des bétons à hautes performances
Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées n°202, pp 61-69, mars-avril, 1996.

De Larrard F. (1995)
Une approche de la formulation des bétons légers de structure
Bulletin de Liaison des Laboratoire des Ponts et Chaussées n° 195, 1995 ; pp 39-47

De Larrard F. et Tondat P. (1993)
Sur la contribution de la topologie du squelette granulaire à la résistance en compression du béton
Materials and Structures, RILEM, Vol. 26, pp. 505-516.

De Larrard F. et Le Roy R. (1992)
Relations entre formulation et quelques propriétés mécaniques des bétons à hautes performances
Materials and Structures, RILEM, Vol. 25, pp. 464-475.

Domone P. L. J., Xu Y., Banfill P. F. G. (1999)
Developments of two-point workability test for high-performance concrete
Magazine Concrete Research 1999; 51: 171-180 - 1999

EIPPCB (2005)
Best available techniques in ceramic manufacturing industry
European Commission Directorate General Joint Research Centre, Draft Reference Document; 2005

Elsharief A., Menashi D., Olek J. (2005)
Influence of lightweight aggregate on the microstructure and durability of mortar
Cement and Concrete Research 35 (2005) 1368-1376

Everhart J., Ehlers E., Johnson J. (1958)
A study on lightweight aggregate
Engineering Experiment Station Bulletin n° 169 part II, pp 21-45, Ohio State University

Ferraris C. F. and De Larrard F. (1998)
Testing and Modelling of Fresh Concrete Rheology
NISTIR 6094, National Institute of Standards and Technology, 59 pp., February

Gonzàlez-Corrochano B., Alonso-Azcàrate J., Rodas M., Luque F. J., Barrenechea J. F. (2010)
Microstructure and mineralogy of lightweight aggregates produced from washing aggregate sludge, fly ash and used motor oil
Cement & Concrete Composites 332 (2010) 694-707

GRANULEX
Fabricant de granulats légers d'ardoise expansée par four rotatif
www.granulex.fr

Green S., Brooke N. and McSaveney L. (2009)
Pumice aggregates for structural lightweight and internally cured concrete
New Zealand Concrete Industry Conference. Rotorua Convention Centre, Rotorua – October 2009

Gündüz L. (2008)
The effects of the pumice aggregate/cement ratios on the low-strength concrete properties
Construction and Building Materials 22 (2008) 721-728

Haist M., Mechtcherine V., Beitzel H., Müller H. S. (2003)
Retrofitting of building structures using pumpable self-compacting lightweight concrete
Proceedings of the third international RILEM conference on SCC, August 2003, Reykjavik, Island, pp 776-785

Haque N. and Al-Khaiat H. (1999)
Strength and durability of lightweight concrete in hot marine exposure conditions
Materials and Structures/Matériaux et Constructions, Vol. 32, pp 533-538

Helland S., Holand I. and Smeplass S. (2000)
Structural LWAC. Specification and guideline for materials and production
Edition 2nd International symposium on Structural lightweight aggregate concrete. Kristiansand 18-22 June 2000
Norwegian Concrete Association, pp. 802-810

Henkensiefken R., Bentz D. P., Nantung T., Weiss J. (2009)
Volume change and cracking in internally cured mixtures made with satured lightweight aggregate under sealed and unsealed conditions
Cement & Concrete Composites 31 (2009) pp. 427-437

Henkensiefken R., Castro J., Bentz D. P., Nantung T., Weiss J. (2009)
Water absorption in internally cured motar made with water-filled lightweight aggregate
Cement and Concrete Research 39 (2009) pp. 883-892

Holm T. A., Bremner T. W., Newman J. B. (1984)
Lightweight aggregate concrete subject to severe weathering
ACI Concrete International. 6 (1984) pp. 49-54

Hu C. (1995)
Rhéologie des bétons fluides
Études et recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, OA 16, pp. 203 ; 1995

Hubertova M. and Hela R. (2007)
The effect of metakaolin and silica fume on the properties of lightweight self-compacting concrete
ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology, Warsan 20-25 May 2007. SP-243, American Concrete Institute, pp. 35-48

Hüsken G., Brouwers H. J. H. (2008)
A new design concept for earth concrete: A theoretical and experimental study
Cement and Concrete Research 38 (2008) 1246-1259

Hwang C. L. and Hung M. F. (2005)
Durability design and performance of self-consolidating lightweight concrete
Construction and Building Materials 19 (2005) 619-626

IDCO
Fabricant de granulats légers à partir de boue de décantation par micro-ondes (magnétons)
www.idco-france.com

ISO DIS 1920-10 (2009)
Testing of concrete
Part 10 : Determination of static modulus of elasticity in compression
International organization for standardization, 2009

Jensen O. M. and Hansen P. F. (2001)
Autogenous deformation and rh-change in perspective
Cement and Concrete Research 31 (12) (2001) pp. 1859-1865

Kasemchaisiri R. and Tangtermsirikul S. (2007)
A method to determine water retainability of porous fine aggregate for design and quality control of fresh concrete
Construction and Building Materials 21 (2007) pp. 1322-1334

Kaszynska M. (2010)
Effect of aggregate mix composition on lightweight self-consolidating concrete
International Rilem Conference on Self Compacting Concrete. Canada 2010, pp. 203-210

Ke Y. (2008)
Caractérisation du comportement mécanique des bétons de granulats légers : Expérience et modélisation
Thèse de doctorat de l'Université de Cergy-Pontoise, 2008

Khayat K. H., Assaad J., Daczko J. (2004)
Comparaison of field-oriented test methods to assess dynamic stability of self-consolidating lightweight concrete
ACI Materials Journal 2004; 101(2) 168-176

Kim Y. J., Choi Y. W., Lachemi M. (2010)
Characteristics of self-consolidating concrete using two types of lightweight coarse aggregates
Construction and Building Materials 24 (2010) pp. 11-16

Kockal N. U. and Ozturan T. (2011)
Characteristics of lightweight fly ash aggregates produced with different binders and heat treatments
Cement and Concrete Composites 33 (2011) 61-67

Kwasny J., Sonebi M., Taylor S. E., Bai Y., Owens K., Basheer M. P. A. and Cleland D. J. (2010)
Influence of the type of coarse lightweight aggregate on fresh properties of semi-lightweight self consolidating concrete
International Rilem Conference on Self Compacting Concrete. Canada 2010, pp. 233-242

Lachemi M., Bae S., Hossain K. M. A. and Sahmaran M. (2009)
Steel-concrete bond strength of lightweight self-consolidating concrete
Materials and Structures 42, pp. 1015 - 1023

Le Roy R. (1996)
Déformations instantanées et différées des bétons à hautes performances
Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, pp. 350 Septembre 1996

Lédée V., De Larrard F., Sedran T. et Brochu F. (2004)
Essais de compacité des fractions granulaires à la table à secousses
Laboratoire Central des Ponts et Chaussée – IST Diffusion des éditions, Juillet 2004, Paris

Liao Y. C and Huang C. Y. (2011)
Effects of CaO addition on lightweight aggregates produced from water reservoir sediment
Construction and Building Materials 25 (2011) pp. 2997-3002

Liu X., Chia K. S. and Zhang M. H. (2010)
Development of lightweight concrete with high resistance to water and chloride-ion penetration
Cement & Concrete Composites 32 (2010) pp. 757-766 - 2010

Liu X. and Zhang M. H. (2010)
Permeability of high-performance concrete incorporating presoaked lightweight aggregates for internal curing
Magazine of Concrete Research, 2010, 62, n° 2 February, pp. 79-89

Lo T. Y., Tang P. W. C., Cui H. Z. and Nadeem A. (2007)
Comparison of workability and mechanical properties of self-compacting lightweight concrete and normal self- compacting concrete
Materials and Research Innovations 11 (1) pp. 45-50 - 2007

Lowke D., Wiegrink K. H., Schiessl P. (2003)
A simple and significant segregation test for SCC
Proceedings of the third international RILEM conference on SCC, August 2003, Reykjavik, Island, pp 356-366

Madandoust R., Ranjbar M. M., Mousavi S. Y. (2011)
An investigation on the fresh properties of self-compacted lightweight concrete containing expanded polystyrene
Cement and Building Materials 25 (2011) pp. 3721-3731

Marchand J. (1992)
Pâtes de ciment : Résultats des essais mécaniques à 28 jours
Rapport interne, LCPC, Juin 1992

Maruyama I., Kanematsu M., Noguchi T., Iikura H., Taramoto A., Hayano H. (2009)
Evaluation of water transfer from saturated lightweight aggregate to cement paste matrix by neutron radiography
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 605 pp. 159-162

Michtcherine V., Haist M., Hewener A. and Müller H. S. (2001)
Self-compacting lightweight concrete – A new high-performance building material
In Ozawa K. and Ouchi M. Edition 2nd International Symposium on Self-compacting Concrete. Tokyo 23-25 October 2001 COMS Engineering Corporation, pp. 21-28

Mills-Beale J., You Z., R. Williams C., Dai Q. (2009)
Determining the specific gravities of coarse aggregates utilizing vacuum saturation approach
Construction and Building Materials 23 (2009) 1316-1322

Mooney M. (1951)
The Viscosity of Concentrated Suspensions of Spherical Particles
Journal of Colloids, Vol. 6, p. 162.

Mouret M., Ringot E., Escadeillas G. (2011)
Quels outils pour caractériser la ségrégation statique ?
Les bétons auto-plaçants – Presses des ponts – 2011 pp. 53-74

Neville A. M. (1995)
Properties of concrete
Fourth and Final Edition. - 1995

Newman J. (1993)
Properties of structural lightweight concrete
J. L. Clarke Ed. Structural Lightweight Concrete. London: Chapman & Hall, pp.1-17 - 1993

NF EN 206-1/CN : Béton
Partie 1 : Spécification, performances, production et conformité
Décembre 2012, Afnor

NF EN 12390-5
Essai pour béton durci
Partie 5 : Résistance à la flexion sur éprouvettes
Avril 2012, Afnor

NF EN 12350-6
Essai pour béton frais
Partie 6 : Masse volumique
Avril 2012, Afnor

NF EN 12350-7
Essai pour béton frais
Partie 7 : Teneur en air – Méthode de la compressibilité
Avril 2012, Afnor

NF EN 1520
Composants préfabriqués en béton de granulats légers à structure ouverte avec des armatures structurales et non structurelles
Mai 2011, Afnor

NF EN 12350-8
Essai pour béton frais
Partie 8 : Béton auto-plaçant – Essai d'étalement au cône d'Abrams
Novembre 2010, Afnor

NF EN 12350-9
Essai pour béton frais
Partie 8 : Béton auto-plaçant – Essai d'écoulement à l'entonnoir en V
Novembre 2010, Afnor

NF EN 206-9
Béton
Partie 9 : Règles complémentaires pour béton auto-plaçant
Juin 2010 Afnor

NF EN 13369
Règles communes pour les produits préfabriqués en béton
Juillet 2006, Afnor

NF EN 1992-1-1
Eurocode 2 : Calcul des structures en béton
Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments
Octobre 2005, Afnor

NF EN 13055-1
Granulats légers - Partie 1 : Granulats légers pour bétons et mortiers
Décembre 2002, Afnor

NF EN 1097-3
Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats
Partie 3 : Méthodes pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité intergranulaire
Août 1998, Afnor

NF EN 1097-6
Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats
Partie 6 : Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau
Juin 2001, Afnor

NF P 18-545
Granulats - Éléments de définition, conformité et codification
Septembre 2011, Afnor

NF P 18-459
Béton – Essai sur béton durci
Essai de porosité et de masse volumique
Mars 2010 Afnor

Okamura H. (1997)
Self-compacting high-performance concrete
Concrete International 19 (7) (1997) 50-54

Okamura H. and Ozawa K. (1995)
Mix design for Self-Compacting Concrete
Concrete Library of JSCE, n°25, June 1995

Osborne B. J. and Al-Khaiat H. (1995)
Durability of lightweight aggregate concrete after 10 years in marine and acid environments
International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete. Sandefjord, Norway (1995), pp. 591-603

Ozawa K., Maekawa K. and Okamura H. (1992)
Development of High Performance Concrete
Journal of the Faculty of Engineering, University of Tokyo Vol XLI, pp. 381-439, 1992

Ozguven A., Gündüz L. (2012)
Examination of effective parameters for the production of expanded clay aggregate
Cement & Concrete Composites 34 (2012) 781-787

Papanicolaou G. C. and Kaffetzakis M. I. (2011)
Lightweight Aggregate Self-Compacting Concrete: State-of-the-Art & Pumice Application
Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 9 n°.1 pp. 15-29; 2011

Paul A. and Lopez M. (2011)
Assessing Lightweight Aggregate Efficiency for Maximizing Internal curing Performance
ACI Materails Journal, V. 108, N. 4 July-August 2011, pp. 385-393

Petersson O., Billberg P. and Van B. K. (1996)
A model for Self-Compacting Concrete
International Rilem Conference on "Production Methods and Workability of Concrete", RILEM Proceedings 32, 1996

Philleo R. (1991)
Concrete science and reality
Materials Science of Concrete II; 1991 (Skalny J. and Mindess S.). American Society, Westerville, OH

Riley C. M. (1950)
Relation of chemical properties to the bloating of clays
Journal of American Ceramic Society 1950; 30 (4); pp. 121 - 128

Rochholz J. M. (1979)
Determination of elastic properties of lightweight aggregate by ultrasonic pulse velocity measurement
The International Journal of lightweight concretes 1, pp. 78-90 - 1979

Sarkar S. L., Chandra S., Berntsson L. (1992)
Interdependence of microstructure and strength of structural lightweight aggregate concrete
Cement & Concrete Composites 14 (1992) pp. 239-248

Sedran T. (1999)
Rhéologie et rhéomètrie des bétons. Application aux bétons autonivelants
Thèse de l'École Nationale des Ponts et Chaussées; 1999

Sedran T. et De Larrard F. (1999)
Logiciel René-LCPL
www.lcpc.fr/fr/produits/lcpc-produits-betonlabpro

Sedran T. et De Larrard F. (1994)
René LCPC: Un logiciel pour optimiser la granularité des matériaux de génie civil
Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées n°194, novembre/décembre 1994

Scheumann W. and Fastabend M. (1963)
Recherche sur le processus de gonflement des argiles
Liegelind 24 n°12, pp. 899-905 (Traduction SFC-CNERC n° 4656)

Shi C. and Wu Y. (2005)
Mixture proportioning and properties of self-consolidating lightweight concrete containing glass powder
ACI Materials Journal 102 (5), pp 355-363 - 2005

Shink M. (2003)
Compatibilité élastique, comportement mécanique et optimisation des bétons de granulats légers
Thèse de la Faculté des Sciences et de Génie de l'Université Laval – Québec ; 2003

Skalny J. P. and Mindess S. (Eds) (1991)
Materials Science of Concrete II,
American Ceramic Society, Westerville, OH, USA, 1991, pp. 1-8

Stovall T., De Larrard F., Buil M. (1986)
Linear Packing Density of Grain Mixture
Powder Technology, Vol. 48, N. 1, September

Su N. and Miao B. (2003)
A new method for the mix design of medium strength flowing concrete with low cement content
Cement & Concrete Composites, 2003, vol. 25, pp. 215-222

Sun Z., Voigt T., Shah S. P. (2005)
Rheometric and ultrasonic investigations for viscoelastic properties of fresh Portland cement pastes
Cement and Concrete Research 36 (2006) pp. 278-287

Swamy R. N. and Lambert H. (1981)
The microstructure of Lytag aggregate
International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete 1981; 3(4): pp. 273-282

Tanaka K., Sato K., Watanabe S., Arima I., Suenaga K. (1993)
Development and Utilisation of High-Performance Concrete for the Construction of the Akashi Kaikyo Bridge
High Performance Concrete in Severe Environnements, edited by P. Zia, SP 140, pp. 25-51 - 1993.

Tang C. W., Chen H. J., Wang S. Y., Spaulding J. (2011)
Production of synthetic lightweight aggregate using reservoir sediments for concrete and masonry
Cement & Concrete Composites 33 (2011) 292-300

Tangtermsirikul S. and Van B. K. (1995)
Blocking criteria for Aggregate Phase of Self-compacting High Performance Concrete
Proceedings of Regional Symposium on Infrastructures Development in Civil Engineering, SC-4, pp. 58-69, 19-20 December, 1995

Topçu I. B. and Uygunoglu T. (2010)
Effect of aggregate type on properties of hardened self-consolidating lightweight concrete
Construction and Building Materials 24 (2010) 1286-1295

Ugur K. N. and Ozturan T. (2011)
Characteristics of lightweight fly ash aggregates produced with different binders and heat treatments
Cement and Concrete Composites 33 (2011) 61-67

Ugur K. N. and Ozturan T. (2010)
Effects of lightweight fly ash aggregate properties on the behavior of lightweight concretes
J Hazard Mater 2010; 179(1-3):954-965

Uygunoglu T. (2008)
Properties of Self-Consolidating Lightweight Aggregate Concrete
PhD thesis, Süleyman Demirel University in Turkish – 2008

Valore R. C. (1980)
Calculation of U-Values of hollow concrete masonry
Concrete International, V. 2, N° 2, Feb., pp. 40-63

Vaquier A. (1986)
Etude des migrations de l'eau dans les bétons légers extrait de « Granulats et Bétons Légers »
Édition 1986, Presse de l'École Nationale des Ponts et Chaussées ; pp. 247-254

Virlogeux M. (1986)
Généralités sur les caractères des bétons légers, extrait de « Granulats et Bétons Légers »
Édition 1986, Presse de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, pp. 111-246

Wall J. R. (2005)
Design, production and mechanical properties of expanded slate lightweight self-consolidating concrete
Proceedings SCC 2005 pp. 187-193 - 2005

Wallevik O. H. and Wallevik J. E. (2011)
Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes
Cement and Concrete Research 41 (2011) pp. 1279-1288

Wang H. Y. (2009)
Durability of self-consolidating lightweight aggregate concrete using dredged silt
Construction and Building Materials 23, pp. 2332 - 2337 - 2009

Wasserman R. and Bentur A. (1997)
Effect of lightweight fly ahs aggregate microstructure on the strength of concretes
Cement and Concrete Research 27 (1997) pp. 525-537

Wu Z., Zhang Y., Zheng J., Ding Y. (2009)
An experimental study on the workability of self-compacting lightweight concrete
Construction and Building Materials 23(5) (2009): pp. 2087-2092

Wyrzykowski M., Lura P., Pesavento F., Gawin D. (2011)
Modeling of internal curing in maturing mortar
Cement and Concrete Research Vol. 41(2011) pp. 1349-1356

Yanai S., Sakata N., Nobuta Y. and Okamoto T. (2000)
Study on mix proportion for self compacting high performance lightweight aggregate concrete
Eds 2nd International Symposium on Structural Lightweight Aggregate, Kristiansand, 18-22 June 2000. Norwegian Concrete Association, pp. 705-716

Zhang D., Li Z., Zhou J. and Wu K. (2004)
Development of thermal energy storage concrete
Cement and Concrete Research 34 (2004); pp 927-934

Zhang M. H. and Gjørv O. E. (1992)
Penetration of cement paste into lightweight aggregate
Cement and Concrete Research Vol. 22 pp. 47-55; 1992 - Printed in USA

Zhang M. H. and Gjørv O. E. (1991)
Characteristics of lightweight aggregate for high strength
To be published in ACI Materials Journal 1991; 88(2): pp. 150-158

Zhang M. H. and Gjørv O. E. (1990)
Microstructure of the interfacial zone between lightweight aggregate and cement paste
Cement & Concrete Research 20 (1990) pp. 610-618

Zhang M. H. and Gjørv O. E. (1989)
Backsscattered electron imaging on the interfacial zone between high strength lightweight aggregate and cement paste
Advanced Cement Research 2 (1989) 141-146

Zhao Z. (2014)
Valorisation des fines de concassage de béton pour la fabrication de mortiers
Thèse de doctorat de l'Ecole des Mines de Douai et de l'Université Lille 1, 2014

Zhutovsky S., Kovler K., Bentur A. (2011)
Revisiting the protected paste volume concept for internal curing of high-strength concretes
Cement and Concrete Research 41 (2011) pp. 981-986

Annexes

LAFARGE CIMENTS
Usine du TEIL

CEM I 52,5 N CE PM-ES-CP2 NF

NF EN 197-1 NF P 15-317 XP P15-319 NF P 15-31

NF EN 196-10

Fiche produit technique

CE NF

N° de certificat CE : 0333-CPD-1203

• Constituants et composition du ciment

Principaux (%)				Secondaires (%)		Sulfate de calcium (%)		Additifs (g/t)		
Clinker			97	Calcaire (LL)	3	Gypse	2,7	Agent de mouture	AMA 14	1300
C3S	65,3	C4AF	7,14							
C3A	4,35	C2S	18,6							

• Caractéristiques physiques et mécaniques

	Valeur usine moyenne	Limites applicables à chacun des résultats (Réf : NF EN 197-1) minimum	Limites applicables à chacun des résultats (Réf : NF EN 197-1) maximum	Limites applicables à chacun des résultats (Réf : annexe 1 du règlement de certification NF002) minimum	Limites applicables à chacun des résultats (Réf : annexe 1 du règlement de certification NF002) maximum
Résistance à la compression 1 jour (MPa)	19,6				
Résistance à la compression 2 jours (MPa)	31,9	18		18	
Résistance à la compression 28 jours (MPa)	66,0	50		50	
Retrait à 28 jours (µm/m)	560				
Début de prise (min)	175	40		60	
Stabilité (mm)	0,5		5		5
Masse volumique (g/cm3)	3,16				
Surface spécifique Blaine (cm²/g)	3590				
Q12h (J/g)	183				
Q41h (J/g)	288				
L*	61,7				

• Caractéristiques chimiques (%)

MAXI : Valeurs limites applicables à chacun des résultats (Réf : NF EN 197-1, NF P 15-318, NF P 15-317, XP P 15-319)

	Valeur usine moyenne	MAXI		Valeur usine moyenne	MAXI		Valeur usine moyenne	MAXI
SiO2	22,40		S-- <	0,10	0,20	Insolubles	0,20	0,75
Al2O3	2,96	8,00	Cl- <	0,10	0,10	CO2	1,00	
Fe2O3	2,33		Perte au feu	1,59	3,00	CaO libre	0,50	
CaO	66,60		TiO2	ND			Valeur usine moyenne	Coef var (%)
MgO	0,95	3,00	Cr VI <	2 PPM	2 PPM			
K2O	0,15		P2O5	0,20		Alcalins actifs	0,20	0,1
Na2O	0,10		Non dosé	0,39		Na2OEq	0,20	
SO3	2,13	2,50	IS	< 23,5	23,50			
Total : 100								

Ces valeurs, extraites de notre autocontrôle, permettent de vérifier la conformité de notre produit aux spécifications normatives et donnent une indication pour les caractéristiques complémentaires. Elles ne constituent pas un engagement sur les résultats à venir.

■ : Caractéristique modifiée / fiche précédente **ND** : non dosé ***Révision N° : 17*** ***du 15/03/2010***

Le Teil : livraison en sac et en vrac

Product information

Omya SAS
35 Quai André Citroën
F-75725 Paris Cedex 15

Tel +33 1 40 58 44 00
Fax +33 1 40 58 44 38

www.omya.com

Betocarb® HP - EN

SITE: ENTRAINS, France

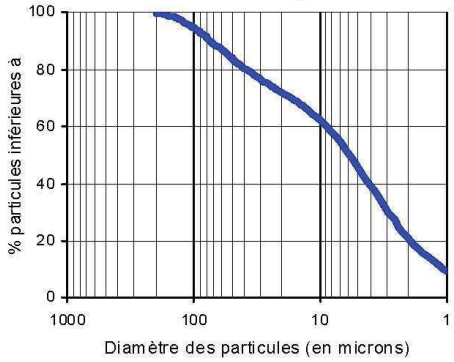
DESCRIPTION DU PRODUIT: Addition calcaire sélectionnée pour bétons hydrauliques et filler pour bétons hydrauliques hautes performances (EN 12620).

COMPOSITION TYPE DE LA ROCHE:	$CaCO_3$	98.5	%
	Carbonates totaux	99.0	%
	Chlorures	0.001	%
	Sulfates	0.001	%
	Soufre total	0.011	%
	Matières organiques	0.03	%
	Essai au bleu de méthylène	0.8	g/kg
	Alcalins équivalents	0.015	%
	Silice totale	0.2	%
	Réactivité aux alcalins	NR	
CARACTERISTIQUES TYPES DU PRODUIT:	Granulométrie:		
	· Particules < 2 mm	100	%
	· Particules < 0.125 mm	97	%
	· Particules < 0.063 mm	87	%
	· Surface spécifique Blaine	508	m^2/kg
	Coefficient de variation de Blaine	4.0	%
	Blancheur CIE L*	95.5	
	Indice d'activité à 28 jours	0.80	
	Taux d'humidité départ usine	0.2	%
CARACTERISTIQUES GENERALES DU PRODUIT:	Densité	2.7	g/ml
	Densité apparente tassée	1.3	g/ml

APPLICATIONS PRINCIPALES:

Béton auto-plaçant
Béton prêt à l'emploi
Eléments préfabriqués architectoniques
Applications spéciales
- Béton projeté

REPARTITION GRANULOMETRIQUE (Malvern Mastersizer 2000):



CONDITIONNEMENT STANDARD:

- VRAC

Les informations contenues dans cette fiche technique ne concernent que le matériel spécifique mentionné et ne concernent pas l'utilisation conjointement avec tout autre matériel ou dans tout procédé. Les informations fournies dans le présent document se basent sur des données techniques qui, à la connaissance de Omya, sont fiables, toutefois Omya ne fournit aucune garantie de complétude ou d'exactitude de ces informations, et Omya n'assume aucune responsabilité résultant de leur utilisation ou vis-à-vis de toutes réclamations, pertes ou dommages subis par une tierce partie. Toute personne recevant ces informations doit exercer son jugement propre en ce qui concerne leur utilisation appropriée et il incombe à l'utilisateur d'évaluer si le matériel convient (y compris en matière de sécurité) pour un usage particulier avant d'en faire usage.

édition : 04/06/2009
CORP 6-PRODINFO : FREN
I63920_03_F
version : 006

argex CE 2010 0965-CPD-GT0525 0965

ARGEX NV
Kruibeeksesteenweg 227
B-2070 Burcht-Zwijndrecht
Belgium

Fiche Technique
du 1/01/2009 au 31/12/2009

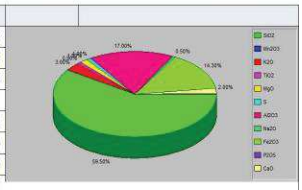
AR 0/4-650

Produit : **Argile expansée**

Client : **Quality Control Argex**
Tel.: 0032/32.50.15.08
Fax.: 0032/32.50.15.28

lab	*Quality Control Argex Tel.: 0032/32.50.15.08 Fax.: 0032/32.50.15.28*
Classe granulaire	*0/4 mm*
Certificats	*CE: EN 13055-1, EN 13055-2 : KOMO (LT-001) ISO 9001:2000*
CE: EN 13055-1, EN 13055-2	*Granulats légers:*
	-Partie 1: granulats légers pour bétons et mortiers
	-Partie 2: granulats légers pour mélanges hydrocarbonés, enduits, superficiels et pour
	utilisation en couches traitées et non traitées

ESSAIS	Minimum	Valeur	Maximum	Val.théo.	Norme
Forme de granulat		Rond			EN 13055-1
Résistance à l'écrasement en vrac (T-2x30'')		Pas Pertinent			EN 13055-1
Estimated Particle Density	802	1000 kg/m³	1084	943	
Masse volumique en vrac	552	690 kg/m³	748	650	EN 1097-3
Résistance au gel/dégel		Pas Pertinent			EN 13055-1
Los Angeles + Micro Deval (4-6.3)		PPD*			EN 1097-1 & 2
Los-Angeles (4-6.3)		PPD*			EN 1097-2
Coefficient au polissage accéléré		PPD*			EN 1097-8
Stabilité en volume		Pas Pertinent			EN 13055-1
Humidité	0.0	3.7 %	30.0		EN 1097-5
Absorption d'eau (5')		Pas Pertinent			EN 1097-6
Absorption d'eau (30')		Pas Pertinent			EN 1097-6
Absorption d'eau (24h)		Pas Pertinent			EN 1097-6
Alcali-réaction		Pas Pertinent			EN 13055-1
Analyse chimique d'Argex		100.00 %			
SiO2	55	59.50 %	65		
Mn2O3	0.15	0.20 %	0.25		
K2O	1.5	3.00 %	3.5		
TiO2	0.8	0.90 %	1		
MgO	1	1.50 %	2		
S	0.7	1.00 %	1.3		
Al2O3	15	17.00 %	19		
Na2O	0.3	0.50 %	0.7		
Fe2O3	12	14.30 %	16		
P2O5	0.05	0.10 %	0.15		
CaO	1	2.00 %	3		
Chlorure		0.005 %		0.02	EN 1744-1
Propreté		OK			EN 1744-1
Emission de radioactivité		PPD*			EN 13055-1
Perte au feu		-0.18 %		5	EN 1744-1
Libération de métaux lourds		PPD*			EN 13055-1
Libération d'autres substances dangereuses		PPD*			EN 13055-1
Libération de carbones polyaromatiques		PPD*			EN 13055-1
Réaction au feu		A1			EN 13501-1
Souffre total		0.33 %		0.8	EN 1744-1
Sulfate soluble dans l'acide		0.062 %		0.8	EN 1744-1



PPD = Pas de Performance Déterminée*

argex CE 2010 0965-CPD-GT0525 0965

ARGEX NV
Kruibeeksesteenweg 227
B-2070 Burcht-Zwijndrecht
Belgium

Fiche Technique
du 1/01/2009 au 31/12/2009
Page 2/2

AR 0/4-650

Produit : **Argile expansée**

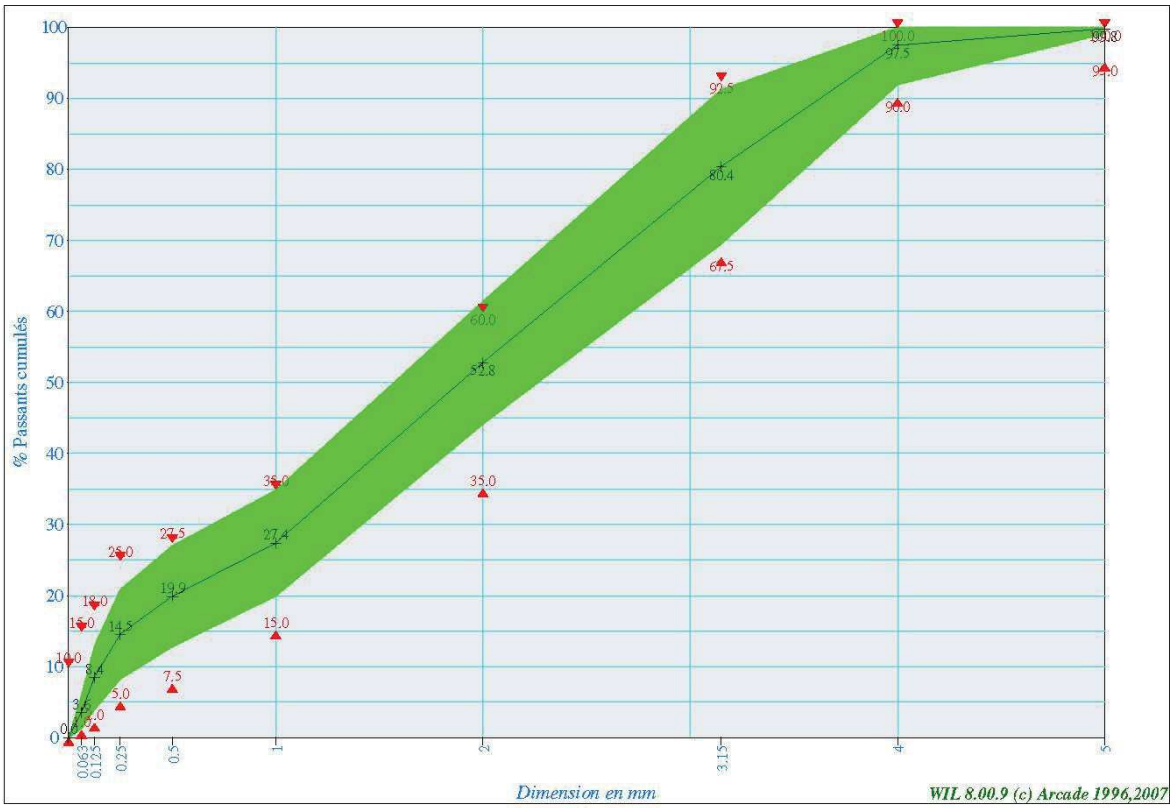
Client : **Quality Control Argex**
Tel.: 0032/32.50.15.08
Fax.: 0032/32.50.15.28

lab	*Quality Control Argex Tel.: 0032/32.50.15.08 Fax.: 0032/32.50.15.28*
Classe granulaire	*0/4 mm*
Certificats	*CE: EN 13055-1, EN 13055-2 : KOMO (LT-001) ISO 9001:2000*
CE: EN 13055-1, EN 13055-2	*Granulats légers:* *-Partie 1: granulats légers pour bétons et mortiers* *-Partie 2: granulats légers pour mélanges hydrocarbonés, enduits, superficiels et pour utilisation en couches traitées et non traitées*

Analyse granulometrique (norme EN 933-1)

Masse

Tamis (mm)	Minimum	% Passants	Maximum	Val.théo.
0.000	0.0	0.0	10.0	
0.063	1.0	3.6	15.0	
0.125	2.0	8.4	18.0	
0.250	5	15	25	
0.500	8	20	28	
1.000	15	27	35	
2.000	35	53	60	
3.150	68	80	93	
4.000	90	97	100	
5.000	95	100	100	



PPD = Pas de Performance Déterminée*

argex Leca CE 2009 0965-CPD-GT0525 0965

ARGEX NV
Kruibeeksesteenweg 227
B-2070 Burcht-Zwijndrecht
Belgium

Technical Sheet
from 1/01/2008 to 31/12/2008

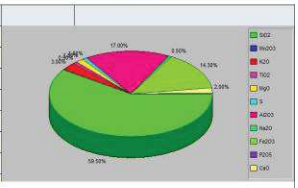
AM 4/8-750

Product : **Expanded Clay**

Client : **Quality Control Argex**
Tel.: +32/32.50.15.08
Fax: +32/32.50.15.28

Lab	
Aggregate Size	*4/8 mm*
Certifications	*CE:EN 13055-1, EN 13055-2 : KOMO (LT-001/2). ISO 9001:2000*
CE:EN 13055-1, EN 13055-2	*Lightweight aggregates*
	-Part 1:Lightweight aggregates for concrete, mortar and grout
	-Part 2:Lightweight aggregates for bituminous mixtures and surface treatments and for unbound and bound applications

TESTS	Minimum	Average	Maximum	Declared	Standard
Particle Shape		**Mix**			**EN 13055-1**
Crushing Resistance (T-2x30'')	**10.00**	**15.09 N/mm²**	**20.00**		**EN 13055-1**
Loose Bulk Density	**650**	**756 kg/m³**	**850**	**750**	**EN 1097-3**
Particle Density	**1160**	**1327 kg/m³**	**1460**	**1310**	**EN 1097-6**
Freezing & Thawing Resistance		**2.4 %**		**4**	**EN 13055-1**
Los-Angeles (4-6.3)		**19**		**30**	**EN 1097-2**
Los Angeles + Micro Deval (4-6.3)		**58**		**65**	**EN 1097-1 & 2**
Polished Stone Value	**60**	**69**		**62**	**EN 1097-8**
Volume Stability		**0.17 %**			**EN 13055-1**
Water Content	**0.0**	**1.1 %**	**25.0**		**EN 1097-5**
Water Absorption (5')	**6.00**	**7.98 %**	**9.00**		**EN 1097-6**
Water Absorption (30')	**10.00**	**11.51 %**	**13.00**		**EN 1097-6**
Water Absorption (24h)	**17.00**	**18.97 %**	**20.00**		**EN 1097-6**
Alkali Silica Reactivity		**Not Relevant**			**EN 13055-1**
Chemical Analysis Argex		**100.00 %**			
SiO2	55	59.50 %	65		
Mn2O3	0.15	0.20 %	0.25		
K2O	1.5	3.00 %	3.5		
TiO2	0.8	0.90 %	1		
MgO	1	1.50 %	2		
S	0.7	1.00 %	1.3		
Al2O3	15	17.00 %	19		
Na2O	0.3	0.50 %	0.7		
Fe2O3	12	14.30 %	16		
P2O5	0.05	0.10 %	0.15		
CaO	1	2.00 %	3		
Chloride		**0.005 %**		**0.02**	**EN 1744-1**
Cleanliness		**OK**			**EN 1744-1**
Emission Of Radioactivity		**NPD***			**EN 13055-1**
Loss on Ignition		**-0.18 %**		**5**	**EN 1744-1**
Release Of Heavy Metals		**NPD***			**EN 13055-1**
Release Of Other Dangerous Substances		**NPD***			**EN 13055-1**
Release Of Polyaromatic Carbons		**NPD***			**EN 13055-1**
Reaction To Fire		**A1**			**EN 13501-1**
Total Sulphur		**0.41 %**		**0.8**	**EN 1744-1**
Acid-Soluble Sulfate		**0.034 %**		**0.8**	**EN 1744-1**



NPD = No Performance Determined*

BASF

The Chemical Company

GLENIUM® SKY 537

EN 934.2

Marque NF
cf. Rp NF 085

Superplastifiant haut réducteur d'eau pour béton à faible E/C, hautes performances et long maintien d'ouvrabilité.

Description

Le GLENIUM® SKY 537 est un adjuvant non chloré d'une nouvelle génération chimique à base d'éther polycarboxylique modifié. Cet adjuvant a été développé pour l'utilisation dans l'industrie du béton où haute qualité, durabilité, performance et ouvrabilité sont requises.

La nouvelle chimie du GLENIUM®

Le GLENIUM® se différencie des superplastifiants traditionnels par son action nouvelle et originale qui améliore de façon très significative le pouvoir dispersant sur le ciment.

Cette structure chimique nouvelle et originale agit sur le grain de ciment par répulsion électrostatique et effet stérique, c'est à dire en créant un obstacle physique au rapprochement des particules de ciment. L'état dispersé est ainsi amélioré.

De plus, cette réaction est la combinaison de deux actions successives. Dès l'incorporation du GLENIUM® dans le mélange cimentaire, une première partie active agit immédiatement et la seconde est présente mais inactive. L'hydratation du ciment, qui se déroule normalement, fait évoluer le pH du mélange vers la basicité, ce qui provoque la libération progressive des molécules complémentaires.

Celles-ci travaillent de la même manière que les premières et prolongent donc l'état de dispersion évitant ainsi la floculation et donc le raidissement précoce du mélange.

Particularités du GLENIUM® SKY 537

Le GLENIUM® SKY 537 permet de diminuer sensiblement la viscosité des bétons caractérisée par des quantités de fines importantes et/ou des rapports eau/ciment bas.

Domaines d'application

Le GLENIUM® SKY 537 est particulièrement recommandé pour l'élaboration de béton nécessitant un long maintien d'ouvrabilité et des performances mécaniques initiales élevées.

Le GLENIUM® SKY 537 est donc adapté à l'industrie du béton prêt-à-l'emploi et aux chantiers de Génie Civil.

Propriétés

L'excellent effet de dispersion du GLENIUM® SKY 537 permet de conserver une maniabilité très plastique ou fluide pendant plus de 1 heure 30 avec un faible rapport eau/ciment et sans effet de retard de prise.

Le GLENIUM® SKY 537 apporte les avantages suivants au niveau de la mise en place, des performances et de la qualité intrinsèque du béton :

améliore

- la résistance à la compression à jeune âge et à long terme,
- la résistance à la flexion à jeune âge et à long terme,
- le module d'élasticité,
- l'adhérence sur les aciers,
- la résistance à la carbonatation,
- l'imperméabilité,
- la résistance aux agressions atmosphériques,
- la qualité des parements et de la texture du béton.

diminue

- la viscosité,
- la vibration,
- le retrait,
- le risque de fissuration,
- le fluage.

Caractéristiques

Aspect	liquide
Couleur	brun
Masse volumique (MA 002)	1,05 ± 0,02 g/cm^3
pH (MA003)	7,0 ± 1
Teneur en chlorures (MA 004)	< 0,1 %
Extrait sec	20 ± 2%
Na2O eq	< 2 %
Transport	non classé
Etiquetage	pas de symbole exigé

Mode d'emploi

Le GLENIUM® SKY 537 est un adjuvant pour béton qui doit être incorporé isolément. L'effet optimal est obtenu par incorporation du GLENIUM® SKY 537 dans le béton en différé, c'est-à-dire après l'addition de 70 % de l'eau de gâchage dans le malaxeur.

Adding Value to Concrete

BASF
The Chemical Company

GLENIUM® SKY 537

Toutefois, il est possible d'incorporer le GLENIUM® SKY 537 dans l'eau de gâchage.
Eviter d'ajouter le GLENIUM® SKY 537 sur les granulats.

Recommandations
En cas de gel, réchauffer le produit jusqu'à une température proche de + 30°C et agiter mécaniquement .

Compatibilité
Le GLENIUM® SKY 537 est compatible avec la majorité des ciments.
Le GLENIUM® SKY 537 n'est pas compatible avec certains plastifiants et superplastifiants. Consultez votre représentant local BASF CC France pour toute synergie.

Dosage
Plage normale d'utilisation :
0,2 à 3,0 % du poids du ciment, soit 0,19 à 2,86 L pour 100 kg de ciment.
Pour d'autres utilisations, consultez votre représentant local BASF CC France.

Conditionnement
Container de 1000 L, fût de 210 L, bidon de 10 L ou vrac.

Stockage
Stocker le GLENIUM® SKY 537 dans des conditions de températures supérieures à + 5°C.

Précautions d'emploi
Le GLENIUM® SKY 537 ne contient aucune substance exigeant un label particulier.

BASF Construction Chemicals France SAS a couvert sa responsabilité civile tant en exploitation qu'après livraison de ses produits par une police d'assurance souscrite auprès de la Compagnie HDI Gerling France. Les garanties de cette police sont complétées par la police "parapluie" responsabilité civile du Groupe souscrite auprès de la société d'assurances HDI Gerling Allemagne.

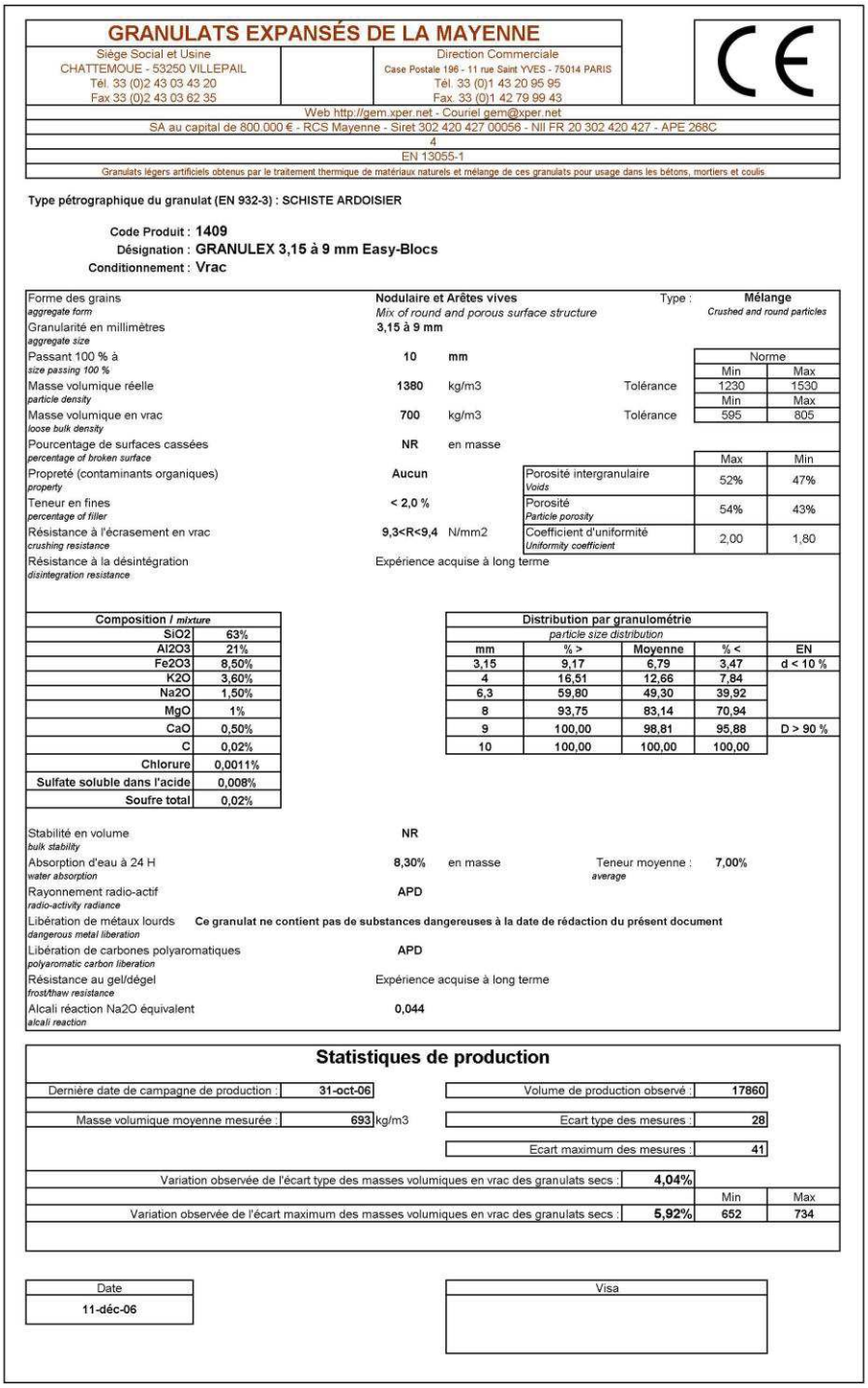
Nos fiches techniques ont pour objectif de vous conseiller d'après nos connaissances les plus récentes. nous nous réservons donc le droit de modifier à tout moment le contenu de celles-ci.
L'emploi des produits doit être adapté aux conditions spécifiques à chaque situation. Pour toute précision complémentaire, nous vous conseillons de prendre contact avec l'une de nos agences BASF Construction Chemicals France.

Nos fiches de données de sécurité sont disponibles sur simple demande par Internet (www.basf-cc.fr) ou par téléphone (au 01.69.47.50.00).

AFNOR CERTIFICATION
11, Avenue F. De Pressensé
93571 SAINT DENIS LA PLAINE CEDEX

BASF Construction Chemicals France SAS
Z.I. Petite Montagne Sud - 10, rue des Cévennes - Lisses - 91017 Evry Cedex
Tél. : 01 69 47 50 00 Fax : 01 60 86 06 32 http://www.basf-cc.fr

FT GLENIUM SKY 537/V3 - Edition 05/2008 - Page 2/2



GRANULATS EXPANSÉS DE LA MAYENNE

Siège Social et Usine
CHATTEMOUE - 53250 VILLEPAIL
Tél. 33 (0)2 43 03 43 20
Fax 33 (0)2 43 03 62 35

Direction Commerciale
Case Postale 196 - 11 rue Saint YVES - 75014 PARIS
Tél. 33 (0)1 43 20 95 95
Fax. 33 (0)1 42 79 99 43

Web http://gem.xper.net - Courriel gem@xper.net
SA au capital de 800.000 € - RCS Mayenne - Siret 302 420 427 00056 - NII FR 20 302 420 427 - APE 268C

4
EN 13055-1
Granulats légers artificiels obtenus par le traitement thermique de matériaux naturels et mélange de ces granulats pour usage dans les bétons, mortiers et coulis

Type pétrographique du granulat (EN 932-3) : SCHISTE ARDOISIER

Code Produit : 1409
Désignation : GRANULEX 3,15 à 9 mm Easy-Blocs
Conditionnement : Vrac

Forme des grains *aggregate form*	**Nodulaire et Arêtes vives** *Mix of round and porous surface structure*			Type :	**Mélange** *Crushed and round particles*	
Granularité en millimètres *aggregate size*	**3,15 à 9 mm**					
Passant 100 % à *size passing 100 %*	**10**	**mm**			Norme Min	Norme Max
Masse volumique réelle *particle density*	**1380**	kg/m3		Tolérance	1230	1530
Masse volumique en vrac *loose bulk density*	**700**	kg/m3		Tolérance	Min 595	Max 805
Pourcentage de surfaces cassées *percentage of broken surface*	**NR**	en masse				
Propreté (contaminants organiques) *property*	**Aucun**		Porosité intergranulaire *Voids*		Max 52%	Min 47%
Teneur en fines *percentage of filler*	**< 2,0 %**		Porosité *Particle porosity*		54%	43%
Résistance à l'écrasement en vrac *crushing resistance*	**9,3<R<9,4**	N/mm2	Coefficient d'uniformité *Uniformity coefficient*		2,00	1,80
Résistance à la désintégration *disintegration resistance*	Expérience acquise à long terme					

Composition / *mixture*	
SiO2	63%
Al2O3	21%
Fe2O3	8,50%
K2O	3,60%
Na2O	1,50%
MgO	1%
CaO	0,50%
C	0,02%
Chlorure	0,0011%
Sulfate soluble dans l'acide	0,008%
Soufre total	0,02%

Distribution par granulométrie *particle size distribution*				
mm	% >	Moyenne	% <	EN
3,15	9,17	6,79	3,47	d < 10 %
4	16,51	12,66	7,84	
6,3	59,80	49,30	39,92	
8	93,75	83,14	70,94	
9	100,00	98,81	95,88	D > 90 %
10	100,00	100,00	100,00	

Stabilité en volume *bulk stability*	**NR**			
Absorption d'eau à 24 H *water absorption*	**8,30%**	en masse	Teneur moyenne : *average*	**7,00%**
Rayonnement radio-actif *radio-activity radiance*	**APD**			
Libération de métaux lourds *dangerous metal liberation*	**Ce granulat ne contient pas de substances dangereuses à la date de rédaction du présent document**			
Libération de carbones polyaromatiques *polyaromatic carbon liberation*	**APD**			
Résistance au gel/dégel *frost/thaw resistance*	Expérience acquise à long terme			
Alcali réaction Na2O équivalent *alcali reaction*	**0,044**			

Statistiques de production

Dernière date de campagne de production :	**31-oct-06**	Volume de production observé :	**17860**
Masse volumique moyenne mesurée :	**693** kg/m3	Ecart type des mesures :	**28**
		Ecart maximum des mesures :	**41**

Variation observée de l'écart type des masses volumiques en vrac des granulats secs :	**4,04%**		
		Min	Max
Variation observée de l'écart maximum des masses volumiques en vrac des granulats secs :	**5,92%**	**652**	**734**

Date	Visa
11-déc-06	

Réf : 1409

Référence normative	CE	XP P 18-545, Article 10 Code : A
Nature Pétrographique		Calcaire viséen dur compact
Utilisation		Granulats pour bétons hydrauliques

AFNOR CERTIFICATION
11, av Francis de Pressensé
93571 ST DENIS LA PLAINE

Spécifications contractuelles :

	2D	1.4D	D	1	0.25	f	FM	MB
Tamis (mm)	8	5,6	4	1	0,250	0,063		
Vss			99.0	64.0	37.0	10.0	3.15	1.50
Vsi	100.0	95.0	89.0	50.0	23.0	4.0	2.55	
Vss + U			100.0	68.0	41.0	12.0	3.30	2.00
Vsi - U		94.0	87.0	46.0	19.0	2.0	2.40	
Sf max				4.24	4.24		0.182	

Résultats : Granularité et propreté : Période du 20/09/05 au 20/02/06 (5 mois)
Autres caractéristiques : Période du 20/09/05 au 20/02/06 (5 mois)

	2D	1.4D	D	1	0.25	f	FM	MB
Tamis (mm)	8	5,6	4	1	0,250	0,063		
maxi			96.5	64.0	36.5	9.3	2.99	0.40
Xf+1,25 Sf			95.9	62.6	35.4	8.6	2.90	0.34
moyenne Xf	**100.0**	**99.9**	**95.3**	**59.5**	**32.1**	**6.8**	**2.76**	**0.28**
Xf - 1,25 Sf	100.0	99.8	94.6	56.4	28.9	5.0	2.62	
mini	100.0	99.5	94.4	54.9	27.1	4.0	2.56	
Ecart type Sf	0.00	0.13	0.53	2.48	2.57	1.43	0.114	0.049
nb. valeurs	31	31	31	31	31	31	31	31

Fuseaux de régularité ▭ **et de fabrication** — :



Autres Caractéristiques

	Valeur	Dernier Essai
WA24	0,6 %	28/09/05
S total	0,06 %	09/09/05
Cl-	0,0003%	01/07/05
Na2O équi.	10,7 mg/kg	01/07/05
MVR	2,66 t/m3	28/09/05

Polluants organiques : test négatif.
Impuretés prohibées : néant.
Alcali-réaction : NR.

Date et visa du responsable laboratoire

21/02/06