



HAL
open science

Optimisation de la formulation des bétons d'éco-granulats obtenus par carbonatation accélérée des déchets d'incinérateurs

Imen Rahmouni

► **To cite this version:**

Imen Rahmouni. Optimisation de la formulation des bétons d'éco-granulats obtenus par carbonatation accélérée des déchets d'incinérateurs. Autre. Université de Picardie Jules Verne; Université de Tunis El Manar, 2019. Français. NNT : 2019AMIE0024 . tel-03691901

HAL Id: tel-03691901

<https://theses.hal.science/tel-03691901v1>

Submitted on 9 Jun 2022

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.

Thèse de Doctorat en cotutelle

Mention Sciences pour l'ingénieur
Spécialité Génie Civil

Présentée à *l'Ecole Doctorale en Sciences Technologie et Santé (ED 585)*

de l'Université de Picardie Jules Verne

Par

RAHMOUNI IMEN

Pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de Picardie Jules Verne
et l'Université de Tunis El Manar

*Optimisation de la formulation des bétons d'éco-granulats
obtenus par carbonatation accélérée des déchets
d'incinérateurs*

Soutenue le 06 / 06 / 2019 après avis des rapporteurs, devant le jury d'examen :

M^{me} Laurence CURTIL	Professeure, Université de Lyon	Présidente
M. Amir SI LARBI	Professeur, Université de Lyon	Rapporteur
M. Daoud MIHOUBI	Professeur, CRTEn Tunisie	Rapporteur
M. Amenallah GUIZANI	Professeur, CRTEn Tunisie	Examineur
M. Hassen BEJI	Professeur, UPJV Amiens	Directeur de thèse
M. Oualid LIMAM	Professeur, ENIT Tunisie	Directeur de thèse
M. Geoffrey PROMIS	Maître de conférences, UPJV Amiens	Co-encadrant

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une co-tutelle de thèse entre l'Université de Picardie Jules Verne à Amiens (France) au sein de l'équipe Matériaux, Habitat et Transferts (MHT) du Laboratoire des Technologies Innovantes (LTI) et l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis de l'Université de Tunis El Manar au sein du Laboratoire de Génie Civil (LGC), sous la direction du Professeur Hassen BEJI et du Professeur Oualid LIMAM. A ce titre, je tiens à leur exprimer mes plus vifs remerciements pour leur accueil au sein de leur unité de recherche, leur confiance et leurs encouragements.

Je remercie également et tout particulièrement mon encadrant Monsieur Geoffrey PROMIS, pour son aide si précieuse, son assistance sans limites, ses conseils judicieux, sa patience et son soutien tout au long de ce travail. Il m'a suivi avec beaucoup de disponibilité durant toutes mes années de thèse.

Je tiens à remercier les membres de Jury, le Professeur Amir SI LARBI et le Professeur Daoued MIHOUBI pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail en acceptant d'être rapporteurs ; les examinateurs, la Professeure Laurence CURTIL et le Professeur Amenallah GUIZANI pour avoir accepté de participer à mon jury de thèse.

Je ne saurais oublier tous les membres et personnels du laboratoire de Génie Civil (LGC-ENIT) et ceux du Laboratoire des Technologies Innovantes (LTI), avec une pensée spéciale aux doctorant.e.s qui ont partagé mes doutes et mes réussites. Je leur exprime toute mon affection et mes pensées.

Enfin, je remercie infiniment mes parents, ma famille sans qui cette thèse n'aurait pu être accomplie, leur soutien, leur amour m'ont accompagnées tout au long de mes études.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	i
TABLE DES MATIERES.....	ii
LISTE DES FIGURES	vii
LISTE DES TABLEAUX	xii
INTRODUCTION GENERALE.....	1

PARTIE I. LES BETONS DE GRANULATS LEGERES : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE..... 8

Chapitre I. Etat de l'art.....	10
I. Introduction.....	10
II. Les granulats légers	11
1. Les différents types des granulats légers	11
1.1. Granulats naturels	12
1.2. Granulats artificiels.....	15
2. Caractéristiques des granulats légers.....	16
2.1. Propriétés spécifiques des granulats légers.....	16
2.1.1. Porosité	16
2.1.2. Absorption d'eau	18
2.2. Composition chimique et minéralogique des granulats légers	20
2.2.1. Granulats artificiels.....	20
2.2.2. Fibres végétales	22
a. La cellulose	22
b. L'hémicellulose.....	23
c. Les lignines.....	24
d. Les pectines	24
e. Les extractibles	24

f. Les cendres	24
2.3. Propriétés mécaniques des granulats légers	25
2.4. Propriétés élastiques des granulats légers	27
III. Les Bétons de granulats légers	28
1. Formulation et mise en œuvre des bétons légers.....	30
2. Principales caractéristiques des bétons légers	32
2.1. Porosité des bétons légers	32
2.2. Légèreté des bétons.....	33
3. Comportement des bétons de granulats légers	33
3.1. Comportement et performances mécaniques des bétons de granulats légers	33
3.2. Caractéristiques élastiques des bétons légers.....	34
3.3. Sensibilité à l'eau des bétons légers	36
3.4. Propriétés thermiques des bétons légers	36
IV. Conclusion	39
Chapitre II. Contexte environnemental	40
I. Introduction.....	40
II. Gestion des déchets.....	41
1. Législation des déchets.....	41
1.1. En France	41
1.2. En Tunisie	44
2. Valorisation des déchets dans les matériaux de construction	47
3. Procédé de carbonatation accélérée.....	52
III. Conclusion	54
 PARTIE II. POTENTIEL D'UTILISATION DES GRANULATS CARBONATES DANS LA COMPOSITION D'UN BETON.....	 57

Chapitre III. Caractérisation expérimentale des granulats carbonatés.....	59
I. Introduction.....	59
II. Le processus de fabrication des éco-granulats.....	60
III. Caractérisation physique des granulats.....	63
1. Analyse granulométrique	63
2. Forme des grains	66
3. Masses volumiques	69
3.1. Masse volumique apparente.....	70
3.2. Masse volumique réelle	71
4. Porosité totale et compacité.....	74
5. Absorption d'eau	77
IV. Caractérisation mécanique des granulats.....	79
1. Résistance à l'écrasement en vrac	79
2. Résistance à la fragmentation.....	83
V. Caractérisation thermique des granulats.....	85
VI. Conclusion	90
Chapitre IV. Modèle de formulation du béton à base de granulats carbonatés..	92
I. Introduction.....	92
II. Les bétons	93
III. Les matériaux utilisés	95
1. Le ciment.....	95
2. Le sable	95
3. L'eau.....	96
4. Les granulats	96
IV. Formulation et composition des bétons	96
V. Confection des éprouvettes.....	102
VI. Principales propriétés physiques du béton.....	103

1. Masse volumique à l'état frais	103
2. Masse volumique du béton à l'état durci.....	104
VII. Conclusion	105

PARTIE III. ANALYSE PERFORMANTIELLE DES PROPRIETES DES BETONS 107

Chapitre V. Analyse des propriétés mécaniques des bétons 109

I. Introduction.....	109
II. Compression uni-axiale : résistance à la rupture	110
III. Module d'élasticité en compression	117
IV. Traction indirecte : flexion trois points	122
V. Propriétés microstructurales	129
VI. Conclusion	134

Chapitre VI. Influence du type de granulats sur les performances thermiques des bétons 135

I. Introduction.....	135
II. Phénomènes de transfert de chaleur	136
1. Conduction thermique (régime permanent)	136
2. Conduction non stationnaire (régime variable)	140
3. Convection thermique	143
4. Rayonnement thermique	144
III. Propriétés thermiques des matériaux étudiés.....	144
1. Conductivité thermique	145
2. Capacité thermique massique	146
3. Effusivité thermique	146
4. Diffusivité thermique	146
5. Caractérisation thermique expérimentale des bétons	147

5.1. Méthode de la plaque chaude gardée	148
5.2. Méthode fluxmétrique.....	154
IV. Modèle de prédiction des performances thermiques	160
1. HAC avec des inclusions simples	161
2. HAC avec inclusions bi-composite	163
3. Étude analytique d'un béton à base des granulats carbonatés à l'état sec....	164
4. Approche empirique simplifiée	169
V. Conclusion	171
Chapitre VII. Approche expérimentale des propriétés hygriques des bétons.....	173
I. Introduction.....	173
II. Absorption d'eau par capillarité (sorptivité).....	174
III. Absorption d'eau par immersion totale	177
IV. Comportement de sorption	179
1. Transfert d'humidité sous forme vapeur	179
2. Transfert d'humidité sous forme liquide	180
3. Adsorption et désorption	181
V. Capacité tampon hydrique	192
VI. Conclusion	201
CONCLUSION GENERALE	203
PERSPECTIVES.....	207
BIBLIOGRAPHIE	208
ANNEXES	227
RESUME / ABSTRACT	

LISTE DES FIGURES

Figure I-1 : Différents granulats légers naturels.....	12
Figure I-2 : Les différentes formes de fibres	13
Figure I-3 : Classification des fibres selon leurs origines.	13
Figure I-4 : Structure d'une fibre végétale	14
Figure I-5 : Les fibrilles de cellulose.	15
Figure I-6 : Différents granulats légers artificiels.	16
Figure I-7 : Porosité des granulats.....	17
Figure I-8 : Absorption d'eau des granulats d'argile expansés et de cendres volantes frittées	18
Figure I-9 : Courbe d'absorption d'eau en fonction du temps	20
Figure I-10 : Structure chimique de la cellulose	23
Figure I-11 : Morphologie d'une microfibrille cellulosique.	23
Figure I-12 : Porosité du béton.....	33
Figure I-13 : Résistance en compression à 28 jours en fonction de la masse volumique	34
Figure I-14 : Variation du module d'Young en fonction de la masse volumique.....	36
Figure I-15 : Evolution de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique.....	38
Figure I-16 : Evolution de la conductivité thermique en fonction de la porosité.....	39
Figure II-1 : Composition des déchets ménagers en Tunisie	44
Figure II-2 : Distribution des déchets par secteurs industriels en Tunisie	45
Figure II-3 : Distribution des déchets de construction et de démolition dans le grand Tunis..	45
Figure II-4 : Composition des granulats recyclés de béton	49
Figure II-5 : chute de résistance des bétons de granulats recyclés.....	50
Figure II-6 : Procédé de carbonatation accélérée.	54
Figure II-7 : Centre de production des granulats au Royaume Uni.....	54
Figure III-1 : Eco-granulats étudiés C8 AGG, PA et BAk.....	62
Figure III-2 : Granulats de référence étudiés.	62
Figure III-3 : Courbes granulométriques du granulat C8 AGG.	64
Figure III-4 : Courbes granulométriques du granulat BAk.	64
Figure III-5 : Courbes granulométriques du granulat PA.	64
Figure III-6 : Courbes granulométriques du granulat AE.	64
Figure III-7 : Courbes granulométriques du granulat O.....	64
Figure III-8 : Courbes granulométriques du sable étudié.....	64

Figure III-9 : Courbes granulométriques des matériaux.	65
Figure III-10 : Coefficients d'aplatissement des granulats.	69
Figure III-11 : Mesure de la masse volumique apparente.	70
Figure III-12 : Masses volumiques apparentes des granulats.	70
Figure III-13 : La méthode pycnométrique.	71
Figure III-14 : Système poreux des granulats légers.	72
Figure III-15 : Masses volumiques des granulats en fonction de W_{A24}	73
Figure III-16 : Mesure de la porosité des granulats.	74
Figure III-17 : Porosité totale des granulats.	75
Figure III-18 : Porosité et compacité des granulats.	76
Figure III-19 : Porosité des granulats en fonction de W_{A24}	77
Figure III-20 : Essai d'absorption d'eau.	78
Figure III-21 : Absorption d'eau des granulats à 7 jours.	78
Figure III-22 : Variation de l'indice d'absorption d'eau en fonction du temps.	79
Figure III-23 : Essai d'écrasement en vrac des granulats.	80
Figure III-24 : Appareillage d'essai d'écrasement en vrac	80
Figure III-25 : Courbe force-enfoncement de l'essai d'écrasement des granulats.	80
Figure III-26 : Résistance à l'écrasement en vrac des granulats.	81
Figure III-27 : Résistance à l'écrasement en vrac en fonction de la porosité des granulats. ...	82
Figure III-28 : Résistance à l'écrasement en vrac en fonction de la masse volumique.	82
Figure III-29 : Essai de Los Angeles.	83
Figure III-30 : Résistance à la fragmentation des granulats.	84
Figure III-31 : Résistance à la fragmentation en fonction de la porosité des granulats.	85
Figure III-32 : Méthode de la plaque chaude gardée.	87
Figure III-33 : Schéma de principe de la méthode de plaque chaude gardée.	88
Figure III-34 : Conductivité thermique à 10°C des granulats secs.	89
Figure III-35 : Conductivité thermique des granulats en fonction de la porosité	90
Figure IV-1 : Protocole expérimental suivi.	102
Figure IV-2 : Masse volumique du béton durci en fonction du pourcentage des granulats...	104
Figure V-1 : Essai de compression uniaxiale.	111
Figure V-2 : Rupture des éco-bétons.	111
Figure V-3 : Phases de comportement d'un béton étudié.	112
Figure V-4 : Résistance à la compression en fonction du pourcentage des éco-granulats.	113

Figure V-5 : Résistance en compression des bétons en fonction de la résistance à l'écrasement en vrac des granulats.	114
Figure V-6 : Salpêtre sur une éprouvette de béton.	116
Figure V-7 : Confrontation des résistances en compression expérimentaux et théoriques....	117
Figure V-8 : Evolution du module d'Young en fonction du pourcentage d'éco-granulats....	118
Figure V-9 : Modules d'élasticité expérimentaux vs théoriques.....	120
Figure V-10 : Confrontation des modules d'Young des résultats expérimentaux et formules empiriques.	121
Figure V-11 : Confrontation des modules d'élasticité avec l'approche proposée.	122
Figure V-12 : Résistance en flexion en fonction du pourcentage des éco-granulats.	123
Figure V-13 : Faciès de rupture des éprouvettes en traction indirecte par flexion.	123
Figure V-14 : Module d'élasticité en flexion en fonction du pourcentage des granulats.	124
Figure V-15 : Evolution de la contrainte en traction en fonction de la masse volumique	129
Figure V-16 : Microscope électronique à balayage de l'UPJV.....	129
Figure V-17 : Principe de fonctionnement du microscope électronique à balayage.....	130
Figure V-18 : Préparation des échantillons pour visualisation au MEB.	131
Figure V-19 : Migration de la pâte de ciment dans le granulats AE.....	131
Figure V-20 : Observation au MEB du béton à base de granulats ordinaires O.	132
Figure V-21 : Observation au MEB du béton d'argile expansée AE.....	132
Figure V-22 : Observation au MEB des bétons à base de BAK.	132
Figure V-23 : Observation au MEB des bétons à base de C8 AGG.	132
Figure V-24 : Observation au MEB des bétons à base de PA.....	133
Figure VI-1 : Loi de Fourier.....	136
Figure VI-2 : Association des résistances thermiques en série.	139
Figure VI-3 : Association des résistances thermiques en parallèle.	139
Figure VI-4 : Schéma de principe de la méthode de la plaque chaude gardée.....	148
Figure VI-5 : Essai de la plaque chaude gardée.	148
Figure VI-6 : Conductivités thermiques des bétons étudiés en fonction de la température...	152
Figure VI-7 : Influence de la qualité des granulats sur la conductivité thermique.	154
Figure VI-8 : Schéma de principe pour la méthode fluxmétrique.....	155
Figure VI-9 : Essai fluxmétrique au sein du laboratoire de l'UPJV.	155
Figure VI-10 : Evolution de la chaleur spécifique et de la diffusivité thermique des bétons en fonction du taux de substitution avec des granulats carbonatés.....	157
Figure VI-11 : Inclusion sphérique simple soumise à un gradient de température G.....	162

Figure VI-12 : Equivalence entre milieu homogène et un milieu bi-composite à inclusion sphérique.	163
Figure VI-13 : Inclusion sphérique tri-composite.	164
Figure VI-14 : Inclusion sphérique représentant le matériau à l'état sec.	165
Figure VI-15 : Générique tri-composite.	166
Figure VI-16 : Approche empirique de la conductivité thermique des bétons de granulats carbonatés.	170
Figure VI-17 : Approche empirique de la capacité thermique massique des bétons de granulats carbonatés.	171
Figure VII-1 : Détermination du coefficient d'absorption d'eau par capillarité.	174
Figure VII-2 : Cinétique d'absorption d'eau par capillarité en fonction du temps.	175
Figure VII-3 : Sorptivité des bétons étudiés en fonction du pourcentage des éco-granulats.	176
Figure VII-4 : Coefficient d'absorption d'eau par immersion en fonction du pourcentage des éco-granulats.	178
Figure VII-5 : Éprouvettes de béton BAK après essai d'absorption d'eau.	179
Figure VII-6 : Isotherme de sorption-désorption d'un matériau hygroscopique.	181
Figure VII-7 : Fixation de l'humidité dans un pore.	182
Figure VII-8 : Classification des isothermes de sorption selon IUPAC.	183
Figure VII-9 : Classification des hystérésis d'adsorption.	184
Figure VII-10 : Essai d'adsorption/désorption.	185
Figure VII-11 : Courbes d'adsorption et de désorption des différents bétons étudiés.	187
Figure VII-12 : Modèle GAB pour les mesures de sorption des bétons étudiés.	189
Figure VII-13 : Isotherme de sorption des bétons C8.	190
Figure VII-14 : Isotherme de sorption des bétons PA.	191
Figure VII-15 : Isotherme de sorption des bétons BAK.	191
Figure VII-16 : Isotherme de sorption des bétons AE.	192
Figure VII-17 : Isotherme de sorption des bétons ordinaires O.	192
Figure VII-18 : Classification des valeurs tampon hydrique MBV.	194
Figure VII-19 : Enceinte climatique pour essai MBV.	197
Figure VII-20. Cinétique de prise et de perte de masse lors de l'essai MBV.	198
Figure A-1: Organigramme de la méthode de formulation de Baron-Olivier.	231
Figure B-1 : Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée.	233
Figure B-2: Variation de la valeur de correction en eau en fonction du diamètre D.	235

Figure B-3: Organigramme de la méthode de formulation de Dreux-Gorisse.....	241
Figure C-1: Dosage en ciment en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée	244
Figure C-2 : Composition granulaire type d'un béton étudié.....	246
Figure C-3 : Méthode de substitution des granulats dans le béton.....	248
Figure C-4 : Masse volumique du béton en fonction de la masse volumique des granulats dans la squelette granulaire.....	250
Figure C-5 : Résistance à l'écrasement en fonction des masses volumiques des bétons.	250

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1. Porosité de quelques granulats.....	17
Tableau I-2 : Absorption d'eau des différents granulats légers.....	19
Tableau I-3 : Masses volumiques des granulats légers étudiés par Y. Ke et al	19
Tableau I-4 : Composition chimique des granulats d'argile et de schiste expansés	21
Tableau I-5 : Composition chimique des granulats en laitier expansé	21
Tableau I-6 : Composition chimique de la pierre ponce et des granulats de cendres volantes frittés.....	21
Tableau I-7 : Récapitulatif des caractéristiques chimiques des granulats légers.	22
Tableau I-8 : Exemples de compositions chimiques de fibres végétales	25
Tableau I-9 : Résistances conventionnelles selon l'essai d'écrasement en pot des granulats légers	26
Tableau I-10 : Résistances des granulats légers en fonction de leurs densités en vrac.....	27
Tableau I-11 : Propriétés élastiques des granulats d'argile expansée et de pierre ponce	28
Tableau I-12 : Classification des bétons légers selon l'ACI	29
Tableau I-13 : Classes de résistances à la compression des bétons légers selon la norme NF EN 206-1.	29
Tableau I-14 : Classes de masses volumiques pour les bétons légers selon la norme NF EN 206-1.....	30
Tableau I-15 : Quelques caractéristiques des bétons.....	35
Tableau I-16 : Caractéristiques thermiques de quelques matériaux.....	37
Tableau III-1 : Influence des caractéristiques physiques et chimiques sur la carbonatation. ..	61
Tableau III-2 : Analyse granulométriques des matériaux utilisés.....	65
Tableau III-3 : Coefficients d'uniformité et de courbure des granulats.	66
Tableau III-4 : Correspondance entre classe granulaire d/D et largeur des tamis à fentes.	67
Tableau III-5 : Résultats de l'essai d'aplatissement pour le granulat PA.	67
Tableau III-6 : Résultats de l'essai d'aplatissement pour le granulat C8.....	67
Tableau III-7 : Résultats de l'essai d'aplatissement pour le granulat BAK.....	68
Tableau III-8 : Résultats de l'essai d'aplatissement pour le granulat AE.	68
Tableau III-9 : Résultats de l'essai d'aplatissement pour le granulat O.....	68
Tableau III-10 : Masses volumiques réelles, porosité et coefficients d'absorption d'eau des granulats.	72
Tableau III-11 : Classification des granulats selon LA.....	84

Tableau III-12 : Conductivité thermique des granulats étudiés.	89
Tableau III-13 : Caractéristiques physiques, mécaniques et thermiques des granulats.	91
Tableau IV-1 : Composition théorique du béton à base de GO par les deux méthodes de formulation.	97
Tableau IV-2 : Propriétés des bétons à base de PA formulés par les deux méthodes.	98
Tableau IV-3 : Avantages et inconvénients des deux méthodes de formulation	99
Tableau IV-4 : Composition des bétons de granulats carbonatés et de références.	101
Tableau IV-5 : Caractéristiques des bétons à l'état frais.	103
Tableau V-1 : Évolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge.	115
Tableau V-2 : Prédiction du module d'élasticité des granulats étudiés.	119
Tableau V-3 : Écart moyen des modules d'élasticité entre formules empiriques et résultats expérimentaux.	121
Tableau V-4 : Identification des caractéristiques des bétons en traction.	128
Tableau VI-1 : Conductivité thermique des matériaux carbonatés en fonction de la température.	151
Tableau VI-2 : Caractéristiques thermiques des bétons étudiés.	156
Tableau VI-3 : Comparaison des valeurs de la conductivité thermique par les deux méthodes d'essai.	158
Tableau VI-4 : Résistances thermiques des bétons étudiés.	160
Tableau VI-5 : Détermination de la conductivité thermique des particules par le modèle HAC.	167
Tableau VI-6 : Propriété physique du liant Portlandite.	168
Tableau VI-7 : Données d'entrée du modèle HAC.	168
Tableau VI-8 : Comparaison des conductivités thermiques expérimentales et théoriques.	169
Tableau VII-1 : Solutions salines utilisées pour fixer les humidités relatives.	185
Tableau VII-2 : Modèles de lissages mathématiques des isothermes de sorption.	187
Tableau VII-3 : Les constantes du modèle de GAB.	189
Tableau VII-4 : Valeur tampon hygrique (MBV) des différents bétons étudiés.	199
Tableau A-1: Conditions sur la résistance cible selon le type du béton.	227
Tableau A-2 : Relation entre consistance cible, demande en eau, teneur en air selon affaissement pour D=20 mm et T=20°C.	228
Tableau A-3 : Valeur du coefficient multiplicateur de correction sur E et a selon le diamètre di D est différent de 20 mm.	228

Tableau A-4 : Valeur du coefficient multiplicateur de correction sur E et a si T est différente de 20°C.....	228
Tableau A-5 : Valeur de Kb.	229
Tableau A-6: Valeur f_{mc} du ciment.	229
Tableau A-7 : Valeur de K_v	229
Tableau A-8: Coordonnées des point O, A et B de la courbe granulaire de référence.	230
Tableau B-1 : Valeurs approximatives du coefficient granulaire G.....	233
Tableau B-2: Dosage minimal en ciment selon la nature du milieu pour D variant de 16 à 50 mm.....	234
Tableau B-3: Correction en eau en (%) selon la valeur du diamètre maximal D (mm).....	234
Tableau B-4: Condition sur D_{max} selon la caractéristique de la pièce à bétonner.	235
Tableau B-5 : Valeur du coefficient K selon la valeur de C, du type de vibration et la nature des granulats.....	236
Tableau B-6: Valeur du coefficient de compacité γ	238
Tableau B-7: Quantité d'eau en litre contenue dans 1 m ³ de matériau granulaire en fonction de son degré apparent d'humidité.	239
Tableau C-1: Valeurs approximatives du coefficient granulaire G.....	243
Tableau C-2: Correction en eau en (%) selon la valeur du diamètre maximal D (mm).....	244
Tableau C-3 : Valeur du coefficient K selon la valeur de C, du type de vibration et la nature des granulats.....	245
Tableau C-4: valeur du coefficient de compacité γ	247

INTRODUCTION GENERALE

- **CONTEXTE GENERAL**

Les granulats s'avèrent être des matériaux soigneusement élaborés dont les caractéristiques sont normalisées dans la plupart des pays, comme l'intégralité des produits industriels. En effet, des exigences spécifiques en termes de caractéristiques de ces matériaux correspondent aux différents types d'usage des granulats. Un pays comme la France, selon l'Union Nationale des Industries de Carrières et Matériaux de construction UNICEM, consomme annuellement une quantité de granulats estimée à environ 379 millions de tonnes en hausse de 3.6 % par rapport à 2010 (dont 25 millions de tonnes issues de recyclage), soit une moyenne de 6 tonnes par habitant et par an (**Insee dossier n°34, 2011**), ce qui la place au 2ème rang européen après l'Allemagne. Actuellement, la France est le seul pays où la consommation continue à chuter du fait de la baisse des chantiers de logements et de travaux publics. Selon le rapport de l'UNICEM sur l'industrie Française des granulats 2017/2018 (**UNICEM: Union Nationale des Industries de Carrières et Matériaux de construction, 2017**), la consommation nationale en granulats a baissé de 508 Mt en 2008 à 423 Mt en 2014 ; Ces granulats sont essentiellement des granulats naturels en pourcentage de 80%. En Tunisie, la consommation de granulats s'élève à 50 millions de tonnes en 2008. La consommation globale a connu une croissance annuelle moyenne de 6% sur la période 2002 et 2008. La production des déchets de construction est de l'ordre de 23 millions de tonnes par an ; Les granulats alimentant principalement le secteur du bâtiment et travaux publics, leur production suit, par voie de conséquence, l'évolution générale des commandes de ce secteur. Ainsi, les quantités produites annuellement varient entre 300 et 400 millions de tonnes. Au vu de ces quantités très importantes, il apparaît très clairement que les granulats sont devenus, aujourd'hui, des matériaux de première nécessité dont l'approvisionnement doit être assuré de façon durable pour les générations futures. Les stocks en matières fossiles commencent à s'épuiser. S'ils existent de nouveaux gisements, ils seront plus profonds. Pour les exploiter, il faudra donc plus d'énergie ce qui participera au changement climatique. D'après l'Institut Français de l'Environnement Ifen (**Insee dossier n°34, 2011**), « l'extraction de granulats, en particulier celle des granulats alluvionnaires, représente un des principaux enjeux de gestion d'une

ressource non renouvelable en France ». Toutefois, ces ressources naturelles ne sont pas inépuisables et les lieux d'extraction ne cessent de s'éloigner des lieux de consommation. Comme toute matière première naturelle, les granulats naturels sont limités en quantité. En exploitant les carrières, nous avons pas conscience de l'importance de gérer durablement les ressources. Au caractère non renouvelable de la ressource s'ajoutent les impacts paysagers, écologiques et sur les eaux souterraines et superficielles que peut avoir l'extraction des matériaux en roche massive ou dans les sites alluviaux. De ce fait, la recherche de matériaux de qualité en substitution des granulats naturels est à l'origine d'un grand intérêt porté aux granulats recyclés qui peuvent satisfaire nos besoins. En effet, l'utilisation des granulats recyclés offre l'avantage de travailler en boucle fermée : un produit extrait = un produit utilisé = un produit recyclé = un produit réutilisé (**Architectes et professionnels du secteur de la construction, 2010**). En parallèle, l'essor rapide du tissu urbain, dans tous les pays du monde, a provoqué une augmentation impressionnante des quantités de sous-produits industriels et de déchets (**Gonzalez-Corrochano, et al., 2009**). Les sous-produits industriels et les déchets, qui autrefois ne suscitaient guère d'intérêt ni d'inquiétude, ont commencé à constituer un problème économique et écologique vers la fin du 20^{ème} siècle. Selon l'article L541-1 du code de l'environnement français, un déchet est « Tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon ». Notre mode de vie consomme trop de ressources naturelles en amont et produit des quantités énormes de déchets en aval. Nous consommons des produits et utilisons des services qui produisent des déchets durant l'intégralité de leur processus de création. Les quantités énormes qui sont ainsi produites sans cesse immobilisent des surfaces de plus en plus de grandes, consacrées au stockage de ces déchets, entraînant de ce fait une réduction de la disponibilité des terrains, sans compter la pollution de l'environnement. La production de déchets dans le monde est estimée de 3.4 à 4 milliards de tonne par an selon les statistiques de la banque mondiale (**Planétoscope, 2016**). Chaque jour, l'activité humaine produit environ 10 milliards de kilos de déchets (**Planétoscope, 2016**). La quantité de déchets que nous générons est étroitement liée à notre mode de consommation et de production. En France, chaque habitant jette 360 kg d'ordures ménagères par an, ce qui fait presque un kilo par jour. Selon le ministère de l'écologie et du développement durable Français, la production des déchets augmente chaque année de 1%. Ceci est dû à l'évolution des modes de vie, de la consommation et de la croissance démographique. La France produit 868 millions de tonnes de déchets annuellement, soit 41% issus du BTP, 42% de l'agriculture et de la sylviculture et

4% des ménages. En Europe, plus de 1.8 milliards de tonnes de déchets et assimilés sont générés chaque année, soit 3.5 tonnes par personne. Les déchets ne se limitent pas aux déchets ménagers, à ceux-ci s'ajoutent les déchets de la construction (BTP). Le secteur de bâtiment et de travaux publics génère plus de 100 millions de tonnes de matériaux de démolition et de déblais qui sont considérés dans la plupart des cas comme des déchets inertes. Chaque déchet devrait non seulement être perçu comme une source de pollution à réduire, mais également comme une source potentielle à exploiter.

Une étude menée par le ministère de l'équipement et de l'environnement Tunisien sur la pollution industrielle de 5000 industries montre que seulement 661 d'entre-elles utilisent des process de traitement de déchets. Plus de 75% des déchets sont rejetés dans la nature selon une étude menée par la banque mondiale.

On a recours à différents moyens de recyclage des déchets comme les décharges, l'incinération ou le stockage pour faire face à cette situation. La masse des déchets engendre un liquide très important « le lixiviat » qui contient des substances toxiques, des métaux lourds et des composés organiques divers. La mise en décharge des déchets ultimes présente beaucoup de problèmes à savoir le coût élevé et l'occupation de place des sites de stockage. Le rejet des déchets dans l'environnement contribue à détériorer notre milieu. Nous ne réfléchissons pas aux conséquences et aux effets négatifs possibles à moyen ou long terme de ces techniques. Suite à nos actes égoïstes et irréfléchis, l'environnement souffrira ainsi que les générations futures. Les conséquences de nos actes n'étant pas directement visibles, nos préoccupations sont faibles et nos actions peu nombreuses. Protéger l'environnement consiste à protéger l'humanité et permettre sa survie. Le recyclage et la valorisation est un devoir autant que nécessité. S'il n'est pas possible de supprimer les déchets ou les sous-produits industriels, il convient alors de définir les meilleures conditions de valorisation (**Motz, et al., 2001**). L'énergie de ces déchets peut être utilisée pour générer de la chaleur ou de l'électricité. Pour finir avec cette pollution, nous n'avons pas d'autre choix que de suivre une politique de réduction de déchets dans notre société.

Pourtant, il existe une autre manière de réduire les quantités de déchets d'une façon nettement plus respectueuse de l'environnement : l'incinération. Ceci consiste à brûler des déchets dans un grand four, à l'aide de mazout, de gaz de ville ou propane afin de permettre le démarrage du brûleur. Ce processus d'incinération utilise des filtres électrostatiques et des filtres manches qui aident à dégager la plupart des métaux lourds ou autres polluants. Cette méthode est pratiquée dans plusieurs pays mais ne s'étend pas partout car l'installation de telles

installations est très onéreuse. De plus, même avec les progrès technologiques récents, cette solution représente encore une méthode polluante.

Aujourd'hui, Nous nous intéressons plutôt à la valorisation des déchets qu'à leurs éliminations. Ainsi, le recyclage des déchets permet d'économiser les ressources naturelles, d'économie d'énergie... Recycler c'est récupérer, c'est redonner de la valeur à ce qui n'en a plus. De nombreuses études se sont intéressées à la valorisation des déchets dans les matériaux de construction en utilisant les granulats recyclés, les déchets de construction, les fibres de plantes, le bois etc. Ces nouveaux matériaux offrent des propriétés intéressantes pour être utilisés comme matériaux de substitution aux granulats naturels.

Par ailleurs, la fumée rejetée par les industries ou pendant le brûlage des déchets par incinération contient des gaz acides toxiques, des métaux lourds et du dioxyde de carbone CO₂ qui ont une grave conséquence sur la santé humaine et l'environnement. La fumée rejetée pendant le brûlage des déchets contient encore des métaux lourds et du dioxyde qui ont une grave conséquence sur la santé humaine et l'environnement.

Dans certains pays, l'incinération est faite à l'air libre ; La fumée dégagée devient donc très toxique. Le CO₂, gaz à effet de serre, s'accumule dans l'atmosphère et participe au réchauffement climatique. Les émissions atmosphériques des incinérateurs sont composées à près de 99% de CO₂, de vapeur d'eau, d'Azote et d'autres gaz inertes. Le secteur de bâtiment contribue fortement aux émissions de gaz à effet de serre (GES) avec environ 20% des émissions dues à la l'exploitation de ces bâtiments (chauffage, eau chaude etc.) En Europe, le secteur du bâtiment constitue une charge globale non négligeable. En effet, il représente 50% des ressources naturelles exploitées, 40% des déchets produits, 25% des émissions des CO₂ et 45% de consommations d'énergie. En Tunisie, les industries (papetières, chimie, agro-alimentaire ...) rejettent de nombreuses matières polluantes. De nos jours, la protection de l'environnement devient de plus en plus une préoccupation collective.

Le recyclage des déchets est efficace pour la réduction des gaz à effet de serre et autres polluants. Lorsque des matériaux recyclés remplacent des matériaux neufs, nous avons besoin d'extraire ou de produire une quantité moins importante de matière première.

Pour répondre, d'une part, au besoin vital de la construction et d'autre part, au besoin universel de conserver les ressources et de protéger l'environnement contre la pollution et le dégagement de CO₂, il a été question de se pencher beaucoup plus sur l'usage de déchets et de sous-produits industriels pour la production des granulats valorisables dans la composition de béton. Entre autres, il ne faut pas que l'introduction de ces déchets influe négativement sur les propriétés des bétons.

• CONTEXTE DE LA THESE

A l'aune de la conférence internationale sur le climat (COP21 – Paris 2015), la France, l'Europe et la plupart des pays du monde se sont engagées dans une politique ambitieuse de transition énergétique. Les plans d'actions proposés contribuent ainsi à lutter plus efficacement contre le dérèglement climatique et renforcent l'indépendance énergétique en équilibrant au mieux les ressources d'approvisionnement.

Afin de progresser sur la route du développement durable, le marché du bâtiment et de la construction regroupe d'importants leviers parmi lesquels nous pouvons citer la préservation des ressources naturelles, le recyclage des déchets ou encore la limitation des émissions d'origine industrielle.

A ces fins, ce travail de recherche appliquée, qui s'appuie sur les perspectives du projet européen INTERREG IV SAPICO₂ (N°4188, 2013–2015), s'oriente vers la valorisation de cendres d'incinérateur, transformées par un procédé breveté de carbonatation accélérée, dans la réalisation de blocs de construction à faible impact environnemental. Ce procédé vise à carbonater des matériaux dans une atmosphère riche en dioxyde de carbone afin de générer des granulats. Après leur acheminement et leur stockage au centre de production, les déchets sont prétraités par carbonatation puis mélangés à des réactifs pour former une pâte liante. Les matériaux sont ensuite carbonatés dans un réacteur tournant formant ainsi des granulats légers à bilan carbone négatif. Le CO₂ se transforme en acide carbonique qui va alors pouvoir initier des réactions avec des composés de type hydroxyde de calcium (portlandite ou chaux éteinte) pour former des carbonates de calcium.

Afin d'entrer dans l'ère de la construction responsable, deux axes prioritaires sont soutenus par les politiques régionales, nationales et internationales : le développement de nouveaux matériaux performants afin de limiter les déperditions thermiques au sein des bâtiments, et la promotion de nouvelles générations de centrales thermiques pour subvenir durablement à nos besoins énergétiques.

Le procédé de carbonatation accélérée a démontré son efficacité quant à l'inertage des résidus d'incinération, actuellement dirigés vers les centres d'enfouissement techniques de catégorie 1 (déchets dangereux). Son utilisation permettrait, au-delà de limiter les quantités de matériaux enfouis, de recycler le dioxyde de carbone présent dans les fumées d'incinération, en raison de la réaction de carbonatation fortement consommatrice de CO₂. Les granulats ainsi formés

peuvent remplacer tout ou partie des granulats dits « nobles » issus des filières classiques (carrière), et préserveraient par conséquent les ressources naturelles de notre sol.

Néanmoins, des recherches doivent encore être menées afin d'optimiser les paramètres du procédé de carbonatation accélérée et d'adapter la formulation des blocs de construction aux propriétés de granulats obtenus. Les granulats présentent de nombreux avantages (légèreté, performances thermiques, empreinte carbone faible, résistance mécanique convenable...) mais de plus amples investigations doivent être menées, notamment aux niveaux de l'interaction matrice / granulats et de la durabilité. Un regard critique doit également être apporté afin de passer de l'échelle du laboratoire vers l'échelle industrielle.

L'objectif de ce travail de recherche est donc de proposer, à destination des ingénieurs, une méthode de formulation de blocs de construction en adéquation avec des performances adaptées pour un chantier. Pour cela, différentes formulations de béton vont être proposées avec des avantages spécifiques, telles que la résistance mécanique, la performance hygrothermique ou la légèreté afin d'en proposer une méthode rationnelle de formulation. L'optimisation de ces formulations impose donc une parfaite maîtrise du squelette granulaire afin d'assurer un matériau novateur et éco-responsable.

Les enjeux de ce travail de recherche se situent autour du développement des matériaux de construction durables et à faible impact environnemental. Pour arriver à ces fins, le plan de recherche se décline en cinq parties comme suit :

- Tout d'abord une première partie est une revue de l'État de l'art – une synthèse bibliographique sur les matériaux de construction légers et offrant des performances en confort thermo-hygrique. Différents travaux orientés sur les propriétés des bétons légers ont été évoqués. Une partie sur la gestion et la valorisation des déchets dans les matériaux de construction est aussi étudiée ;

- Ensuite, dans une deuxième partie, un premier chapitre porte sur les essais réalisés au sein du Laboratoire des Technologies Innovantes de l'Université de Picardie Jules Verne et sont présentés à travers une caractérisation morphologique, mécanique, thermique et hygrique des éco-granulats produits par le processus de carbonatation accélérée des déchets d'incinérateurs afin de positionner ces matériaux sur le marché des granulats. Trois types de granulats carbonatés ont été testés ainsi que 2 granulats couramment utilisés : argile expansée et un granulats ordinaire. Un deuxième chapitre porte sur une étude d'optimisation de formulations de béton afin de satisfaire des critères liés à des marchés

spécifiques (par exemple : résistance mécanique, efficacité thermique, performances hygrique, légèreté...). Dans le but d'identifier l'influence du type de granulat et de leur pourcentage dans la composition du béton sur le comportement des bétons, nous avons considéré différentes fractions massiques des granulats légers soit 0, 25, 50, 75 et 100% soit au total 17 compositions et 2 formulations (Dreux-Gorisse et Baron-Olivier).

- Une troisième partie présente la campagne expérimentale de caractérisation mécanique, thermique et hygrique des bétons de granulats carbonatés, à l'état durci. Ceci permet de déterminer les principales propriétés des bétons. A cette campagne expérimentale s'ajoute l'analyse et la comparaison des résultats expérimentaux avec les résultats théoriques établis par prédiction des propriétés mécaniques, par la méthode d'homogénéisation du comportement thermique et lissage mathématique pour le comportement hydrique des bétons afin d'aboutir à la proposition d'une méthode de formulation des bétons à destination des ingénieurs.

- Finalement, les conclusions qui synthétisent ce travail de recherche et mettent en exergue des perspectives de recherche future. Des annexes et les références bibliographiques viennent achever ce manuscrit et proposer une méthodologie de formulation des bétons de granulats carbonatés.

Les différentes caractéristiques mesurées au cours de cette étude ont permis de déterminer le comportement mécanique et thermique et hygrique de ces matériaux. Des relations empiriques sont proposées de manière à prédire les principales performances des bétons à l'aune de la caractérisation simple des granulats carbonatés. Ces données modèles prouvent qu'il est envisageable d'exploiter la technologie de carbonatation accélérée afin de répondre aux exigences environnementales de plus en plus sévères tout en apportant des solutions viables et applicables rapidement pour le domaine de la construction de demain. Par ailleurs, ces résultats peuvent être utilisés dans les modèles numériques pour analyser les performances de l'intégralité d'un bâtiment et de pouvoir donner des éléments d'aide à la formulation de bétons éco-responsables.

PARTIE I.

LES BETONS DE GRANULATS LEGERS :

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Dans cette première partie, après avoir introduit la problématique de notre travail, nous allons nous intéresser à une étude bibliographique en mettant en évidence les performances des bétons de granulats légers ayant une certaine ressemblance avec les granulats de notre projet. Ainsi, un premier chapitre s'articulera autour des granulats et bétons légers ainsi que leurs propriétés. Un second chapitre sera consacré au contexte environnemental et à l'impact de l'utilisation des granulats issus du recyclage des déchets sur l'environnement. Au cours de ce chapitre, les réglementations en France et en Tunisie qui régissent la réutilisation des déchets sont présentées. De nombreux travaux sur la valorisation des déchets dans les matériaux ont été évoqués. Les granulats de notre étude sont fabriqués à partir de déchets d'incinérateurs, de ce fait pour finir cette partie, le processus de fabrication de ces granulats sera présenté.

CHAPITRE I.

ETAT DE L'ART

I. Introduction

Après avoir rappelé le contexte général de notre étude, cette partie propose une synthèse bibliographique des recherches précédentes sur les granulats légers et sur les bétons de granulats légers. La particularité de notre étude consiste à combiner du dioxyde de carbone CO_2 avec des déchets d'incinérateurs pour former des éco-matériaux carbonatés sous forme de granulats qui se classent dans la catégorie des granulats légers. Pour cette raison, ce premier chapitre s'articulera sur des éléments bibliographiques concernant les granulats légers car ils présentent certaines similarités avec les granulats de notre étude. Les bétons légers sont également présentés et leurs particularités sont explicitées en fonction de l'objectif de notre travail, qui est de fabriquer des bétons légers à base des granulats de l'étude produits par le procédé de carbonatation accélérée.

II. Les granulats légers

Actuellement, la recherche dans le domaine des matériaux de construction est dirigée vers les granulats légers naturels ou artificiels pour assurer d'une part, la persistance des granulats naturels traditionnels et l'allègement de certains éléments de construction et d'autre part, une économie d'énergie traduite par l'amélioration des performances thermiques (conductivité, effusivité, diffusivité thermiques et capacité massique spécifique notamment). Les granulats légers ont des faibles masses volumiques, inférieures à 2000 kg/m^3 , contrairement aux granulats traditionnels qui ont des masses volumiques de l'ordre de 2600 kg/m^3 . La diminution des masses volumiques est due à la porosité élevée des granulats légers notée n décrite par l'équation (1).

$$n = \frac{V_{\text{capillaires}}}{V_{\text{granulat}}} \quad (1)$$

avec :

- $V_{\text{capillaires}}$ le volume des vides contenus dans le granulat ;
- V_{granulat} le volume total occupé par le granulat.

Comme la grande majorité des matériaux de construction, les granulats légers doivent être conformes à des normes. Les granulats forment le squelette du béton, la régularité de leurs caractéristiques conditionne les propriétés du béton. Les granulats légers pour bétons et mortiers font l'objet d'une norme de référence NF EN 13055-1 (AFNOR NFEN13055-1, 2002). Cette norme européenne spécifie les caractéristiques des granulats et des fillers légers préparés à partir de matériaux naturels, artificiels ou recyclés et des mélanges de ces granulats afin d'être utilisés dans le béton, le mortier ou le coulis entrant dans la construction des bâtiments, des routes et des ouvrages de génie civil.

1. Les différents types des granulats légers

Nous pouvons subdiviser les granulats légers en deux catégories selon leurs origines. Certains existent à l'état naturel, les autres étant obtenus artificiellement par divers procédés chimiques, thermiques et/ou mécaniques.

1.1. Granulats naturels

Parmi les granulats naturellement poreux, les plus fréquemment rencontrés sont les pierres ponce ou les roches sédimentaires comme les calcaires etc. A l'état naturel, ils ont de faibles densités. Extraits de gisements, en les concassant, nous obtenons donc des granulats légers. Les autres granulats sont d'origine végétale. Il s'agit pour la plupart de déchets organiques valorisables dans le domaine de construction (**Herrmann, et al., 1998**). Nous pouvons noter le bois, le bambou etc. Les granulats légers naturels ne sont pas très utilisés car leur disponibilité varie énormément dans les différentes régions du monde.

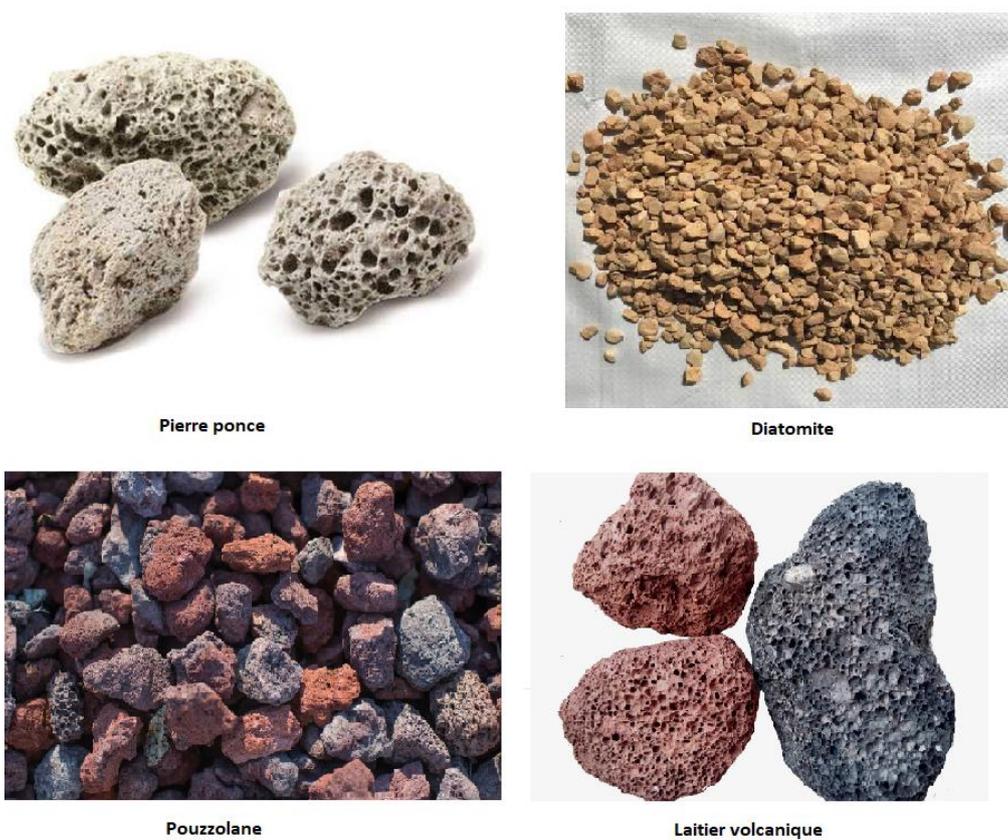


Figure I-1 : Différents granulats légers naturels.

Parmi les granulats d'origine végétale, nous pouvons citer les fibres végétales ou lignocellulose qui sont des structures rigides microfibrillaires (**Brudieux, 2007**) principalement composées de cellulose, d'hémicellulose et de lignine et en proportions relativement réduites d'extractibles, de protéines, de lipides et de matières minérales. Elles sont soit isolées, soit regroupées avec d'autres en un faisceau (**Kurek, 2006**).

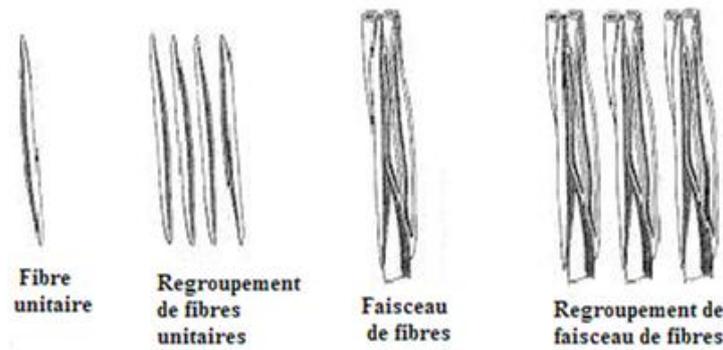


Figure I-2 : Les différentes formes de fibres (Mussig, 1999).

Une fibre élémentaire correspond à une cellule élémentaire fibreuse, qui, regroupée avec d'autres, forme un faisceau de fibres ; le lien interstitiel entre les fibres unitaires étant composé principalement de pectines et d'hémicellulose. Ce sont généralement ces faisceaux de fibres qui sont appelés fibres végétales (figure I-2) (Hepworth, et al., 2000).

Les fibres végétales peuvent être issues de différentes parties de la plante :

- des poils séminaux des graines (coton, kapok) ;
- de la tige (fibres libériennes : lin, chanvre, jute, ramie, jonc...) ;
- d'enveloppes des fruits (noix de coco) ;
- du tronc (chanvre de manille) ;
- et des feuilles (sisal, alfa, folioles de palmes) (figure I-3).

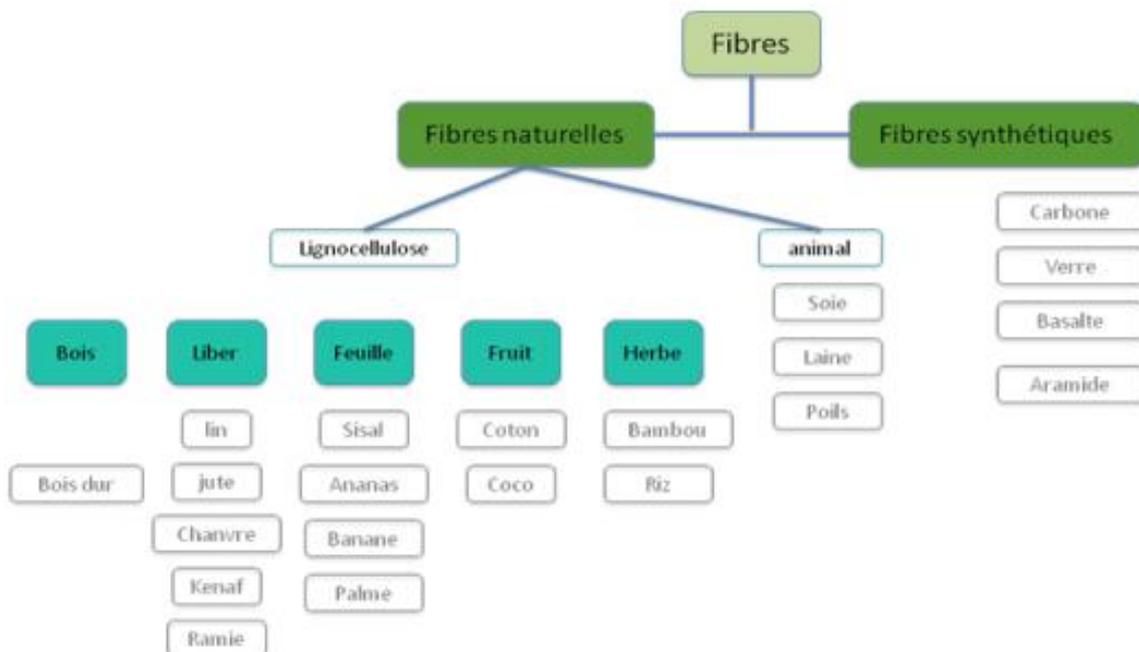


Figure I-3 : Classification des fibres selon leurs origines.

Les fibres peuvent aussi être classées suivant leurs teneurs en cellulose, en hémicellulose et en lignine. On distingue alors les fibres ligneuses (dures et rigides telles que celle provenant du bois) et les fibres non ligneuses (douces et souples dérivées des végétaux non ligneux comme le jute et le sisal).

Une troisième classification peut se faire suivant la longueur des fibres :

- Les fibres longues et douces (fibres libériennes) ;
- Les fibres longues, dures et rigides (provenant des feuilles et des troncs des arbres) ;
- Les fibres courtes, dite encore étoupes, elles sont associées aux fibres longues (Nenonene, 2009).

La fibre végétale peut être assimilée à un matériau composite dont le renfort est assuré par les fibrilles de cellulose enrobées d'une matrice d'hémicellulose et de lignine (figure I-4).

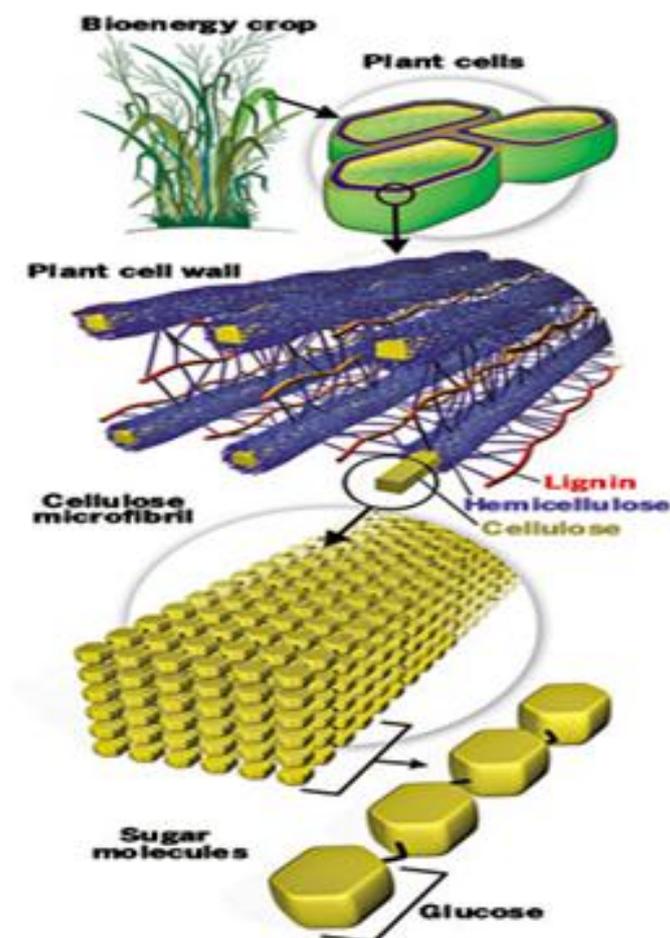


Figure I-4 : Structure d'une fibre végétale.

Les fibrilles (figure I-5) sont organisées en hélice et formant un angle avec l'axe de la fibre appelé « angle microfibrillaire ».

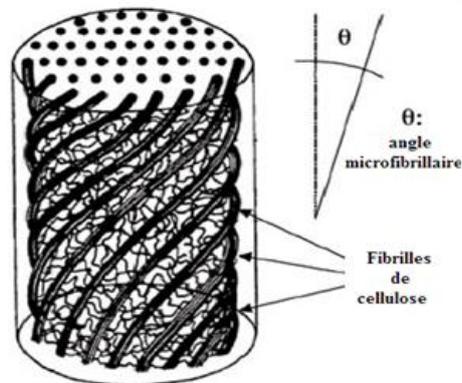


Figure I-5 : Les fibrilles de cellulose (Baley, 2004) .

Une fibre végétale est caractérisée par sa finesse et sa forme allongée par rapport à son diamètre. La plupart des fibres végétales mesurent entre 10 et 150 mm de long pour un diamètre de 10 à 50 μm , soit un rapport longueur sur diamètre compris entre 10 et 100.

1.2. Granulats artificiels

Parmi les granulats produits artificiellement, nous pouvons distinguer les produits artificiels issus des matières premières naturelles et les sous-produits industriels. Les matériaux produits à partir de matières premières naturelles sont principalement l'argile expansée, le schiste expansé etc. (figure I-6). Ces matériaux sont produits par expansion des matières premières dans un four après chauffage jusqu'à fusion (1000 -1300°C). La production des granulats se fait par moulage ou concassage après calcination ou bien concassage après expansion (NGUYEN, 2013). Les procédures de fabrications usuelles sont l'expansion en four rotatif ou la cuisson sur grilles (Arnould, et al., 1986). L'expansion peut être aussi obtenue par frittage (Neville, 2000). Les matières premières issues de sous-produits industriels sont les cendres volantes et le laitier de haut fourneau (NGUYEN, 2013). Les cendres volantes sont mélangées à l'eau puis transformées en boulettes soit au sein d'un tambour soit par extrusion (KE, 2008). Ces boulettes sont ensuite frittées dans un four à grilles jusqu'à une température de 1200°C. Ce qui provoque la formation d'un aggloméré de forme arrondie par fusion des particules de cendres volantes. Ces matériaux ont des masses volumiques en vrac comprises entre 1000 et 1200 kg/m^3 .



Figure I-6 : Différents granulats légers artificiels.

Selon les travaux de Chien-Hsing Lu et al. (Lu, et al., 2015), 21 types de granulats légers ont été fabriqués en additionnant différents pourcentages (5, 10 et 15%) de cendres volantes des déchets ménagers solides depuis les incinérateurs à lit-fluidisé et ceux à lit-mécanique jusqu'au dépôt du réservoir puis en mélangeant soigneusement avec 30% d'eau déminéralisée. Des granulats sphériques de 16 mm de diamètre ont été formés à la main et séché à 105°C pendant 24h (Quina, et al., 2014). Le frittage a été effectué au laboratoire dans des fours à haute température. La température de frittage a été contrôlée à une vitesse de chauffage de 2°C/min à partir de la température du local jusqu'à 1000, 1100 et 1200°C. Après le frittage, les granulats ont été refroidis à la température du local.

2. Caractéristiques des granulats légers

2.1. Propriétés spécifiques des granulats légers

2.1.1. Porosité

La porosité a une influence sur les propriétés hygrométriques des granulats et par la suite la maniabilité du béton. Les granulats légers présentent des porosités totales très élevées pouvant atteindre 75% de leur volume apparent. La porosité dépend de la taille des grains qui varie de 4 nm à 1 mm. Plus la taille des grains est grande, plus la porosité est élevée. Nous pouvons distinguer deux types de pores :

- Les pores ouverts qui constituent un système poreux continu dans le matériau ;
- Les pores fermés qui sont isolés et ne sont pas reliés ensemble (figure I-7).

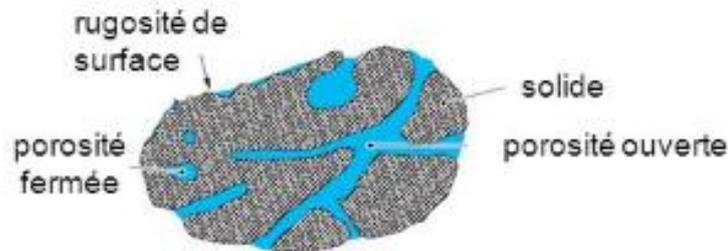


Figure I-7 : Porosité des granulats.

Le système de pores ouverts est le seul qui peut participer au transport de la matière dans le matériau (Zhutovsky, et al., 2004). L'absorption d'eau élevée des granulats dépend de l'inter-connectivité des pores ouverts : l'eau peut donc entrer à travers ces pores (NGUYEN, 2013).

Selon la norme Française NF P 18-557 (AFNOR NF P18-557, 1990), nous ne pouvons déterminer la porosité que pour des grains de classes granulométriques supérieures à 4 mm. En dessous de cette dimension, la porosité tend vers zéro et joue un rôle moins important dans l'ensemble du granulat. Le tableau I-1 présente des porosités de quelques granulats légers étudiés par quelques auteurs comparées à celle d'un granulat minéral :

Tableau I-1. Porosité de quelques granulats.

Granulats	ρ (kg/m ³)	Porosité ϕ
Granulat minéral	2600	< 1%
Argile expansée	850	60 à 70 %
Copeaux de bois en vrac	275	75%
Granulat bois (Agresta)	600	60%
Argile expansée 4/10 (KE, 2008)	560	64.6%
Schiste expansée 4/10 (KE, 2008)	493	65.4%
Schiste expansée 4/10 (NGUYEN, 2013)	520	59.5%
Argile expansée 4/10 (NGUYEN, 2013)	580	56.1%

La porosité des granulats légers est assez élevée et très importante, de 60 à 75 %, comparée à celle du granulat minéral qui est inférieure à 1%. Afin de bien mener la formulation des bétons, il faut savoir l'état de porosité des granulats ainsi que le taux d'absorption en eau.

2.1.2. Absorption d'eau

L'absorption d'eau des granulats légers dépend de leur porosité. En effet, la distribution des pores au sein des grains, leurs connectivités et la présence de l'enveloppe plus dense à la surface des granulats influent sur leur capacité à absorber l'eau. Selon plusieurs recherches, durant les premières heures d'immersion, la cinétique d'absorption est relativement rapide (Zhang, et al., 1991) et sera plus lente au-delà.

L'absorption d'eau des granulats légers est généralement décrite comme une succession de deux phases :

- Une phase d'absorption rapide (de quelques secondes jusqu'à quelques heures) qui intervient dès que les granulats secs sont immergés ;
- Une période d'absorption plus lente jusqu'à l'atteinte d'une valeur stable (cette phase peut durer jusqu'à deux ans).

D'un point de vue microscopique, ces deux phases s'expliquent par les caractéristiques des pores, leurs structures et leurs distributions (Swamy, et al., 1981).

Selon les travaux de (Zhang, et al., 1991) sur quelques granulats légers, l'absorption d'eau varie entre 8 et 13% en masse après 30 minutes d'immersion dans l'eau. Après 24 heures, l'absorption de granulats légers se situe entre 5 et 20 % en masse. La figure I-8 présente l'absorption d'eau en fonction du temps des granulats d'argile expansée notés Arg et de cendres volantes frittées notées CV d'après les travaux de (Zhang, et al., 1991).

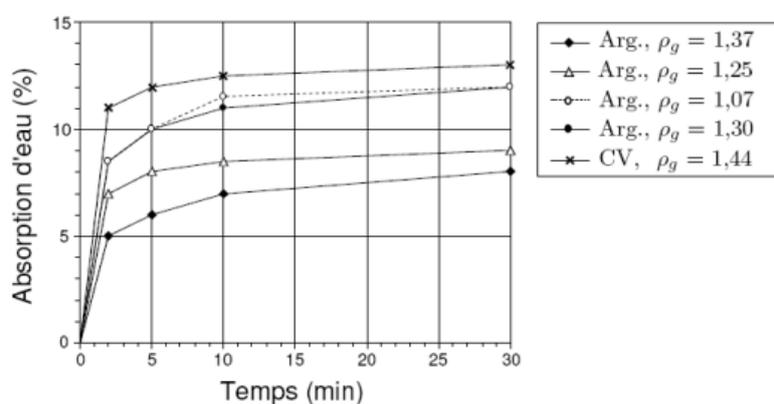


Figure I-8 : Absorption d'eau des granulats d'argile expansés (Arg) et de cendres volantes frittées (CV) d'après ZHANG et GJORV (Zhang, et al., 1991).

D'après les travaux de (Zhang, et al., 1991), nous pouvons remarquer à partir de la courbe d'absorption d'eau que pour des différents granulats d'argile expansée, l'absorption d'eau à 30 min varie de 7% pour la densité la plus importante à 12 % pour l'argile expansée de densité moins élevée. Pour les cendres volantes frittées (CV), l'absorption d'eau atteint les 13 % pendant 30 min. Ils sont les plus absorbants par rapport à l'argile expansée compte tenue de l'interconnexion la plus élevée entre les pores.

Le tableau I-2 présente un récapitulatif des propriétés de quelques granulats légers étudiés par (Zhang, et al., 1991):

Tableau I-2 : Absorption d'eau des différents granulats légers (Zhang, et al., 1991).

Nature	Masse volumique réelle (kg/m ³)	Absorption d'eau à 24h (%)
Argile expansée 1	1370	16
Argile expansée 2	1250	15
Argile expansée 3	1070	18.5
Argile expansée 4	1300	15.5
Cendre volante	1440	16.5

Nous pouvons remarquer que pour les granulats d'argile expansée, plus la masse volumique est faible plus les granulats absorbent d'eau. A 24 heures d'immersion dans l'eau, les granulats d'argiles expansées atteignent les 18.5 % d'absorption pour une masse volumique de 1070 kg/m³. Quant aux cendres volantes, ils absorbent 16.5% d'eau à 24 heures. Les travaux de (Ke, et al., 2006) ont été faits sur quatre types de granulats légers : trois argiles expansées différentes (0/4 650 ; 4/10 550 ; 4/10 430) et un schiste expansé (4/8 750). L'étude des masses volumiques de ces granulats est donnée dans le tableau I-3 suivant :

Tableau I-3 : Masses volumiques des granulats légers étudiés par Y. Ke et al. (Ke, et al., 2006).

Masse volumique (kg/m ³)	Granulats légers			
	0/4	4/10	4/10	4/8
	650	550	430	750
En vrac	600	560	455	878
Réelle séchée à l'étuve	927	921	737	1577
Réelle saturée surface sèche	1223	1138	878	1714

La courbe d'absorption de ces quatre types de granulats légers présentée sur la figure I-9 a montré que le schiste expansé ayant la masse volumique la plus importante présente le coefficient d'absorption le plus faible qui atteint les 10 % à 20 jours. Par contre, pour les granulats d'argile expansée, nous pouvons constater que le coefficient d'absorption d'eau diminue pour des masses volumiques faibles. Il atteint 45% pendant 20 jours pour les granulats d'argile expansée ayant la masse volumique la plus importante parmi les trois types. Ce comportement peut être traduit par le pourcentage des éléments fins et la microstructure des grains.

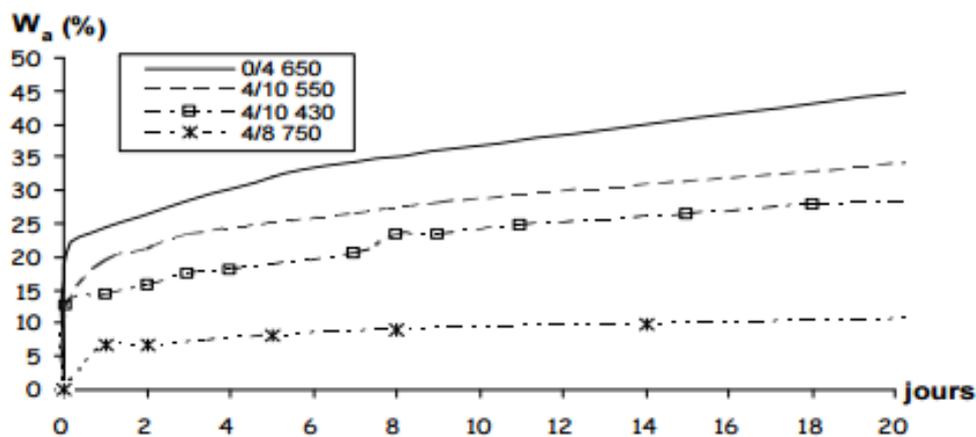


Figure I-9 : Courbe d'absorption d'eau en fonction du temps selon les travaux de Y.Ke et al. (Ke, et al., 2006).

Les granulats légers peuvent absorber une quantité importante de l'eau de gâchage lors de la fabrication du béton ce qui peut provoquer une perte de maniabilité (Arnould, et al., 1986). Afin de faire face à ce problème, le pré-mouillage des granulats ou leurs traitements peut y remédier.

2.2. Composition chimique et minéralogique des granulats légers

2.2.1. Granulats artificiels

Les granulats à base d'argile expansée, de schiste expansé et de cendres volantes ont une composition chimique similaire malgré l'utilisation de différentes matières premières et de nombreuses procédures de fabrication et températures d'expansion. Ils sont composés de plus de 85 % de silice, d'alumine et d'oxyde de fer. Le quartz est le minéral le plus abondant (Arnould, et al., 1986), (Gjorv, et al., 1990), (Sarkar, et al., 1992)).

La composition chimique courante de ces granulats est présentée dans le tableau I-4 :

Tableau I-4 : Composition chimique des granulats d'argile et de schiste expansés (Arnould, et al., 1986).

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Alcalis	SO ₃	S
%	50- 65	16- 25	5- 9	1- 5	1.5- 3.5	1.5- 4.5	0- 1.5	0- 1.5

Concernant la minéralogie, les granulats d'argile et de schiste expansés sont essentiellement constitués de quartz, et d'autres silicates ayant un faible pourcentage de cristallisation (Sarkar, et al., 1992), (Lo, et al., 2004).

Le laitier utilisé comme base de granulats légers doit satisfaire aux spécifications de la norme NF P 18-302. Ils sont composés à part égale d'environ 80 % de silice et de chaux (Malhotra, 1989).

Tableau I-5 : Composition chimique des granulats en laitier expansé (Arnould, et al., 1986).

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	FeO	MnO	S	SO ₃
%	38-48	29-38	13-24	≤6.0	≤4.0	≤2.0	≤2.0	≤0.5

(Vaquier, 1976) donne les compositions chimiques de la pierre ponce et des granulats de cendre volantes reportés dans le tableau I-6. La ponce est riche en silice, en alcalins et possède une teneur en sulfure non négligeable. La cendre volante possède plus d'alumine que les autres types de granulats légers.

Tableau I-6 : Composition chimique de la pierre ponce et des granulats de cendres volantes frittés (Vaquier, 1976) .

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O+ Na ₂ O	SO ₃
Pierre ponce	69.0	18.0	1.0	2.0	3.0	5.0	1.8
Cendre volante	49.5	30.2	2.4	9.5	4.6	3.0	0.9

Tableau I-7 : Récapitulatif des caractéristiques chimiques des granulats légers.

%	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	FeO	MnO	S	SO ₃	Alcalis	K ₂ O+Na ₂ O
Argile et schiste expansés (Arnould, et al., 1986)	1- 5	5- 9	50- 65	16- 25	1.5- 3.5	-	-	0- 1.5	0- 1.5	1.5- 4.5	-
Laitier expansé (Arnould, et al., 1986)	38- 48	-	29- 38	13-24	≤6.0	≤4.0	≤2.0	≤2.0	≤0.5	-	-
Pierre Ponce (Vaquier, 1976)	3.0	2.0	69.0	18.0	1.0	-	-	-	1.8	-	5.0
Cendre volante (Vaquier, 1976)	4.6	9.5	49.5	30.2	2.4	-	-	-	0.9	-	3.0

La composition chimique et minéralogique des granulats peut avoir une incidence sur le comportement physique et mécanique des granulats. Les résultats montrent la dominance de SiO₂. Le laitier expansé a une prédominance de CaO. Une bonne proportion aussi revient au Al₂O₃ avec des taux allant jusqu'à 30%. Une bonne quantité de Fe₂O₃ est présente dans les cendres volantes. L'argile et schiste expansée présentent des compositions chimiques similaires bien que leurs matières premières sont différentes (Arnould, et al., 1986).

2.2.2. *Fibres végétales*

La cellulose, l'hémicellulose et la lignine constituent les composés majeurs des fibres végétales. Leurs teneurs varient d'une espèce à une autre. Pour le même type de fibre, la composition chimique dépend de l'état de la maturité de l'espèce, de l'organe de provenance de la fibre, des conditions climatiques et des conditions d'extraction utilisées pour l'obtention des fibres (Bleszki, et al., 1999; Reddy, et al., 2005).

a. La cellulose

La cellulose est le polymère naturel le plus abondant dans la nature. 830 millions de tonnes de cellulose sont produits annuellement par photosynthèse. Il s'agit d'un homopolymère formé par l'enchaînement d'unités de cellobiose (formé de 2 unités de glucose) liées entre elles par une liaison glucosidique β-(1→4) (figure I-10) (Rowell, et al., 2000).

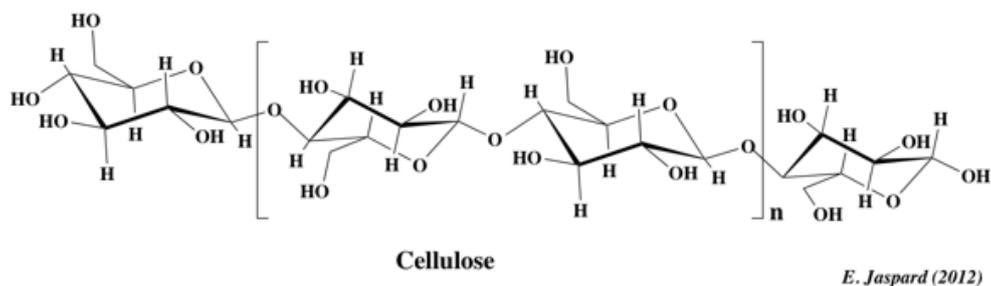


Figure I-10 : Structure chimique de la cellulose (Jaspard, et al., 2012) .

L'orientation des molécules de la cellulose ainsi que la présence des groupements hydroxyles libres permettent la formation des liaisons hydrogènes inter et intra-caténares, ce qui est à l'origine de formation des « microfibrilles ». Le repliement de ces dernières donne les microfibrilles.

Les liaisons hydrogènes jouent également un rôle important dans la formation des zones cristallines. Plus la densité de la cellulose est élevée, plus les zones cristallines sont formées. Les microfibrilles de cellulose présentent donc des régions bien ordonnées et cristallines et des régions désordonnées, dites amorphes (figure I-11). La plupart des plantes cellulosiques présentent 80% de régions cristallines de leur structure (Rowell, et al., 2000).

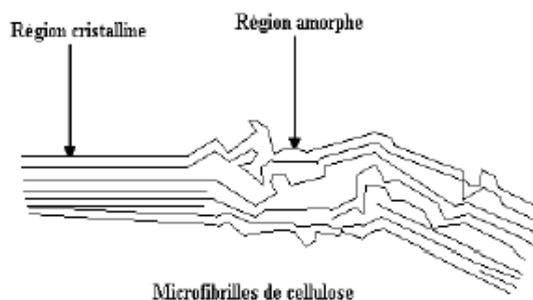


Figure I-11 : Morphologie d'une microfibrille cellulosique.

La cellulose n'est pas hydrosoluble mais fortement hydrophile. Elle est insoluble dans la plupart des solvants mais en même temps elle est sensible à l'hydrolyse acide ce qui conduit à des sucres solubles dans l'eau.

b. L'hémicellulose

Contrairement à la cellulose, l'hémicellulose est un polysaccharide formé d'unités saccharidiques de natures différentes. Elle est composée principalement de xylose, arabinose,

galactose, glucose, mannose et d'acide uronique. Sa structure diffère selon leur origine végétale.

Elles forment une matrice de soutien à la cellulose. Elles sont hydrophiles, solubles dans les solutions alcalines et facilement hydrolysables par les acides.

c. Les lignines

La structure des lignines est variable selon la nature de l'espèce végétale. C'est une macromolécule de poids moléculaire élevé, totalement amorphe et hydrophobe. C'est un polymère thermoplastique ayant une température de transition vitreuse de 90°C et une température de fusion aux alentours de 170°C. Il est résistant à l'hydrolyse acide, soluble dans les solutions alcalines à chaud, oxydables et condensables avec le phénol.

En général, les fibres ayant une faible teneur en cellulose possèdent au contraire une teneur élevée en lignine (**Reddy, et al., 2005**).

d. Les pectines

Elles caractérisent les premières assises formées dans la paroi cellulaire ainsi que la substance intercellulaire qui consolide les parois des cellules contigües chez les dicotylédones et dans une moindre mesure chez les monocotylédones. Elles sont très hydrophiles et l'eau qu'elles introduisent dans la paroi cellulaire rend la paroi plastique.

e. Les extractibles

Ce sont des composés chimiques qui constituent la paroi cellulaire. Ils contiennent essentiellement des matières grasses, d'acide gras, d'alcool gras, du phénol, des terpènes etc. Ils peuvent être extraits par différents types de solvants.

f. Les cendres

C'est le résidu en sels minéraux et matières inorganiques obtenu après combustion de la fibre à température égale à $575 \pm 25^\circ\text{C}$. La teneur en matière minérale est peu élevée dans les plantes contenant une quantité importante de silice.

Le tableau I-8 présente les compositions chimiques de quelques fibres végétales :

Tableau I-8 : Exemples de compositions chimiques de fibres végétales (Rowell, et al., 2000).

	Cellulose (%)	Lignine (%)	Hémicellulose (%)	Cendres (%)
Riz	28-48	12-16	23-28	15-20
Orge	31-45	14-15	24-29	5-7
Seigle	33-50	16-19	27-30	2-5
Bagasse	32-48	19-24	27-32	1.5-5
Bambou	26-43	21-31	15-26	1.7-5
Alfa	33-38	17-19	27-32	6-8
Sisal	43-62	7-9	21-24	0.6-1
Coton	85-96	0.7-1.6	1-3	0.8-2
Mais	40-43	13-15	28-30	-
Canne à sucre	32-48	19-24	27-32	-
Bois conifères	40-45	26-34	7-14	<1
Bois feuillus	38-49	23-30	19-26	<1
Chanvre	57-77	9-13	14-17	0.8
Ramie	87-96	-	5-8	-
Abaca	56-63	7-9	15-17	1.3

2.3. Propriétés mécaniques des granulats légers

Les propriétés mécaniques des granulats légers sont évaluées difficilement avec précision compte tenu des caractéristiques de chaque grain (porosité, densité etc.). L'essai d'écrasement au pot, mis au point par le laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC), est le plus utilisé (Arnould, et al., 1986). Il caractérise la résistance conventionnelle des grains (Arnould, et al., 1986). Le même principe est utilisé pour mesurer l'écrasement en vrac des granulats selon le protocole d'essai donné par la norme européenne EN 13055-1 (AFNOR NFEN13055-1, 2002). Pour mesurer la résistance à l'écrasement en vrac, un échantillon de granulats compacté par vibration est comprimé, à l'aide d'un piston, dans un cylindre de 100 mm de hauteur et de 175 à 200 cm² de section. La vitesse d'enfoncement du piston est de 0.2 mm par seconde et l'essai est terminé lorsque l'enfoncement du piston atteint 20 mm. La résistance conventionnelle des granulats en N/cm² est définie par le quotient de la force f nécessaire pour obtenir l'enfoncement de 20 mm du piston par section du cylindre (AFNOR NFEN13055-1, 2002).

Les valeurs de résistance de certains granulats légers selon l'essai d'écrasement en pot sont représentées dans le tableau I-9 :

Tableau I-9 : Résistances conventionnelles selon l'essai d'écrasement en pot des granulats légers (Arnould, et al., 1986).

Granulat	Résistance conventionnelle (MPa)
Argile Leca 3/8	9.0
Argile 16 (4/12)	8.3
Argile Isol « s »	5.9
Schiste Surex 675	10.6
Laitier Galex 3/ 8	3.9
Argile 16 (4/10)	7.8
Argile 16 (4/20)	5.3
Argile 16 (10/25)	3.3
Argile Leca 3/16	3.1
Argile Leca 10/25	2.5

Un essai de compression hydrostatique a été mené au centre technique des tuiles et briques (CTIB). Il caractérise la résistance à la pression hydrostatique (pression de rupture). Un granulat est mis en place dans une enceinte plastique très déformable, qui est placée dans un bain d'huile de la presse. Cette huile est mise en pression, par étapes, jusqu'à l'écrasement du granulat léger en triple étreinte, qui se manifeste par une brusque chute de pression. La résistance du grain est alors caractérisée par la pression de rupture.

Il existe aussi l'essai au fil établi par le Laboratoire de l'École des Mines de Paris aide à déterminer la résistance à la traction par fendage. Il consiste à placer un mince fil d'acier autour d'un granulat léger et à exercer une traction croissante, jusqu'à ce que le grain soit coupé en deux. La résistance du grain est caractérisée par le rapport de la force de traction à rupture à la surface de la boucle qui forme le fil d'acier autour du grain.

Les essais de traction et de compression sur des grains d'argile expansée de dimension 20 mm ont été effectués par (Morin, 1976) et des résistances de traction et de compression respectivement de 2 et 10 MPa ont été mesurées.

Pour chaque méthode de mesure, des formules empiriques entre la résistance et la masse volumique ont été définies par (Arnould, et al., 1986). Le tableau I-10 présente une

comparaison entre les résistances des granulats légers obtenues par les différentes approches. Nous observons des écarts significatifs entre ces différentes prédictions.

Tableau I-10 : Résistances des granulats légers en fonction de leurs densités en vrac (KE, 2008).

d_v	Résistances des granulats légers (MPa)				
	f_{gpot1}	f_{gpot2}	f_{eg1}	f_{eg2}	f_{tg}
0.4	-	2.87	33.12	20.20	1.28
0.5	3.35	6.97	52.72	40.40	1.99
0.6	10.05	11.07	72.32	60.60	2.69
0.7	16.75	15.17	91.92	80.8	3.4
0.8	23.45	-	11.52	101.00	4.11

avec :

- d_v la densité en vrac ;

- f_{gpot1} la résistance en compression au pot déterminée par la relation :

$$f_{\text{gpot1}} = 0.67 (d_v - 0.45) \text{ avec } 0.45 < d_v < 0.82 \quad (2)$$

- f_{gpot2} la résistance en compression au pot déterminée par la relation :

$$f_{\text{gpot2}} = 0.41 (d_v - 0.33) \text{ avec } 0.38 < d_v < 0.73 \quad (3)$$

- f_{eg1} la résistance à la compression hydrostatique des grains pris individuellement

$$f_{\text{eg1}} = 107.8 (1.82 d_v - 0.42) \quad (4)$$

- f_{eg2} la résistance à la compression hydrostatique des grains par lots

$$f_{\text{eg2}} = 202 (d_v - 0.3) \quad (5)$$

- f_{tg} la résistance à la traction au fil

$$f_{\text{tg}} = 3.9 (1.82 d_v - 0.4) \quad (6)$$

2.4. Propriétés élastiques des granulats légers

Une méthode de caractérisation du module d'Young, du coefficient de poisson et du module de cisaillement, basée sur un essai ultrasonique, a été proposée par Muller-Rochholz (**Müller-Rochholz, 1979**). Lors de cet essai, il mesure les vitesses d'impulsion des ondes longitudinales et transversales à travers un granulat. Le module d'Young, le coefficient de poisson et le module de cisaillement ont été calculés en corrélation avec ces vitesses. L'exactitude des valeurs est contrôlée sur des matériaux connus comme l'acier et le verre. Morin (**Morin, 1976**) a procédé à une mesure de déformation par jauge lors d'un essai de compression sur un grain de 20 mm aux extrémités duquel il a taillé deux faces planes parallèles. Le tableau I-11 présente les valeurs mesurées pour des granulats de différentes tailles et masses volumique.

Tableau I-11 : Propriétés élastiques des granulats d'argile expansée et de pierre ponce (Müller-Rochholz, 1979; Morin, 1976).

Granulats		Classe granulaire (mm)	Masse volumique des grains (kg/m ³)	Module d'Young des granulats (MPa)	Module de cisaillement des granulats (MPa)	Coefficient de Poisson des granulats
Muller-Rochholz (Müller-Rochholz, 1979)	Liapor 3 (Argile)	6.3-8	695	5193	2140	0.22
		8-12.5	600	4382	1850	0.18
		12.5-16	600	4332	1797	0.21
		16-25	500	3564	1339	0.22
	Liapor 6 (Argile)	6.3-8	-	10930	4479	0.22
		8-12.5	1078	13529	5675	0.19
		12.5-16	1078	12999	5501	0.18
	Liapor 8 (Argile)	6.3-8	-	17064	7383	0.16
		8-12.5	1451	17347	7474	0.16
		12.5-16	1451	17503	7566	0.16
Morin (Morin, 1976)	Pierre ponce	-	-	2600-3000	-	0.13
	Argile 20	20	-	1800-2000	-	0.12

On remarque que le module d'Young des granulats d'argile expansée varie entre 2000 et 17000 MPa. Des disparités tout aussi importantes sont visibles dans l'estimation du module de cisaillement ou du coefficient de Poisson.

III. Les Bétons de granulats légers

Les bétons de granulats légers peuvent être utilisés en structure ce qui peut être avantageux pour le coût du projet ainsi qu'à la fonctionnalité de l'ouvrage (ACI comittee 213, 2003). Grâce aux avantages des bétons de granulats légers comparés à un béton ordinaire, le coût du projet est réduit. Compte tenu de la réduction de la masse de l'ouvrage, l'utilisation des bétons légers permet aussi de construire sur un sol à faible capacité portante (Carmichaeli, 1986). Dans la plupart du temps, les bétons légers de structure sont réalisés à base de granulats légers comme de l'argile expansée ou cendres volantes. La résistance à la compression minimale préconisée par l'ACI (ACI, 1994) est de 17 MPa à 28 jours. Les bétons de faible densité sont produits à partir de granulats très légers ayant des porosités très élevées ou par une matrice cellulaire. L'incorporation de bulles d'air se fait par entrainement d'air au moment du

malaxage. Il existe d'autres types de granulats : ceux qui sont plus résistant mais non absorbants (verre et polystyrène expansés). Les bétons légers sont classifiés selon l'ACI (tableau I-12).

Tableau I-12 : Classification des bétons légers selon l'ACI (ACI, 1994).

Classification	ρ_b (kg/m³)	f_{c28} (MPa)
Béton léger de structure	1350-1900	> 17
Béton léger de résistance modérée	800-1350	7-17
Béton de faible densité	300-800	< 7

Selon la norme NF EN 206-1, les granulats légers sont classés selon les résistances en compression comme indiqué au tableau I-13 :

Tableau I-13 : Classes de résistances à la compression des bétons légers selon la norme NF EN 206-1.

Classe de résistance à la compression	Résistance caractéristique sur cylindres [N/mm²]	Résistance caractéristique sur cubes [N/mm²]
LC 8/9 LC 12/13	8 12	9 13
LC 16/18 LC 20/22	16 20	18 22
LC 25/28 LC 30/33	25 30	28 33
LC 35/38 LC 40/44	35 40	38 44
LC 45/50 LC 50/55	45 50	50 55
LC 55/60 LC 60/66	55 60	60 66
LC 70/77 LC 80/88	70 80	77 88

Les bétons légers sont aussi classés selon leurs masses volumiques en 6 classes comme présenté au tableau I-14 :

Tableau I-14 : Classes de masses volumiques pour les bétons légers selon la norme NF EN 206-1.

Classe de masse volumique	D 1.0	D 1.2	D 1.4	D 1.6	D 1.8	D 2.0
Plage de masse volumique (kg/m ³)	≥ 800 Et ≤ 1000	≥ 1000 Et ≤ 1200	≥ 1200 Et ≤ 1400	≥ 1400 Et ≤ 1600	≥ 1600 Et ≤ 1800	≥ 1800 Et ≤ 2000

1. Formulation et mise en œuvre des bétons légers

Pour la formulation des bétons légers, les méthodes classiques sont applicables. Seuls les granulats naturels sont remplacés par des granulats légers. Les constituants sont les mêmes que dans le cas d'un béton traditionnel. Nous devons donc prendre en considération l'absorption d'eau de ces granulats afin d'adapter au mieux la proportion d'eau à ajouter lors de la confection des bétons. Dans le béton, les migrations d'eau jouent un rôle important. En raison de leurs structures poreuses, les granulats légers absorbent l'eau libre ce qui affecte la maniabilité des bétons. Il faut donc suffisamment les pré-mouiller avant le malaxage des constituants (**Zhu, et al., 2017**). Des échanges d'eau se produisent entre le granulat et la matrice. Selon Arnould et al. (**Arnould, et al., 1986**), l'utilisation des granulats secs lors de la confection des bétons provoque une absorption très importante de l'eau de gâchage d'où des problèmes à la mise en œuvre des bétons. Les granulats occupent le pourcentage le plus important de la masse volumique du béton de 50 à 60%. Les quantités de ciment et d'eau sont déterminées à partir de la résistance en compression souhaitée et de l'affaissement désiré lors de l'étude de formulation des bétons.

La masse volumique des bétons, une caractéristique indispensable, dépend de la quantité d'eau qui est déjà contenue dans le béton mais s'évapore lors de sa fabrication (**Arnould, et al., 1986**). Elle dépend de la masse volumique des granulats utilisés ainsi que la composition des bétons.

Les granulats ont un effet important sur les propriétés des bétons. Les performances du béton peuvent être affectées par la qualité des granulats et la présence d'impuretés. Ces impuretés agissent sur l'hydratation du ciment en la perturbant d'où des problèmes d'adhérence matrice-granulat ce qui affecte les propriétés du béton. Le besoin en eau de gâchage dépend de la forme et de la porosité des granulats. La réduction de l'eau de gâchage permet d'avoir une faible maniabilité et donc améliorer les résistances mécaniques des bétons.

Pour confectionner des nouveaux bétons, la synthèse bibliographique réalisée par **(Bodet, 2003)** montre que les granulats recyclés de bétons absorbent une quantité d'eau plus importante, ont des masses volumiques plus faibles et une homogénéité moindre par rapport aux granulats naturels. Cela engendre une perte d'ouvrabilité et des résistances mécaniques plus faibles.

D'autres auteurs comme **(Meftah, et al., 2011)** ont étudiés l'influence du remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés sur la maniabilité des bétons **(Karakurt, et al., 2017)**. Les granulats recyclés sont utilisés dans trois états : secs, humidifiés et saturés en eau. Dans le cas d'utilisation de granulats secs, la maniabilité des bétons baisse considérablement à cause de l'absorption d'une partie d'eau de gâchage par les granulats recyclés **(Gündüz, 2008)(Kabay, et al., 2012)**. En utilisant les granulats pré-mouillés, l'ouvrabilité est meilleure que celle des bétons produits avec des granulats secs. Une teneur en eau excessive entraîne une quantité d'eau totale importante ce qui peut entraîner une mauvaise cohésion granulat/matrice **(Kabay, et al., 2012)**. Cela influe la résistance et la durabilité des bétons légers. L'utilisation des granulats secs donnent des bétons beaucoup plus résistants que dans le cas de les utiliser pré-mouillés ou saturés et ce avec un pourcentage de remplacement de 20 à 40% dans la matrice du béton.

L'humidification des granulats légers avant le malaxage des constituants a un effet important sur l'ouvrabilité des bétons **(Kabay, et al., 2012)**. La méthode d'humidification des granulats a un effet significatif sur les propriétés des bétons à l'état frais et durci. Les performances des bétons avec des granulats pré-mouillés sous vide sont meilleures qu'en utilisant des granulats pré-mouillés ou saturés d'eau **(Kabay, et al., 2012)**.

Les caractéristiques des granulats légers affectent les propriétés des bétons en particulier la taille et la distribution des granulats légers qui influent la résistance à la compression et la conductivité thermique des bétons. La distribution granulométrique des granulats est un facteur très important puisqu'elle peut affecter l'ouvrabilité et le coût du béton. Les travaux de **(Chung, et al., 2017)** ont portés sur l'effet de la granulométrie des granulats légers sur les propriétés des bétons. L'utilisation d'un volume important de granulats légers permet de réduire la densité et la quantité de ciment utilisée. Dans l'étude de **(Chung, et al., 2017)**, des bétons à base de granulats de verre expansée (connus pour leurs très faibles densités et leurs absorptions d'eau) ont été étudiés à différentes distributions de granulats. Pour un volume de granulats identique, les bétons contenant la proportion de granulats fins la plus importante est celui la meilleure résistance à la compression et le module d'élasticité mais la conductivité thermique est plus importante. Le béton léger avec une meilleure conductivité thermique sans

perdre des caractéristiques mécaniques est produit en utilisant une granulométrie appropriée. La densité des granulats affecte les propriétés des bétons surtout en utilisant des éléments fins (Sarı, et al., 2005).

2. Principales caractéristiques des bétons légers

2.1. Porosité des bétons légers

Le béton est un milieu poreux qui est constitué d'une matrice solide essentiellement de granulats et liant ainsi qu'un espace poreux constitué de vides dont les tailles varient de quelques dizaines d'Angstrom (Å) à quelques millimètres. Les granulats qui constituent le béton possèdent une porosité intrinsèque appelée φ_g qui est due à l'air intra particule. La porosité des granulats est supposée porosité microscopique vu la taille des pores qui sont de l'ordre de la dizaine de μm . Lors de la prise du liant et du séchage de matériau, des vides d'air apparaissent dans la matrice du liant ; l'air intra-liant qui définit la porosité intrinsèque du liant noté φ_l . L'air intra-liant est considéré comme air microscopique.

$$\varphi_l = \frac{V_{vides}}{V_{liant}} \quad (7)$$

dans laquelle :

- V_{vides} est le volume des vides contenus dans la matrice de liant ;
- V_{liant} représente le volume total occupé par la pâte de liant.

De plus, des vides supplémentaires sont créés suite à l'arrangement des différents constituants entre eux dans le béton, c'est de la porosité mésoscopique φ_{meso} .

$$\varphi_{meso} = \frac{V_{vides}}{V_t} \quad (8)$$

avec :

- V_{vides} le volume des vides contenus dans le matériau autres que l'air intra-liant et intra-particule ;
- V_t le volume total occupé par le matériau.

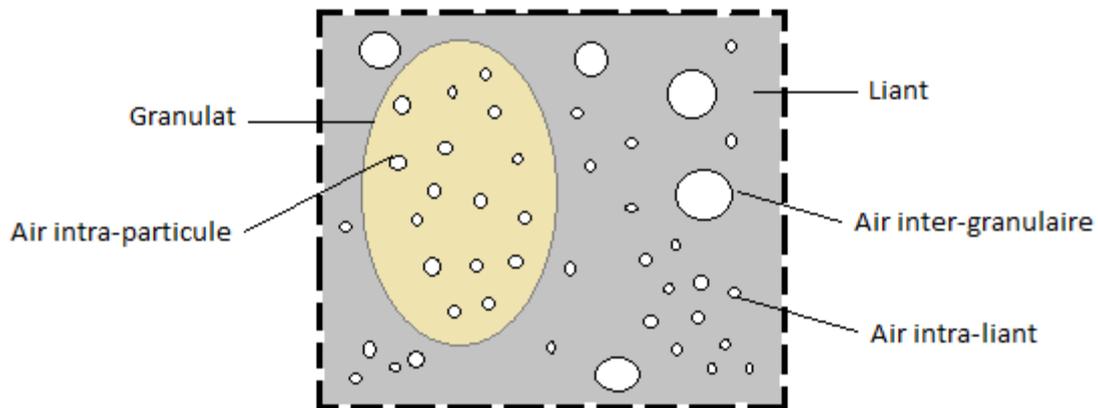


Figure I-12 : Porosité du béton.

La porosité du béton dépend de la porosité de la matrice et celle du granulat. Elle représente la fraction de volume des vides dans le matériau par rapport au volume total :

$$n = \frac{V_{vides}}{V_{total}} = n_g + n_m \quad (9)$$

2.2. Légèreté des bétons

L'utilisation des granulats légers permet une diminution qui atteint les 30 % de la masse volumique des bétons. Un béton hydraulique possède une masse volumique de l'ordre de 2300 kg/m^3 alors que celle d'un béton d'argile expansée est de 1600 kg/m^3 et un béton de bois pèse entre 600 et 900 kg/m^3 (AFNOR NF P 14-306, 1986). L'utilisation des granulats légers pour fabriquer des bétons permet une mise en œuvre facile du matériau. De plus, ce matériau allégé nécessite des fondations moins importantes lors de la construction. Cette légèreté de poids attribue à ces matériaux une bonne résistance thermique. Ces matériaux peuvent donc jouer un rôle d'isolant dans le bâtiment. Le caractère léger et poreux des granulats donnent aux bétons une bonne inertie thermique.

3. Comportement des bétons de granulats légers

3.1. Comportement et performances mécaniques des bétons de granulats légers

Les granulats légers modifient le comportement et les niveaux de performances mécaniques du béton. En effet, les granulats légers sont poreux donc moins résistants qu'un granulat ordinaire. Le comportement mécanique des bétons légers est modifié comparé à un béton de granulats durs. Les granulats légers étant poreux donc déformables, les performances des

bétons légers sont inférieures à celles des matériaux usuels de construction. La résistance en compression et le module d'Young augmentent moins que le matériau soit poreux. (Arnould, et al., 1986) a réussi à trouver une corrélation linéaire entre la résistance en compression f_{c28} et la masse volumique apparente ρ des bétons de granulats d'argile expansée.

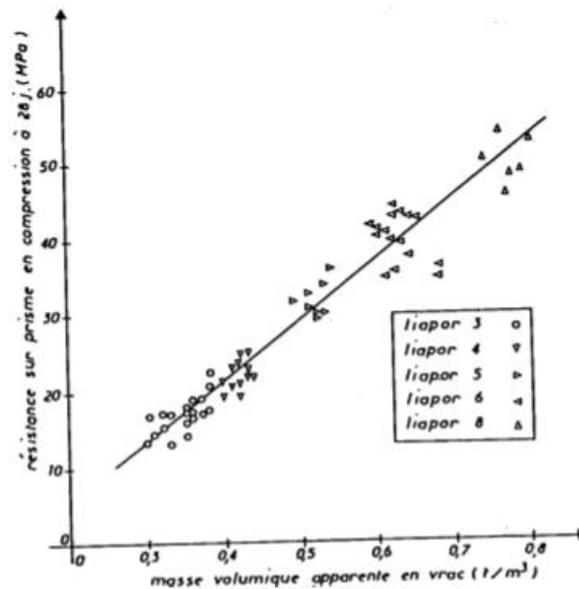


Figure I-13 : Résistance en compression à 28 jours en fonction de la masse volumique (Arnould, et al., 1986).

A la différence du béton traditionnel, la rupture en compression d'un béton léger se produit en général par cassure des granulats légers, dans des plans qui coupent le plus grand nombre possible des granulats légers. La rupture des éprouvettes est ainsi caractérisée par un ou plusieurs plans parallèles au chargement et par le fendage des granulats (Arnould, et al., 1986).

De même que pour les bétons ordinaires, les bétons légers présentent une résistance à la traction assez faible. Ceci est d'autant plus vrai pour les bétons légers, puisque la propagation des fissures peut s'effectuer au travers des granulats. Des résistances à la traction par fendage de 3.3 à 4.2 MPa pour des bétons d'une masse volumique de 1940 kg/m³ (Wilson, et al., 1988), ou de 3.5 à 5.6 MPa pour des bétons, dont la masse volumique variait de 1620 à 1885 kg/m³ (Zhang, et al., 1991), ont par exemple été rapportées.

3.2. Caractéristiques élastiques des bétons légers

Le module d'Young d'un béton léger est bien évidemment inférieur à celui du béton traditionnel en raison de sa faible masse volumique. Généralement, le module d'Young d'un béton léger est considéré comme valant la moitié ou les trois quart de celui d'un béton

traditionnel de même résistance. Une plus faible rigidité peut être parfois souhaitable pour les structures soumises à une sollicitation dynamique ou pour des structures en coques. Un faible module d'Young peut néanmoins être à l'origine de désordres dans les structures en béton précontraint suite à une relaxation des câbles de précontrainte et à la chute de tension qui en découle.

Pour un rapport Eau/Liant équivalent, le module élastique d'un béton léger est inférieur à celui d'un béton normal. La cause principale réside dans le module élastique des granulats légers (10 à 20 GPa) qui est très inférieur à celui des granulats de masse volumique usuelle (granite : 10 à 70 GPa, calcaire : 10 à 55 GPa).

Le tableau I-15 présente quelques caractéristiques des bétons légers.

Tableau I-15 : Quelques caractéristiques des bétons.

Béton	ρ (kg/m³)	Porosité ϕ	f_c (MPa)	E (GPa)
Béton hydraulique	2330	9%	30	36
Béton argile expansée	1600	36 %	25	14
Béton cellulaire	350-650	75 à 82%	5	2 à 3
Béton de bois	890	52%	8	2
Béton de liège expansé	1200	-	5	-
Béton de chanvre (Rahim, 2015)	478	77%	0.6	0.05
Béton de granulats de bois (Akkaoui, 2014)	872		5.3	2.54
Béton pouzzolane (BESSENOUCI, 2018)	1770	36.9%	16.5	-
Béton d'argile expansée (Ke, et al., 2006)	1500	-	27.5	17
Béton mousse (BEN YOUSSEF, et al., 2016)	690	10%	0.73	1.2

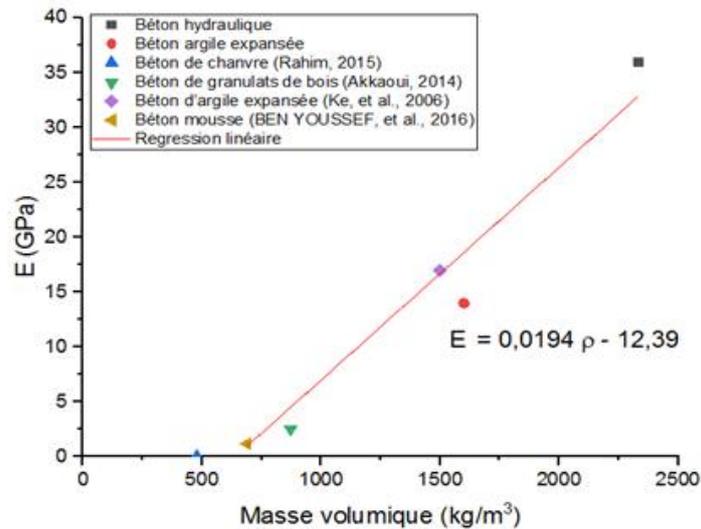


Figure I-14 : Variation du module d'Young en fonction de la masse volumique.

Une relation quasi linéaire s'établit entre le module d'Young en fonction de la masse volumique. Les propriétés élastiques des bétons légers dépendent fortement de leurs densités qui sont lié aux caractéristiques des granulats le constituant.

3.3. Sensibilité à l'eau des bétons légers

Les granulats poreux permettent les transferts hygriques sous forme liquide et vapeur. En cas de transfert d'eau liquide, on parle d'absorption et dans le cas de transfert d'eau vapeur, on parle de sorption-désorption.

- L'absorption : un phénomène physique intérieur d'un milieu poreux grâce à un phénomène de remontées capillaires par succion ou électro-osmose. L'absorption entraîne un gain de masse du matériau.
- La sorption-désorption : Les matériaux ont la faculté de condenser l'eau contenue dans le milieu extérieur à l'état vapeur. Ceci est du à l'augmentation de la pression dans le réseau capillaire, et inversement. Ce phénomène se définit par la mesure de variations de masses des échantillons en fonction des conditions de conservation.

3.4. Propriétés thermiques des bétons légers

La conductivité thermique est le flux de chaleur qui traverse un matériau d'épaisseur connu pour une différence de température d'un degré entre les deux faces. C'est une grandeur intrinsèque du matériau, qui dépend des caractéristiques de ses constituants et de leurs microstructures.

Un béton de granulats ordinaires contient de l'air, dû à l'arrangement de la phase solide et à la prise de liant, qui conduit très faiblement la chaleur. Les bétons à base de granulats légers étant poreux apportent donc un pourcentage volumique plus élevé d'air (air intra-particule). Un béton ordinaire ($\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$) possède une conductivité thermique de 2 W/m. K alors qu'un béton d'argile expansée ($\rho = 1600 \text{ kg/m}^3$) a une conductivité thermique de 0.6 W/m. K .

La capacité thermique massique C en J/kg. K est une autre caractéristique des propriétés thermiques des bétons. Elle définit la quantité de chaleur nécessaire pour augmenter la température de 1°C . Plus C augmente, plus le matériau aura besoin d'énergie pour que sa température augmente. Ayant une chaleur spécifique élevée, le matériau possède donc une inertie thermique importante. Connaissant la conductivité thermique λ et de la chaleur spécifique C , nous pouvons déterminer la diffusivité thermique a (J/m. K). Elle caractérise la vitesse à laquelle la chaleur se propage par conduction dans un corps. Plus la valeur de a est faible, plus la chaleur met de temps à traverser le matériau.

Les caractéristiques thermiques de quelques matériaux sont présentées au tableau I-16 :

Tableau I-16 : Caractéristiques thermiques de quelques matériaux.

	ρ (kg/m^3)	Porosité ϕ	Chaleur spécifique C (J/kg. K)	Conductivité thermique λ (W/(m. K))	Diffusivité thermique a (m^2/s)
Air	1.2	-	1000	0.026	$2.2 \cdot 10^{-5}$
Eau liquide	998	-	4180	0.602	$1.4 \cdot 10^{-7}$
Styrodur	50	-	-	0.033	-
Cuivre	8900	-	390	400	$1.2 \cdot 10^{-4}$
Contre-plaqué	700	-	1500	0.12	$1.1 \cdot 10^{-7}$
Béton hydraulique	2330	8 %	1050	1.8 à 2	$7.4 \text{ à } 8.2 \cdot 10^{-7}$
Béton argile expansée	1600	36 %	900	0.46	$3.2 \cdot 10^{-7}$
Béton cellulaire	350 à 650	75 à 82 %	880	0.16 à 0.33	$5.2 \text{ à } 5.8 \cdot 10^{-7}$
Béton de bois	600 à 900	52%	1200	0.09 à 0.30	$1.2 \text{ à } 2.8 \cdot 10^{-7}$
Brique	1800	-	860	1.15	$7.4 \cdot 10^{-7}$

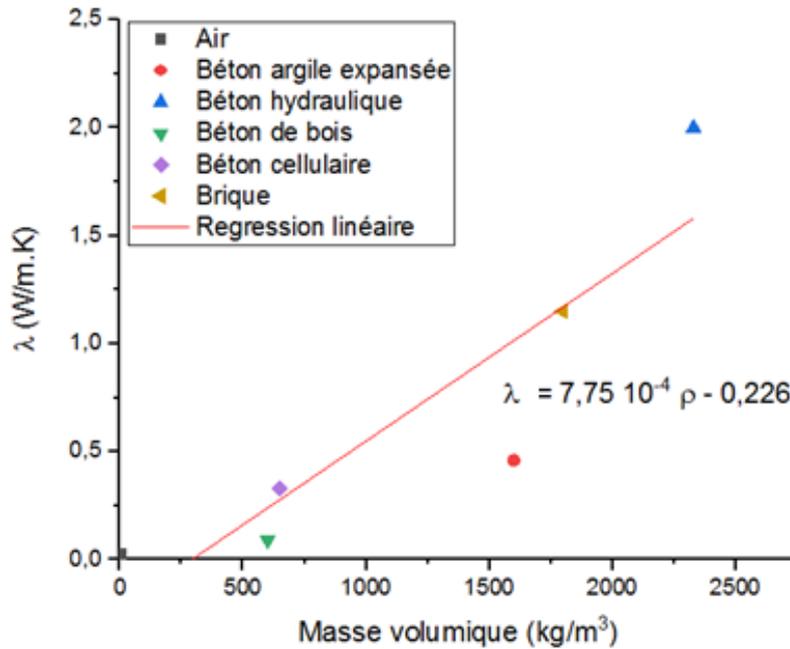


Figure I-15 : Évolution de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique.

Nous pouvons constater qu'un béton cellulaire a une porosité élevée et une conductivité thermique plus faible par rapport à un béton de bois. Ce béton présente une diffusivité thermique plus importante. Un juste équilibre entre ces trois caractéristiques thermiques doit donc être déterminé en fonction des conditions d'emploi du matériau. Une relation quasi-linéaire s'établit entre la masse volumique et la conductivité thermique (figure I-15).

La conductivité thermique dépend de la porosité des bétons (figure I-16). Un béton a une meilleure conductivité thermique lorsqu'il est plus poreux.

Les granulats légers peuvent donc apporter des avantages significatifs par rapport aux granulats classiques, rigides, notamment en termes d'allègement des structures et d'efficacité énergétique. Les granulats légers peuvent également s'inscrire dans une démarche environnementale vertueuse grâce à la préservation des ressources naturelles. Pour ce faire, nous préconisons ici la valorisation de certains de nos déchets pour la production de granulats légers. Outre la substitution aux granulats nobles, cette approche engendrera également une réduction nécessaire de nos flux de déchets.

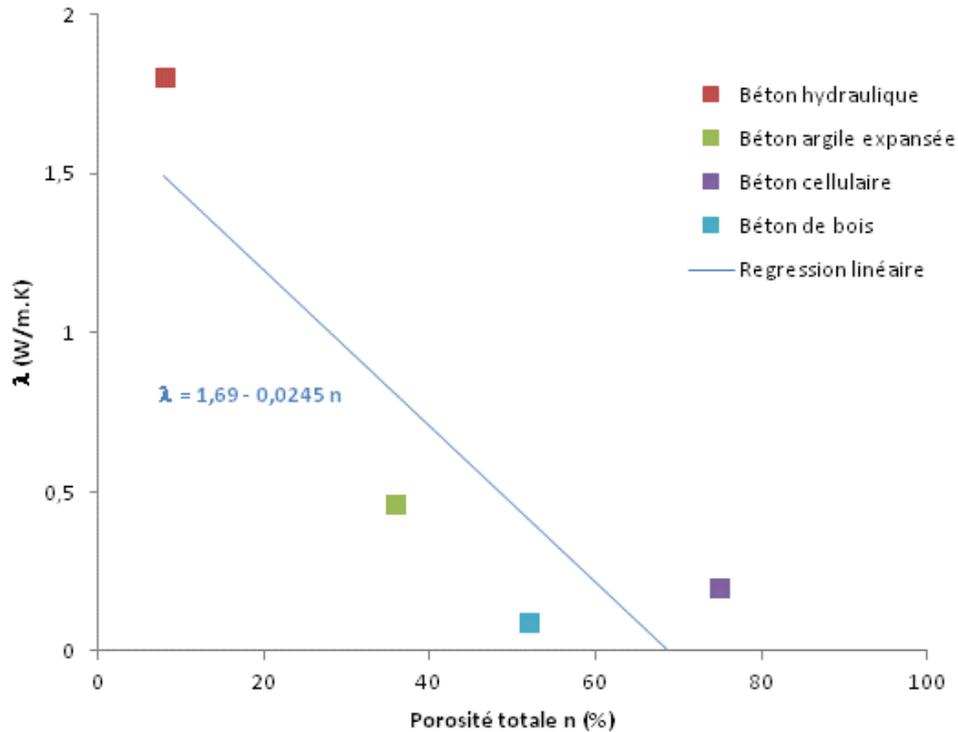


Figure I-16 : Évolution de la conductivité thermique en fonction de la porosité.

IV. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une synthèse bibliographique de la provenance des granulats légers, leurs caractéristiques multi-physiques (avec leurs avantages et leurs inconvénients) ainsi que de leurs utilisations potentielles pour entrer dans la composition d'un béton hydraulique. En effet, ces matériaux présentent de nombreux avantages tels que la réduction de la masse des constructions (et donc un gain sur les dimensions de la superstructure et, par conséquent, sur les fondations) et l'amélioration des performances thermiques (et donc une réduction de la facture énergétique). L'analyse de la littérature a mis en évidence l'influence de ces granulats légers sur le comportement des bétons légers contrairement aux granulats ordinaires, avec des caractéristiques majoritairement guidées par la porosité et/ou la masse volumique des granulats. En effet, des relations linéaires avec la conductivité thermique, le module d'élasticité ou encore la résistance mécanique ont été mises en exergue.

CHAPITRE II.

CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL

I. Introduction

Comme nos granulats sont fabriqués à base de déchets d'incinérateurs, ce deuxième chapitre sera consacré à l'impact environnement vertueux lié à l'utilisation de ces éco-granulats, qui présentent un bilan carbone négatif. Des politiques volontaires doivent néanmoins participer activement à la gestion de ces déchets par le truchement de l'évolution des réglementations, des normes ou des décrets régissant les (ré-) utilisations possibles des déchets en France et en Tunisie. Nous étudierons la valorisation des déchets pour une utilisation dans les matériaux de construction qui a fait l'objet de nombreux travaux et débats publics. Enfin, le processus de fabrication des granulats de notre étude sera détaillé afin de comprendre la provenance de ces granulats et les avantages liés à leur emploi.

II. Gestion des déchets

Cette partie porte sur la gestion et la réglementation des déchets. L'objectif est de présenter les textes cadres qui régissent la gestion des déchets notamment en France ainsi qu'en Tunisie. Après s'être intéressé à ces cadres, on terminera par une partie détaillant la possibilité de valorisation des déchets dans les matériaux de construction et les différents travaux étudiés sur ce sujet.

1. Législation des déchets

1.1. En France

La législation sur les déchets est évolutive, du fait que la problématique des déchets touche presque toutes les activités humaines. Le ministère de l'écologie et du développement durable est responsable de la gestion des déchets. A l'échelle locale, c'est la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) qui pilote les politiques de développement durable. Également, l'agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable et offre son expertise aux entreprises, aux organismes de recherche et aux collectivités locales (**Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, 2015**).

Avant l'année 1975, les déchets étaient considérés comme des objets devenus inutiles et abandonnés. Depuis, le déchet dispose d'un statut juridique qui lui est spécifique. Le statut de déchet a été défini, en France, par la loi du 15 juillet 1975 (transposition de la Directive 75/442/CEE). Il est défini comme étant un "produit que le détenteur destine à l'abandon". En France, la responsabilité de la gestion des déchets repose sur ceux qui les produisent : c'est le principe de pollueur-payeur. L'État fixe la politique et le cadre réglementaire, avec comme priorités la prévention, la valorisation, et la réduction des impacts environnementaux et sanitaires. La loi du 13 juillet 1992 vient compléter ce cadre juridique au niveau des modes de gestion des déchets. Les principaux objectifs sont donc les suivants : limiter la production de déchets à la source, gérer les déchets au plus près possible de leur lieu de production et les valoriser sous forme de matière (recyclage) ou d'énergie.

L'article 1 de la loi n°92-101 du 13 juillet 1992 introduit également la notion de "déchet ultime", défini comme "un déchet résultant ou non du traitement d'un déchet qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment,

notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux". L'arrêté du 18 décembre 1992, relatif au stockage des déchets industriels spéciaux ultimes, précise dans son annexe I les conditions techniques auxquelles doivent satisfaire les déchets pour être admis en centres de stockage : pH, siccité, teneur en métaux lourds etc. . Selon cet arrêté, les déchets issus des processus d'incinération : les Résidus d'Épuration des Fumées de l'Incinération des Ordures Ménagères (REFIOM), les cendres, les mâchefers non valorisables, font partis de la catégorie de déchets ultimes résultant d'un traitement des déchets, ce qui implique une stabilisation obligatoire avant stockage. De plus, la loi du 13 juillet 1992 établit que les déchets ultimes doivent être stockés en Centres de Stockage des Déchets ou des Résidus Ultimes (CSDU ou CSRU) dans des conditions très strictes et, qu'à compter du 1er juillet 2002, seuls les déchets ultimes sont acceptés dans les installations de stockage (mise en décharge).

La Directive Européenne de 2008 (2008/98/CE) ou directive-cadre sur les déchets, précise la définition du déchet qui devient, en droit français (Article L 541.1.1 du code l'environnement) : "toute substance ou tout objet, ou plus généralement tout bien meuble, dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire". La nécessité d'adapter la loi au cas des matières recyclables et, plus généralement au développement du recyclage en Europe, a engendré l'introduction inédite du principe de sortie du statut de déchet ("end of waste") dans la directive-cadre européenne de 2008. Cette directive-cadre sur les déchets fixe les 4 conditions qui permettront à un déchet de "cesser d'être un déchet" (article 6) :

- La substance ou l'objet est couramment utilisé à des fins spécifiques ;
- Il existe un marché ou une demande pour une telle substance ou un tel objet ;
- La substance ou l'objet remplit les exigences techniques aux fins spécifiques et respecte la législation et les normes applicables aux produits ;
- Son utilisation n'aura pas d'effets globaux nocifs pour l'environnement ou la santé humaine.

La directive Européenne prévoit la possibilité pour chaque pays membre, de décider de la sortie du statut de déchet pour les déchets non pris en compte par un règlement européen. En France, le décret n°2012-602 du 30 avril 2012 définit la procédure nationale de sortie du statut de déchet et crée une "commission consultative sur le statut de déchet" (**Actu-environnement, 2016**). Aujourd'hui ce sont uniquement les ferrailles, l'acier, l'aluminium et le verre qui sont soumis à une procédure de sortie du déchet bien définie.

La directive-cadre de 2008 sur les déchets, impose également une hiérarchisation des modes de gestion des déchets. La priorité doit être accordée à la prévention, puis, par ordre décroissant : à la préparation en vue du réemploi, au recyclage, à une autre valorisation (notamment énergétique), et enfin à l'élimination sans valorisation quand, pour des raisons techniques ou économiques, les priorités précédentes ne peuvent pas être appliquées.

Selon le catalogue européen des déchets, Pour classer un déchet comme dangereux, une seule réponse positive à un des 14 critères est suffisant. A l'inverse pour déclasser un déchet dangereux, il faut obtenir des réponses négatives aux 14 critères de dangerosité. Ces 14 critères sont de quatre types (Méhu, et al., 2004) :

- H₁ à H₃ = dangers physiques ;
- H₄ à H₁₂ = dangers pour la santé humaine ;
- H₁₃ = danger suite à l'élimination du déchet ;
- H₁₄ = écotoxicité, danger pour l'environnement.

Une particularité de cette liste européenne des déchets est la notion « d'entrée miroir ». Une entrée miroir est une double entrée pour un même déchet, l'un revêtant un caractère dangereux et l'autre un caractère non dangereux (Méhu, et al., 2004).

Le stockage est l'opération d'élimination ultime des déchets. Il concerne la fraction des déchets qui ne peut pas être valorisée par réemploi ou recyclage dans des conditions techniques et économiques du moment. L'appréciation du caractère ultime des déchets est opérée au niveau des collectivités territoriales (préfet, conseil général) (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, 2015).

Les déchets résiduels correspondent aux déchets ménagers ou industriels pour lesquels il n'existe pas, ou pas encore, de filière de valorisation. Ils sont traités dans des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) : les Installations de Stockage des Déchets (ISD). Anciennement dénommés décharge ou CET (Centre d'Enfouissement Technique), les Installations de Stockage de Déchets (ou Centres de Stockage des Déchets (CSD) sont de trois types :

- **Classe1 : Installations de stockage des déchets dangereux (ISDD)**

Les déchets industriels dangereux doivent être stockés sous certaines conditions pour éviter que les polluants qu'ils contiennent se répandent dans l'environnement. Seuls les déchets qui respectent les limites de lixiviation imposées par la directive européenne (Directive n°1999/31/CE du 26/04/99) et la décision du conseil 2003/33 sont admissibles en centre de stockage. Les installations de stockage de déchets dangereux sont réglementées par l'arrêté du

30 Décembre 2002 qui transpose la directive 1999/31/CE du 26 Avril 1999 dans le cas des déchets dangereux.

- **Classe2 : Installations de stockage des déchets non dangereux (ISDND)**

Elles sont réglementées par l'arrêté ministériel du 9 Septembre 1997 modifié en dernier lieu par l'arrêté ministériel du 18 Juillet 2007 (**Ministère de l'écologie du développement durable et de l'énergie, 2015**). Les décharges de déchets non dangereux sont disposées sur des sites qui présentent une barrière de sécurité passive aux caractéristiques d'étanchéité inférieures à celles des décharges de déchets dangereux

- **Classe3 : Installations de stockage des déchets inertes (ISDI)**

Elles sont réglementées par l'arrêté du 28 Octobre 2010. La procédure d'admission de ces déchets dans une installation de stockage st basée sur différents niveaux de vérification. Tout d'abord, il s'agit de réaliser une vérification de base sur tous les déchets entrants, puis une vérification de la conformité afin de déterminer si le déchet est conforme aux résultats de la caractérisation de base et aux critères appropriés d'admission et enfin une vérification sur place.

1.2. En Tunisie

La quantité de déchets ménagers et assimilés produite annuellement est estimée à 2,2 million de tonnes pour l'année 2007 et environ 53000 tonnes d'emballage, selon des études réalisées à ce sujet. Il en ressort aussi que les déchets ménagers se caractérisent par un taux élevé de matières organiques (68%) et par un taux élevé d'humidité variant entre 65% et 70% (**Agence Nationale de Gestion des Déchets, 2016**).

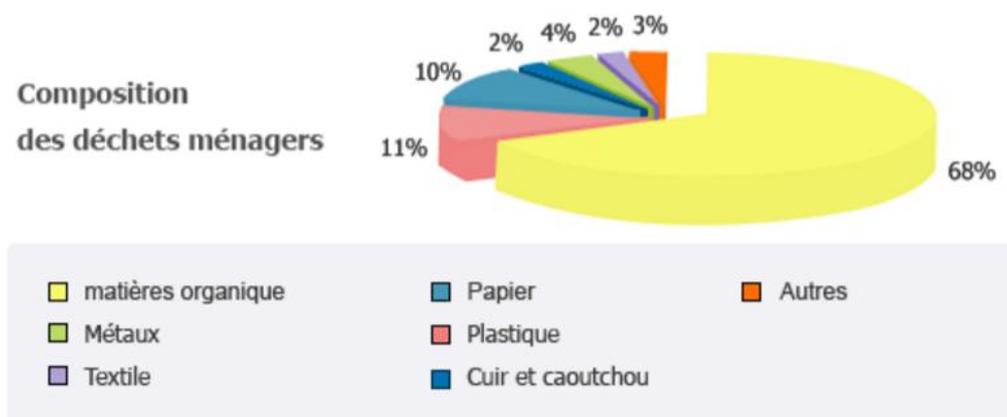


Figure II-1 : Composition des déchets ménagers en Tunisie (Agence Nationale de Gestion des Déchets, 2016).

La Tunisie a connu, ces dernières années, un développement économique qui a conduit à l'évolution des quantités de déchets industriels et spéciaux (DIS) selon les résultats des études réalisées en la matière. Les quantités de déchets provenant des activités industrielles des différents secteurs sont estimées à 150000 tonnes par an environ (hormis le phosphogypse et les déchets des mines). La distribution des DIS selon les secteurs industriels est la suivante (figure II-2) :

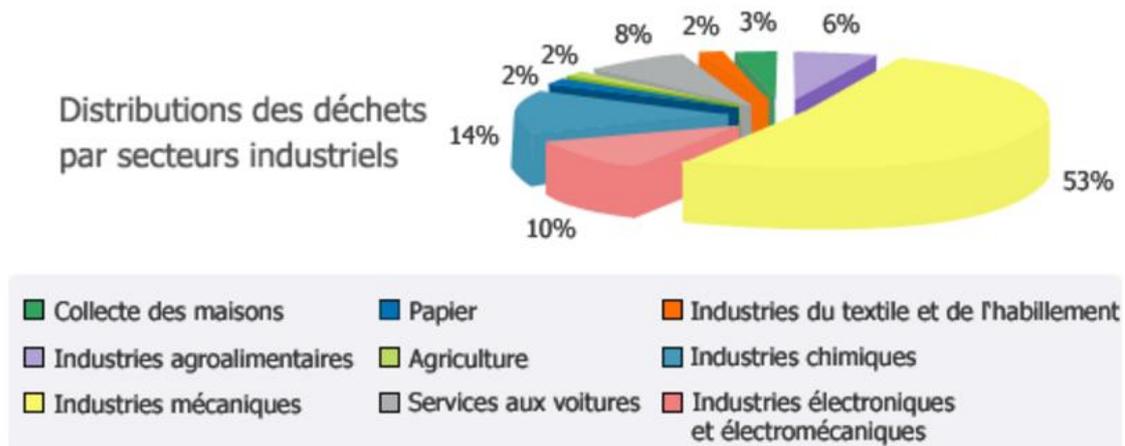


Figure II-2 : Distribution des déchets par secteurs industriels en Tunisie (Agence Nationale de Gestion des Déchets, 2016).

Les quantités de déchets de construction et de démolition sont distribuées sur le grand Tunis comme l'indique la figure II-3 :

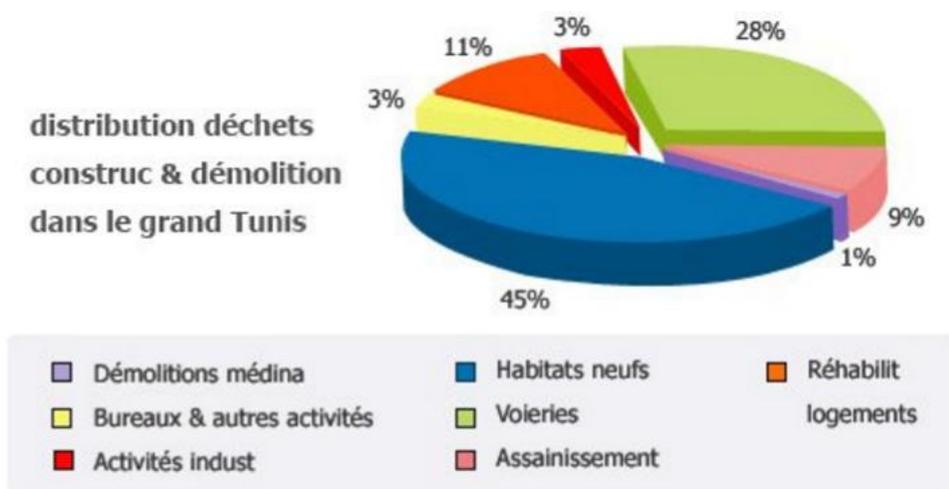


Figure II-3 : Distribution des déchets de construction et de démolition dans le grand Tunis (Agence Nationale de Gestion des Déchets, 2016).

La Tunisie a opté pour une politique globale et évolutive de protection de l'environnement en vue de faire face à l'état actuel de l'environnement affecté par la croissance économique importante et l'expansion urbaine rapide des dernières années. Cette politique s'est développée en stratégie intégrale et intégrée se basant sur les processus de développement durable tout en imprégnant cette orientation dans les stratégies sectorielles du développement socio-économique de façon à relever les défis de protection de l'environnement. Dans ce cadre, une stratégie nationale a été arrêtée axée essentiellement sur la préservation des ressources naturelles et la rationalisation de son utilisation en plus de la lutte contre les diverses formes de pollution et les effets négatifs, ainsi que la promotion du cadre de vie du citoyen. Le secteur de la gestion des déchets a bénéficié d'une attention particulière ces dernières années au vu de l'évolution des quantités produites de la multiplicité, des formes et des aspects de la pollution générée par les déchets, et des moyens limités utilisés dans le domaine de gestion des déchets solides. Et, en vertu des clauses de la Loi fondamentale sur les communes, le secteur a observé une évolution sensible reflétée depuis le début des années 1990 par la mise en œuvre du Programme National de Gestion des Déchets. Cette évolution a été suivie par une loi-cadre sur la gestion des déchets en 1996, et, enfin la création de l'Agence Nationale de Gestion des Déchets en 2005.

Le Ministère Tunisien de l'Environnement et du développement durable intervient principalement au niveau de l'élaboration de la politique générale en matière de protection de l'environnement et la rationalisation de l'exploitation des ressources naturelles ainsi que du cadre réglementaire et normatif de la gestion des déchets ainsi que de la sensibilisation adressée au grand public. Il assure la tutelle de l'ANGed qui a mis en œuvre le Programme National de Gestion des Déchets Solides (PRONAGDES) ainsi que la tutelle de l'Agence Nationale de Protection de l'Environnement (ANPE) qui est responsable du contrôle et de la surveillance en matière de protection de l'environnement.

LE PRONAGDES est une stratégie nationale qui s'appuie sur les principes suivants :

- La réduction à la source de la production des déchets en intervenant sur les procédés de fabrication, sur la distribution des produits et sur les modes de consommation ;
- La limitation ou traitement de la fraction polluante ou du caractère dangereux des déchets non valorisés avant leur stockage définitif ;
- L'organisation du transport des déchets et sa limitation en distance et en volume ;
- La valorisation des déchets par réemploi, réutilisation, recyclage ou toute autre action visant à obtenir à partir de ces déchets, des matières premières secondaires ou de l'énergie ;

- La limitation de l'enfouissement aux déchets ultimes ;
- L'information du public sur les conséquences sur l'environnement et la santé de la production et de l'élimination des déchets.

Ce programme a permis de trouver des solutions aux problèmes et aux effets négatifs sur l'environnement en remplaçant les décharges anarchiques par des décharges contrôlées appuyées par des centres de transfert conformes aux normes environnementales, hygiéniques et techniques.

En Tunisie, deux types de cadres légaux réglementent et organisent la gestion des déchets :

- Un cadre général qui régleme globalement le secteur indépendamment de la nature des déchets ;
- Des cadres particuliers à des types de déchets spécifiques.

Selon la loi du 10 juin 1996 un déchet est toute substance et objet dont le détenteur se défait ou a l'intention de s'en défaire ou dont il a l'obligation de se défaire ou d'éliminer.

Cette loi confie la responsabilité de l'élimination au producteur ou détenteur du déchet, organise le contrôle des circuits d'élimination, impose une obligation de reprise et fixe les modalités de traitement. La réglementation interdit un certain nombre de pratiques :

- L'abandon, la décharge sauvage,
- Le brûlage en plein air, dans des chaudières à bois, etc.
- L'évacuation des déchets dangereux par le biais du réseau d'assainissement,
- Le mélange des déchets de différentes catégories (DD / DIB / DI),
- La mise en décharge des déchets ultimes.

2. Valorisation des déchets dans les matériaux de construction

Les déchets et les sous-produits de l'industrie constituent un réel problème environnemental, et justifie donc la recherche de solutions alternatives. Notre étude a pour ambition d'apporter une réelle alternative à la gestion des déchets potentiellement toxiques pour l'homme et l'environnement du fait de la présence d'éléments organiques et des métaux lourds. L'objectif de notre étude est la valorisation de ces déchets et du CO₂ pour la production des granulats utilisables pour la confection du béton. Cette valorisation est dans le but d'une utilisation dans le secteur de Génie Civil et de bâtiment afin de préserver les ressources naturelles rares.

L'utilisation des déchets dans une économie circulaire vertueuse pour la société est une question d'actualité posée depuis longtemps dans certains pays. Le recyclage s'inscrit dans la stratégie de traitement des déchets dite des 3R :

- Réduire, qui regroupe tout ce qui concerne la réduction de la production de déchets ;
- Réutiliser, qui regroupe les procédés permettant de donner à un produit usagé un nouvel usage ;
- Recycler, qui désigne le procédé de traitement des déchets par recyclage.

La récupération des déchets touche deux impacts très importants : l'impact environnemental et l'impact économique. La réutilisation de différents types de déchets qui posent des problèmes environnementaux, a fait l'objet de nombreux travaux. Parmi ceux-ci, nous pouvons citer l'utilisation des copeaux de bois, des déchets plastiques, des déchets industriels, des déchets de démolition et de chantier etc.

Les déchets de construction et de démolition représentent un tiers des déchets générés dans l'Union Européenne, soit environ 1t/hab./an. D'autre part, en 2005, la production de matériaux recyclés sous forme de granulats représentait 6% de la production totale de granulats utilisés dans le BTP. Le principe de recyclage se met cependant petit à petit en place. Le traitement des déchets de démolition représente aujourd'hui une vraie industrie, mais dont le profit dépend fortement de l'environnement technique, économique, géologique et politique de la zone dans laquelle elle opère. Le secteur de bâtiment est la plus importante source de production de déchets (340 Mt/an). Les déchets du BTP s'élèvent de 254 Mt en 2008 à 340 Mt en 2012. Une grande partie des déchets inertes est valorisée comme matériaux de construction de Travaux Publics (remblais, assises de chaussées, etc.), ou bien dans le cadre de réaménagement de carrières disposant d'une autorisation d'exploiter. On trouve cependant des applications plus nobles pour certains de ces déchets, par exemple les bétons de démolition sont recyclés sous forme de granulats, à hauteur de 15 Mt en 2008. Le recyclage et la valorisation des déchets sont aujourd'hui considérés comme une solution d'avenir afin de répondre au déficit entre production et consommation et de protéger l'environnement. Au niveau environnemental, le recyclage complet du béton contribue à minimiser l'impact CO₂.

Les travaux menés sur les matériaux de démolition en tant que granulats de substitution les considèrent comme étant des granulats hors normes. Ils ont des conséquences néfastes sur la durabilité des bétons puisqu'ils absorbent une bonne quantité d'eau (**Gottfredsen, et al., 1993**) (**Wirquin, et al., 2000**) (**Tu, et al., 2006**). Cette absorption d'eau est due à une forte

porosité en raison de l'ancien mortier collé au sein des granulats de démolition (**Berredjem, et al., 2009**).

L. Berredjem et N. Arrabi (**Berredjem, et al., 2009**) ainsi que (**De Juan, et al., 2009**) (**Douara, 2009**) (**Padmini, et al., 2009**) ont étudiés des bétons à base de granulats recyclés. Ces bétons présentent une absorption d'eau importante, comme souligné dans la littérature et qui risque d'affecter la rhéologie du béton frais. Les alvéoles de l'ancien mortier collé aux granulats sont à l'origine de l'absorption d'eau, ils captent l'eau et la retiennent. Ce besoin en eau peut être aussi lié à la granulométrie du sable. Ces bétons ont des résistances mécaniques à 28 jours supérieurs à 20 MPa mais présentent un comportement élasto-plastique dégradé. Les granulats recyclés de béton diffèrent des granulats naturels par leur composition. En effet, le granulat recyclé de béton est un matériau composite constitué de :

- Granulats naturels concassés partiellement ;
- Pâte de ciment hydraté concassée enrobant les granulas naturels.

Marta Sanchez de Juan a aussi étudié l'incorporation des granulats recyclés au béton (**De Juan, et al., 2009**). Les granulats recyclés de béton sont composés de granulats naturels et du mortier de ciment qui l'enrobe. Les densités apparentes de ces granulats varient entre 2010 et 2300 kg/m³. L'absorption d'eau des granulats recyclés varie de 5 à 11 %. Cette absorption dépend du pourcentage du mortier attaché aux granulats. Si ce dernier augmente l'absorption augmente.

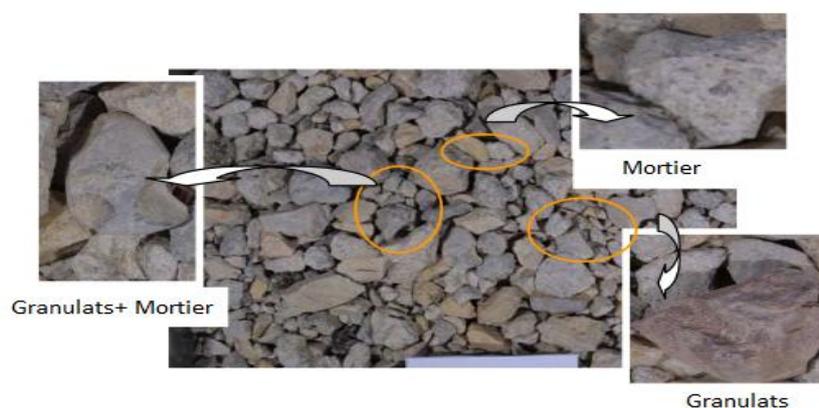


Figure II-4 : Composition des granulats recyclés de béton (De Juan, et al., 2009).

Gómez-Soberón a travaillé sur la porosité du béton recyclé avec substitution des granulats de béton recyclé (**Gómez-Soberón, 2002**). Les granulats recyclés étudiés ici sont plus légers que les granulats naturels mais ayant des masses volumiques supérieures à 2000 kg/m³. La

porosité totale atteint les 15 %. Les bétons recyclés sont considérés comme des bétons poreux ayant des valeurs de porosités deux fois plus importantes que celle d'un béton classique. La quantité d'eau absorbée par les granulats recyclés était prise en compte séparément, en sus de son humidité avant mélange et de l'eau libre qui faisait partie du mélange. L'absorption d'eau des granulats recyclés atteint presque les 10%.

Sandrine Braymand (**Braymand, et al., 2014**) a aussi travaillé sur les granulats provenant des matériaux de démolition (béton) concassés. Lors de la fabrication des bétons, un superplastifiant de type polymérique a été utilisé pour le béton mixte (0.75%) et recyclé (3%) afin d'augmenter la maniabilité du mélange et d'obtenir des valeurs similaires d'affaissement pour se trouver dans des conditions de mises en œuvre comparables. Les trois bétons étudiés (béton recyclé, béton mixte et béton classique) présentent des propriétés mécaniques similaires sur la base des compositions choisies. Les résultats de détermination des propriétés physiques indiquent que le béton recyclé (BR) semble posséder de meilleures propriétés thermiques (λ) que le béton de granulat naturel (BC) ce qui est corrélé à une porosité mesurée plus élevée (17% contre 14%).

Samy Antit (**Antit, et al., 2012**) a utilisé dans la formulation de ses bétons des déchets de construction et de démolition. L'étude expérimentale a montré que ces bétons peuvent remplacer le béton traditionnel mais avec une chute de résistance de 15 à 25%. Il a établi une comparaison de chute de résistance des bétons de déchets de construction en fonction du pourcentage des déchets utilisé et ce pour des travaux de différents auteurs. Selon la littérature, l'utilisation des déchets de construction et de démolition participe à la chute de résistance des bétons.

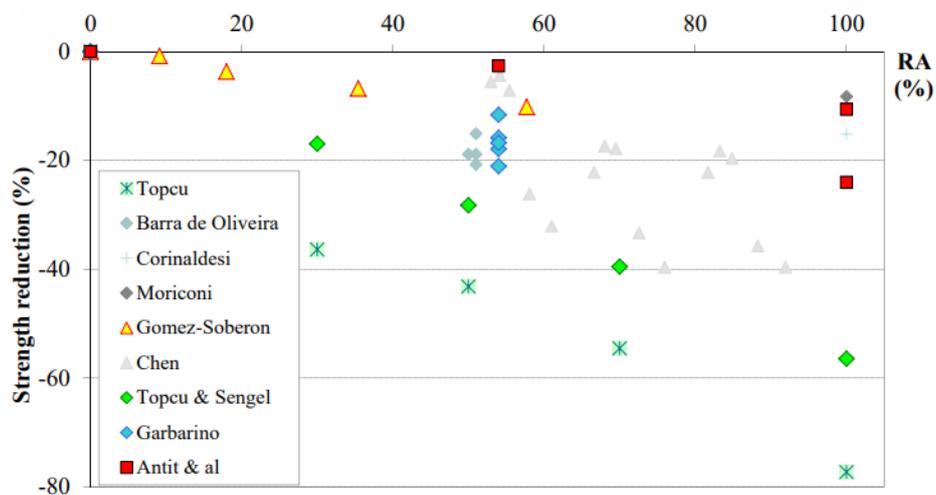


Figure II-5 : chute de résistance des bétons de granulats recyclés (Antit, et al., 2012).

À part les déchets de construction et de démolition, plusieurs auteurs ont utilisés les déchets industriels comme granulats à introduire dans le béton. Les travaux de J.E. Aubert (**Aubert, 2003**) sont orientés vers l'incorporation des déchets dans les bétons. Les déchets sont des cendres volantes d'incinérateurs d'ordures ménagères traités. Ces déchets sont poreux et cette porosité pourra avoir des conséquences importantes sur les bétons à cause de l'eau absorbée par les particules qui ne sera plus disponible pour la rhéologie du béton (hydratation). L'ajout des cendres a un effet positif sur les résistances mécaniques des bétons.

Adegoloye, quant-à-lui, a travaillé sur la valorisation des laitiers issus de l'élaboration d'aciers inoxydables dans le béton (**Adegoloye, 2014**). Ces granulats ont des densités plus élevées que celles des granulats silico-calcaire : 2.8 contre 2.5. Cependant, ces granulats absorbent plus d'eau que les granulats traditionnels mais la quantité d'eau absorbée reste une faible, ne dépassant pas les 3%. Cela est dû à la surface rugueuse des granulats et de leur aspect caverneux. Ces granulats sont donc plus denses que les granulats silico-calcaire mais toutefois ils sont plus poreux (**Adegoloye, 2014**). Cela pourrait s'expliquer par la présence d'oxydes métallique dans la phase solide des granulats et aux alvéoles présents sur la surface des granulats.

D. Bajare et al. (**BAJARE, et al., 2014**) ont étudié le béton léger à base de granulats produits à partir des déchets industriels. La composition chimique de l'argile à haute teneur en carbonates et des produits non métallique des usines de recyclage des déchets d'aluminium notés NMP a été déterminée selon la norme EN 196-2. L'argile est mélangée avec la NMP dans des proportions différentes pour former des granulats notés LA et LB qui sont comparés à des produits commercialisés. La masse volumique des granulats produits est inférieure 1000 kg/m³. La différence entre les granulats est observée à travers la résistance à l'écrasement. Plus la densité est élevée plus la résistance de ces bétons augmente. Ces granulats sont très absorbants, pouvant atteindre les 20%. Les bétons à base de ces granulats ont des résistances à la compression à 28 jours supérieurs à 20 MPa pour des masses volumiques inférieures à 2000 kg/m³. La conductivité thermique varie entre 0.3 et 0.33 W/m.K soit environ six fois plus faible que celle d'un béton ordinaire. Ce qui pourra être intéressant pour leurs utilisations dans la construction.

Tennich et al. (**Tennich, et al., 2015**) ont travaillé sur l'effet des déchets de marbre et de carrelage sur les propriétés de béton et montrent des bonnes résistances mécaniques supérieures à celle d'un béton ordinaire. Ces bétons sont faiblement poreux et absorbent peu l'eau ce qui leurs confère un caractère durable et leurs attribuent une bonne résistance mécanique en les carbonatant par du CO₂.

3. Procédé de carbonatation accélérée

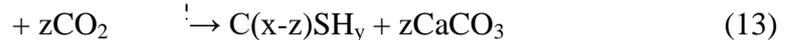
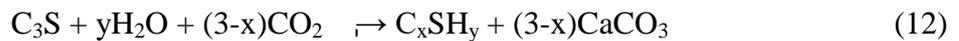
Les granulats de notre projet sont produits par une nouvelle méthode de carbonatation accélérée breveté par Carbon8 System, une entité de l'Université de Greenwich (**Hills, et al., 2009**) (**Gunning, et al., 2009**). Le procès de carbonatation accélérée peut être appliqué aux résidus thermiques riches en calcium et magnésium comme par exemple les cendres d'incinérateurs de papiers, de cendres de biomasse etc. La carbonatation est une réaction naturelle très lente de combinaison avec le dioxyde de carbone en milieu humide. Elle se réalise en exposant des déchets à une concentration élevée en CO₂ dans un environnement contrôlé. Le dioxyde de carbone se transforme en acide carbonique :



Par la suite, l'acide carbonique réagi avec la chaux de manière à former de la pierre calcaire :



Dans le cas de la carbonatation de matrice de type cimentaire, les silicates de calcium C₃S et C₂S vont interagir avec le dioxyde de carbone et l'eau en raison de leur caractère hydraulique. La réaction va produire des carbonates de calcium CaCO₃ qui cristallisent en calcite, polymorphe stable en conditions normales et des silicates de calcium hydraté CSH, composés non cristallins.



L'enchevêtrement du gel C_xSH_y apporte la solidité des granulats et participe à leur inertage, assurant ainsi la stabilité chimique des granulats : les CSH se développent à la surface des grains et comblent progressivement les interstices capillaires.

Les déchets préalablement séchés à l'étuve sont humidifiés avec 10% d'eau et carbonatés dans une atmosphère riche en dioxyde de carbone (100%) à une pression maintenue constante pendant 24h à 2 bars. Le phénomène est répété jusqu'à ce que les déchets soient complètement carbonatés c'est-à-dire quand la masse devient constante entre 800°C et 950°C. Les déchets qui ont des réactions significatives avec le CO₂ sont définis comme étant ceux qui ont absorbés 5% ou plus de leurs masses sèches en CO₂. Les matériaux ont le pouvoir de s'auto-coller et se lier aux fines de carrières en produisant des granulats. Les fines de carrières

ont été mélangés aux déchets et en ajoutant le ciment portland comme liant, à des pourcentages de 10, 20, 30, 40 et 50% de la masse sèche. Ensuite l'eau est ajouté à ces matériaux jusqu'à l'obtention d'une pâte de consistance ferme.

La quantité de CO₂ résultant du traitement par carbonatation accélérée a été calculée comme la différence entre les déchets non-traités et les déchets carbonatés.

La teneur en carbonates des déchets non-traités et des déchets carbonatés est calculée selon la formule suivante.

$$CaCO_3(\%) = \frac{Masse_{800^\circ C} - Masse_{950^\circ C}}{Masse_{105^\circ C}} \times 100 \quad (14)$$

Les déchets ont été caractérisés et sont principalement composés de calcium, silicium, fer et aluminium.

La carbonatation présente de nombreux avantages tels que l'agglomération des particules pour la formation de granulats solides (le durcissement de la matrice permet d'obtenir des matériaux finis résistants) et la stabilisation physique (des polluants) et chimique (formation de carbonates métalliques insolubles et diminution du pH). Pour toutes ces raisons, la valorisation des déchets issus de traitements thermiques (riches en CaO) est particulièrement adaptée au procédé de carbonatation. À l'aune de ce constat, l'Université de Greenwich a développé un procédé simple et rapide de carbonatation accélérée (ACT) (**Gunning, et al., 2010**)(**Antemir, et al., 2011**) qui permet de faire réagir les minéraux de résidus thermiques avec du CO₂. La précipitation des carbonates (calcaire) engendre une fixation permanente du CO₂ et la formation de granulats inertes. Ce procédé vise à carbonater des déchets d'incinérateur dans une atmosphère enrichie en dioxyde de carbone afin de générer des granulats. Après leur acheminement et leur stockage au centre de production, les déchets sont prétraités par carbonatation puis mélangés à des réactifs (ciment, sable et eau) pour former une pâte liante. Les matériaux sont ensuite carbonatés dans un réacteur tournant formant ainsi des granulats légers à bilan carbone négatif. Le CO₂ se transforme en acide carbonique qui va alors pouvoir initier des réactions avec des composés de type hydroxyde de calcium (portlandite ou chaux éteinte) pour former des carbonates de calcium (**Gunning, et al., 2011**) (**Bertos, et al., 2004**)(**Bertos, et al., 2004**) (figure II-6).

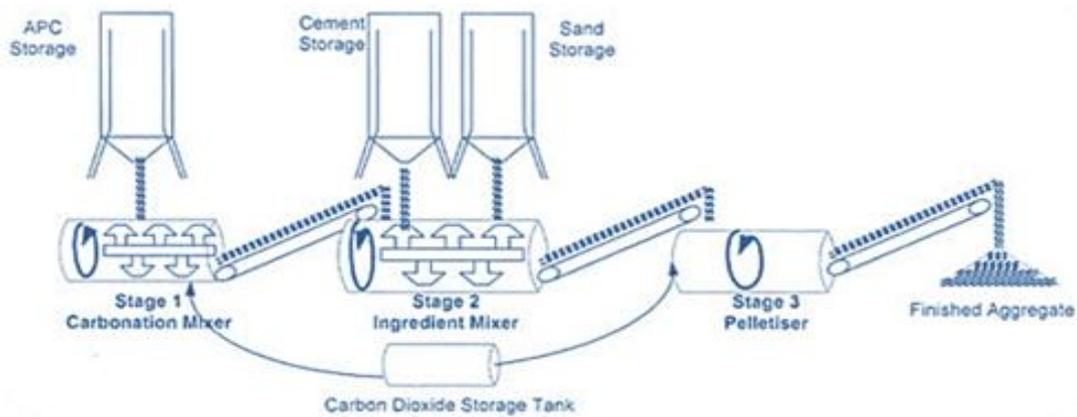


Figure II-6 : Procédé de carbonatation accélérée.

Une première ligne industrielle de production de granulats carbonatés a vu le jour en février 2012 au Royaume-Uni et, au vue des résultats d'exploitation, elle a été complétée par une seconde ligne, technologiquement plus aboutie, en 2014. Au total, ces deux lignes de production permettent de traiter plus de 30 000 tonnes de cendres par an afin de fabriquer 65 000 tonnes de granulats éco-responsables.



Figure II-7 : Centre de production des granulats au Royaume Uni.

III. Conclusion

Afin de réduire notre impact environnemental, des granulats issus de la valorisation des cendres d'incinérateurs, produits par carbonatation accélérée, peuvent être considérés comme granulats à utiliser dans la confection des bétons. En effet, l'emploi de ces granulats

permettrait de réduire également les quantités de déchets ultimes produits dans les centres d'incinérations et envoyés dans les centres d'enfouissement, voire de valoriser nos émissions de CO₂ pour limiter les rejets dans l'atmosphère. Afin d'envisager une commercialisation de ces produits issus de la technologie de carbonatation accélérée, de nombreux verrous devront néanmoins être levés pour sortir du statut de déchets ultimes, actuellement accordés à ces matériaux par les textes cadres européens et français. Il demeure donc intéressant de produire des bétons à base de déchets et de sous-produits industriels afin de réduire les quantités énormes et de préserver les ressources naturelles en granulats. De ce fait, des matériaux légers sont produits à partir de déchets et de sous-produits industriels par carbonatation accélérée. Une large campagne expérimentale a été menée afin de valoriser ces matériaux.

Cette synthèse bibliographique a montré que les matériaux légers présentent plusieurs avantages, notamment l'amélioration des performances thermiques de l'enveloppe des bâtiments et l'allègement des structures. Les granulats légers influent sur le comportement rhéologique et physique des bétons légers compte tenu de leur forte capacité d'absorption d'eau, leur porosité élevée et leur masse volumique plus faibles que les bétons à base de granulats ordinaires.

Les granulats légers utilisés dans le cadre de ce projet de recherche sont transformés à partir d'un procédé breveté de carbonatation accélérée de cendres d'incinérateur, combinées à du CO₂. Ce procédé permet d'obtenir des granulats présentant un bilan carbone négatif en raison de sa capacité à stocker du CO₂. Par ailleurs, de nos jours, la valorisation des déchets et des sous-produits de l'industrie est une bonne alternative pour réduire notre impact environnemental et limiter nos dépenses de ressources non renouvelables, tels que les granulats concassés. Cela permettrait également de réduire les quantités énormes de déchets envoyés aux centres d'enfouissement.

PARTIE II.

**POTENTIEL D'UTILISATION DES
GRANULATS CARBONATES DANS LA
COMPOSITION D'UN BETON**

L'emploi des granulats carbonatés permet de réduire les quantités des déchets ainsi que de valoriser nos émissions de CO₂ afin de limiter nos impacts sur l'environnement lors de l'acte de construire. Au cours de ce travail, les granulats produits à base de déchets et de sous-produits de l'industrie sont utilisés afin de produire des bétons écologiques. Dans cette partie, nous allons étudier le potentiel d'utilisation de ces granulats dans la composition des bétons. Dans un premier temps, une large campagne expérimentale est réalisée afin de déterminer les caractéristiques physiques, thermiques et mécaniques de ces granulats. Cette caractérisation est mise en place afin de comparer le potentiel de remplacement de ces granulats carbonatés par rapport aux granulats ordinaires, notamment les gravillons concassés. Dans un second temps et à l'aune des résultats exploités au cours du premier chapitre, différentes formulations de base à base des granulats sont étudiées et leurs propriétés physiques à l'état frais et durci sont présentés. Une méthodologie de formulation des bétons à base d'éco-granulats sera ainsi proposée.

CHAPITRE III.

CARACTERISATION EXPERIMENTALE DES GRANULATS CARBONATES

I. Introduction

Les propriétés du béton sont largement influencées par les caractéristiques de ses constituants. De ce fait, afin de développer la filière de la valorisation des éco-matériaux à base de déchets, nous avons procédé à des essais de caractérisation multi-physique de ces granulats. Après avoir présenté le procédé de fabrication des éco-granulats obtenus par carbonatation accélérée, ce chapitre s'articulera autour d'une large campagne expérimentale de mesure des caractéristiques physique, thermique et mécanique des granulats bruts de notre étude. Une attention particulière est portée sur les protocoles d'essais retenus, les conditions limites et les domaines de validité des résultats obtenus. Enfin, les résultats de chaque essai sont discutés et analysés, puis comparés aux résultats obtenus sur des granulats traditionnels afin de placer les granulats carbonatés sur le marché des granulats de construction.

II. Le processus de fabrication des éco-granulats

Les granulats ici produits sont issus d'un procédé de carbonatation accélérée présenté au chapitre précédent, breveté par Carbon8 System, une entité de l'Université de Greenwich (Hills, et al., 2009)(Gunning, et al., 2009). Les déchets préalablement séchés à l'étuve sont humidifiés avec 10% d'eau et carbonatés dans une atmosphère riche en dioxyde de carbone (100%) à une pression maintenue constante pendant 24h à 2 bars. Le phénomène est répété jusqu'à ce que les déchets soient complètement carbonatés c'est-à-dire quand la masse devient constante entre 800°C et 950°C.

Les déchets qui ont des réactions significatives avec le CO₂ sont définis comme étant ceux qui ont absorbés 5% ou plus de leurs masses sèches en CO₂. Les matériaux ont le pouvoir de s'auto-coller et se lier aux fines de carrières en produisant des granulats. Les fines de carrières ont été mélangés aux déchets et en ajoutant le ciment portland comme liant, à des pourcentages de 10, 20, 30, 40 et 50% de la masse sèche. Ensuite de l'eau est ajouté à ces matériaux jusqu'à l'obtention d'une pâte de consistance ferme.

La quantité de CO₂ résultant du traitement par carbonatation accélérée a été calculée comme la différence entre les déchets non-traités et les déchets carbonatés.

La teneur en carbonates des déchets non-traités et des déchets carbonatés est calculée selon la formule (15).

$$\text{CaCO}_3 (\%) = \frac{\text{Masse}_{800^\circ\text{C}} - \text{Masse}_{950^\circ\text{C}}}{\text{Masse}_{105^\circ\text{C}}} \times 100 \quad (15)$$

Les déchets ont été caractérisés et sont principalement composés de calcium, silicium, fer et aluminium (Gunning, et al., 2010). Les caractéristiques physiques et chimiques des cendres initiales, ainsi que le paramétrage du procédé de carbonatation accéléré, notamment la granulométrie des matières premières et le temps et la vitesse de rotation du mélangeur, vont fortement gouverner les propriétés finales du granulat obtenu. Par exemple, un temps de carbonatation dans le mélangeur rotatif plus long engendrera une granulométrie plus grande du granulat transformé. Ainsi, différentes propriétés des granulats carbonatés sont contrôlables lors du processus de transformation. Cet aspect essentiel nous permet de conserver la possibilité d'adapté au mieux le procédé aux exigences sur le produit fini. Le tableau III-1 présente ainsi l'impact des caractéristiques physiques et chimiques des déchets initiaux sur le procédé de carbonatation accélérée.

Tableau III-1 : Influence des caractéristiques physiques et chimiques sur la carbonatation.

Paramètres	Effet sur la carbonatation
pH	Le pH élevé d'un déchet indique la présence d'hydroxydes métalliques qui sont susceptibles de se carbonater.
Teneur en CaO ou MgO	La chaux libre réagit avec l'eau pour former l'hydroxyde de calcium, qui est susceptible de se carbonater. Plus la teneur en chaux est grande, plus le potentiel de carbonatation est élevé. La teneur minimale en chaux pour que la carbonatation se déroule est de 10% massique.
Ratio Ca/Si	Plus le ratio est élevé, plus le pourcentage de carbonatation est important.
Teneur en Ferrite	Cette phase améliore la précipitation de calcite.
Métaux lourds (Pb, Cd, Ni)	Ces métaux augmentent la propension à la carbonatation des matrices cimentaires.
Organiques	Une diminution du taux de carbonatation est observée dans des systèmes contenant des composés organiques.
Taille des particules	Les poudres fines présentent généralement des taux de carbonatation supérieurs pour de forte teneur en eau, du fait d'une surface disponible importante favorisant ainsi les réactions avec le CO ₂ . Néanmoins, lorsque des différences de taux de carbonatation sont observées pour différentes fractions granulométriques d'un même matériau, cela est généralement dû à une hétérogénéité de composition. Les fractions granulométriques les plus petites se carbonatent mieux parce qu'ils ont tendance à contenir de plus forte teneur en CaO.
Surface spécifique	Plus la surface est grande, plus la réaction de carbonatation est importante
Porosité	Une faible porosité empêche la diffusion du CO ₂ entre les particules et est souvent reliée à un fort degré de compactage.
Perméabilité au CO ₂	La perméabilité affecte la diffusion du CO ₂ dans la matière et la solubilité des phases. Les matériaux à haute teneur en eau libre ont une plus faible résistance à la compression et une perméabilité plus élevée.

Une première étape de caractérisation physique et chimique a été élaborée par l'Université de Greenwich sur les différents déchets et les déchets les plus pertinents et qui présentent des caractéristiques intéressantes ont été sélectionnés pour produire les granulats carbonatés. Deux déchets ont été donc initialement choisis afin de commencer la caractérisation des granulats. Ces déchets sont :

- Des résidus d'épuration des fumées d'incinérations des ordures ménagères (REFIOM) provenant d'un centre de valorisation énergétique Lakeside Energy from Waste facility, une entreprise conjointe de Grundon Waste Management Ltd et Viridor, à

Colnbrook, Berkshire, Angleterre. Ces déchets proviennent des cendres volantes captés dans les gaz de combustion dans les dépoussiéreurs électrostatiques.

- Des cendres volantes de papiers issues d'incinération de boues de papeterie provenant d'une usine de traitement à Aylesford Newsprint, Kent.

Par la suite, des déchets de cendres de biomasse incinérés pour la production d'énergie issus de centre thermique français ont été retenus. Ils proviennent de la centrale à biomasse d'Akuo Energy à Nesles (Somme, Picardie, France).

Les cendres de papier sont les déchets les plus réactifs puisqu'ils contiennent déjà des carbonates de calcium ajoutés au moment de la fabrication du papier.

Au cours de cette étude, trois types d'éco-granulats ont été utilisés en les comparant à un granulats léger de référence l'argile expansée type LECA noté AE et un granulats naturel (silicocalcaire concassé) noté O couramment utilisés.

Un granulats noté C8 a été produit à partir des résidus d'épuration des fumées d'incinérations des ordures ménagères (REFIOM) et de ciment utilisé comme liant.

Le second déchet retenu pour produire des granulats notés PA provient des cendres de papier. Ces granulats ont été produits sans ajout de liant mais avec ajout de fines de carrière de Gallagher Maidstone, Kent, riches en oxyde de calcium CaO.

Un dernier déchet provient d'un centre d'incinération de biomasse français, les granulats sont notés BAK. Les matériaux utilisés sont représentés sur les figures III-1 et III-2.

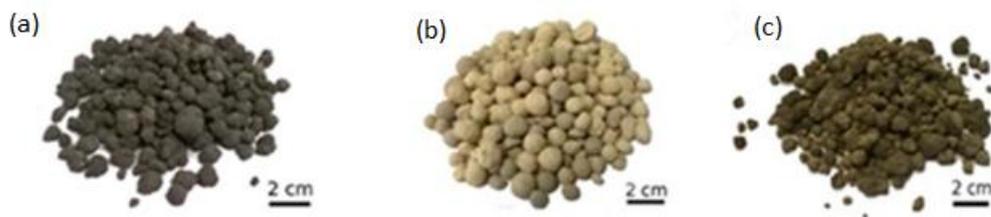


Figure III-1 : Eco-granulats étudiés (a) C8 (b) PA (c) BAK.



Figure III-2 : Granulats de référence étudiés.

III. Caractérisation physique des granulats

Une première série d'essais d'identification a été effectuée sur les granulats utilisés, carbonatés, ordinaire et légers, afin de les caractériser. Ces granulats sont utilisés par la suite pour différentes formulations de bétons. Les essais réalisés vont nous renseigner sur la qualité des granulats ainsi que la possibilité de les utiliser dans la confection de bétons. Ces essais ont été réalisés au sein du Laboratoire des Technologies Innovantes de l'Université de Picardie Jules Verne (Amiens, France).

1. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique est effectuée afin de déterminer la distribution dimensionnelle des grains qui constituent un granulat. Dans la littérature, il existe différentes méthodes pour effectuer l'analyse granulométrique : soit par tamisage dit « classique » ou bien par analyse d'image. Il existe aussi le tamisage par jet d'air ou une vidéo-granulométrie (Outil, 2006).

L'essai a été effectuée conformément à la norme européenne NF EN 933-1 (AFNOR NF EN 933, 1997) compte tenu du matériel disponible au laboratoire. C'est le seul essai normalisé qui nécessite des moyens courants pour déterminer la distribution granulométrique des granulats. Pour avoir une analyse granulométrique significative, nous devons faire attention lors de l'échantillonnage c'est-à-dire déterminer une masse minimale à prélever pour chaque essai (Smith, et al., 1993). Le problème de cet essai est la représentativité de l'échantillon. L'analyse granulométrique a été réalisée par voie sèche, en utilisant les tamis préconisés de type AFNOR par la norme européenne NF EN 933-2 (AFNOR NF EN 933, 1997). Cet essai représente l'essai de référence de la mesure de la granulométrie des granulats. Les tamis utilisés sont : 0.08, 0.1, 0.125, 0.16, 0.2, 0.25, 0.315, 0.63, 1.25, 2, 2.5, 3.15, 4, 5, 6.3, 8, 10, 12.5, 16 et 20 mm. Chaque tamis est pesé à vide, puis plein afin de vérifier que la masse de chaque refus est inférieure à la masse à saturation du tamis. Cette masse est dépendante de l'ouverture du tamis. Par ailleurs, le tamisage doit démontrer une perte maximale de matériau inférieure à 2%, comme suggéré dans la norme NF ISO 2591-1. La granulométrie des éco-granulats utilisés est confrontée aux granulats de référence. L'essai est réalisé 3 fois pour chaque granulat. Les figures III-3, III-4, III-5, III-6, III-7, III-8 présentent les courbes granulométriques pour chaque matériau étudié.

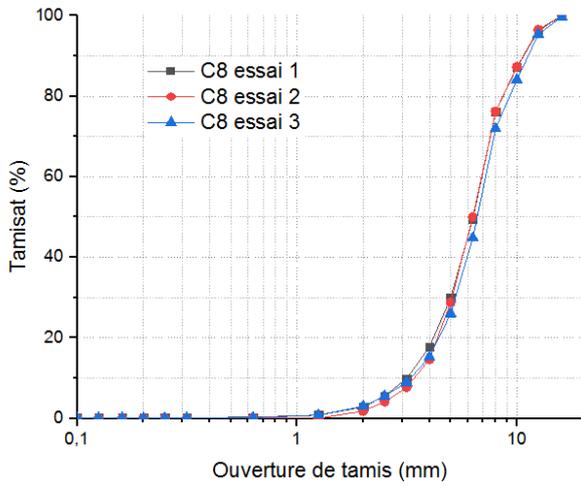


Figure III-3 : Courbes granulométriques du granulat C8.

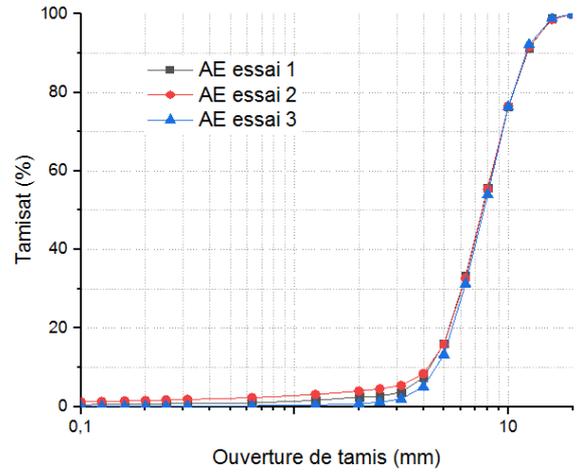


Figure III-6 : Courbes granulométriques du granulat AE.

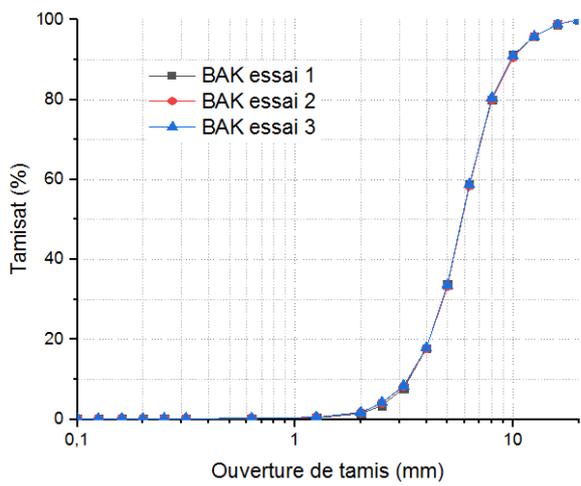


Figure III-4 : Courbes granulométriques du granulat BAK.

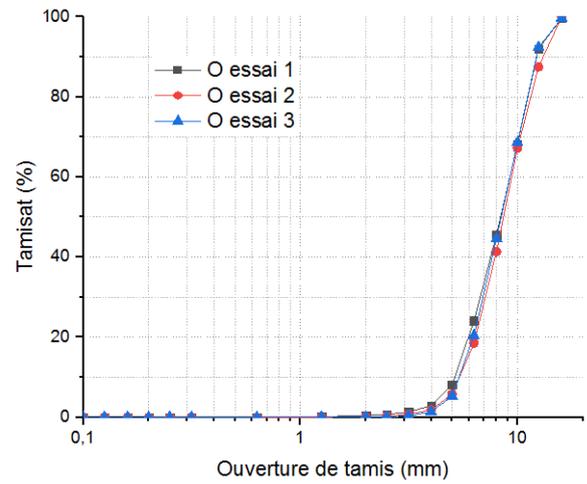


Figure III-7 : Courbes granulométriques du granulat O.

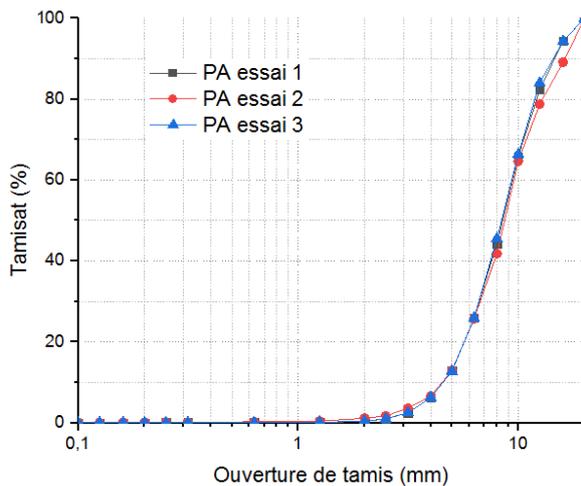


Figure III-5 : Courbes granulométriques du granulat PA.

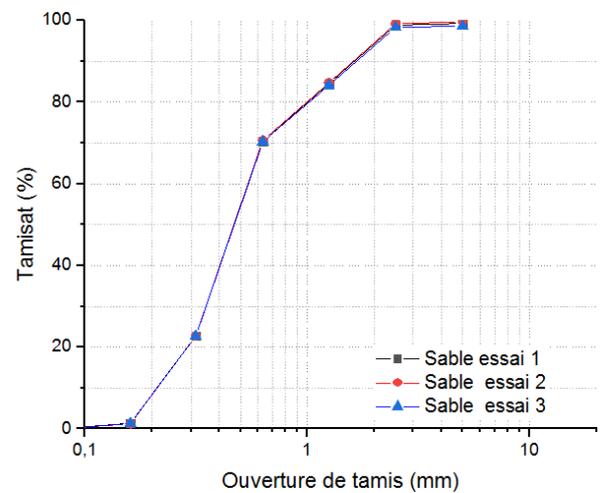


Figure III-8 : Courbes granulométriques du sable étudié.

Les résultats de ces analyses granulométriques moyennes sont résumés dans le tableau III-2.

Tableau III-2 : Analyse granulométriques des matériaux utilisés.

Ouverture de tamis	Tamisât (%)					
	C8	PA	BAK	AE	O	Sable
0.08	0.07	0.04	0.14	0.24	0	0.07
0.1	0.08	0.07	0.16	0.60	0	-
0.125	0.08	0.07	0.18	0.66	0.01	-
0.16	0.08	0.09	0.18	0.74	0.01	1.32
0.2	0.09	0.10	0.20	0.79	0.01	-
0.25	0.10	0.12	0.21	0.88	0.02	-
0.315	0.11	0.13	0.23	0.95	0.02	22.73
0.63	0.18	0.16	0.29	1.18	0.04	70.43
1.25	0.55	0.25	0.50	1.71	0.07	84.44
2	2.55	0.66	1.65	2.41	0.24	-
2.5	5.10	1.26	3.95	2.80	0.40	98.8
3.15	8.84	2.89	8.18	3.69	0.83	-
4	15.89	6.38	17.81	6.98	2.06	-
5	28.26	12.92	33.57	15.06	6.39	99.18
6.3	48.10	25.87	58.71	32.42	21.02	
8	74.74	43.87	80.15	55.05	43.81	
10	86.16	65.64	90.89	76.39	68.02	
12.5	96.03	81.73	95.81	91.74	90.62	
16	99.89	92.62	98.86	98.76	99.78	
20		100	100	100		

Les pourcentages de tamisats cumulés des différents matériaux sont représentés sur la courbe granulométrique de la figure III-9 suivante.

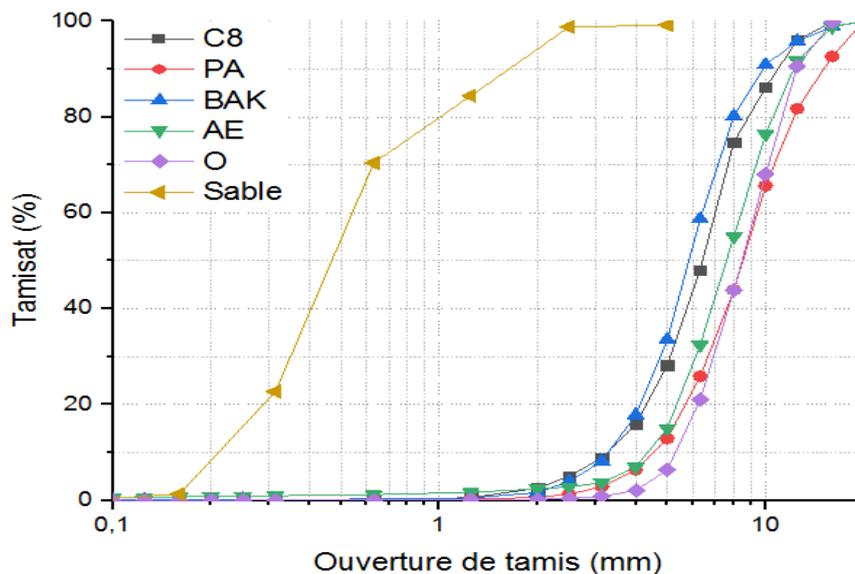


Figure III-9 : Courbes granulométriques des matériaux.

Cette analyse montre que la répartition dimensionnelle des granulats issus du procédé de carbonatation accélérée est proche des granulats de référence d'argile expansée AE et

ordinaire O. Le granulat à base de cendre de papier PA est celui qui représente la répartition dimensionnelle la plus proche des granulats de référence O et AE. Les granulats C8 et BAK présentent un pourcentage d'éléments fins plus important. Le sable étudié est un sable préférentiel pour la confection de béton ciblant un module de finesse de 2.23. Les classes granulaires et le pourcentage de fines variant de 0 à 2% sont adaptés à la fabrication de béton. Ceci confirme le potentiel de substitution aux granulats ordinaires pour la confection de bétons et plus particulièrement pour la réalisation de blocs de construction.

Le coefficient d'uniformité nous renseigne sur la forme de la courbe granulométrique des granulats. On a $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ et le coefficient de courbure est défini par $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}}$. Le sable ayant un coefficient d'uniformité supérieur à 2, sa granulométrie est donc étalée, celles du PA et C8 sont légèrement étalées ; alors que le gravillon ordinaire le AE et le BAK ont des granulométries un peu serrées ($C_u < 2$). Le coefficient de courbure pour le sable et les différents granulats est compris entre 1 et 3, donc les granulats sont bien gradués. Le tableau III-3 présente les caractéristiques des granulats.

Tableau III-3 : Coefficients d'uniformité et de courbure des granulats.

Coefficients	Granulats					
	O	AE	C8	PA	BAK	Sable
Classe granulaire	0/16	0/20	0/16	0/20	0/20	0/5
Coefficient d'uniformité C_u	1	1.87	2.06	2.11	1	2.3
Coefficient de courbure C_c	1	1	1.18	1.08	1	1

2. Forme des grains

La forme de grain peut être déterminée par différentes méthodes soit visuelle, physique ou par analyse d'image. Le choix de la méthode a été fait sur la disponibilité du matériel au laboratoire et la conformité par rapport à la norme. La forme des granulats est mesurée par la détermination du coefficient d'aplatissement des granulats qui est déterminé à partir des essais réalisés selon la norme NF EN 933-3 (AFNOR NF EN 933, 1997). Les résultats sont résumés dans les tableaux suivants ainsi que sur la figure II-10. La forme du grain est déterminée à partir de sa plus grande dimension et de son épaisseur. Pour l'essai d'aplatissement, une double analyse granulométrique par voie sèche est effectuée en utilisant successivement une série de tamis à mailles carrés puis des tamis à fentes parallèles de largeurs normalisés. Les

grains de tailles inférieures à 4mm et supérieures à 80 mm sont éliminés par tamisage par voie sèche. Puis les classes granulaires sont tamisées à l'aide de tamis à fentes parallèles selon le tableau III-4 qui suit.

Tableau III-4 : Correspondance entre classe granulaire d/D et largeur des tamis à fentes.

Classe granulaire d/D (mm)	31.5/40	25/31.5	20/25	16/20	12.5/16	10/12	8/10	6.3/8	5/6.3	4/5
Écartement E des grilles à fentes (mm)	20	16	12.5	10	8	6.3	5	4	3.15	2.5

Dans les tableaux III-5 jusqu'à III-9 ci-après sont présentés les résultats intermédiaires pour cet essai correspondant à chaque matériau étudié.

Tableau III-5 : Résultats de l'essai d'aplatissement pour le granulat PA.

Tamis (mm)	4	5	6.3	8	10	12.5
Masse totale (kg)	1.0352	1.204	1.4283	1.572	1.529	1.2109
Masse tamis (kg)	0.8547	0.809	0.8135	0.8709	0.9889	0.8308
Refus (kg)	0.1805	0.395	0.6148	0.7011	0.5401	0.3801
Total refus (kg)	2.8116					
Tamis à maille carrée	2.5	3.15	4	5	6.3	8
Masse totale (kg)	2.387	2.5271	2.6254	2.5962	2.3298	2.0408
Masse tamis (kg)	2.2083	2.1348	2.0144	1.8938	1.7809	1.6705
Refus (kg)	0.1787	0.3923	0.611	0.7024	0.5489	0.3703
Passant (kg)	0.0064	0.0019	0.0036	0.0031	0.0065	0.0027
Total passant (kg)	0.0242					
A_{PA}	0.86					

Tableau III-6 : Résultats de l'essai d'aplatissement pour le granulat C8.

Tamis (mm)	4	5	6.3	8	10	12.5
Masse totale (kg)	1.1703	1.403	1.5911	1.2517	1.3314	1.0484
Masse tamis (kg)	0.8547	0.809	0.8135	0.8709	0.9889	0.8315
Refus (kg)	0.3156	0.594	0.7776	0.3808	0.3425	0.2169
Total refus (kg)	2.6274					
Tamis à maille carrée	2.5	3.15	4	5	6.3	8
Masse totale (kg)	2.5222	2.7262	2.7905	2.2782	2.2987	1.8869
Masse tamis (kg)	2.2083	2.1348	2.0144	1.8938	1.7809	1.6705
Refus (kg)	0.3139	0.5914	0.7761	0.3844	0.5178	0.2164
Passant (kg)	0.0013	0.0024	0.0011	0.0012	0.0009	0
Total passant (kg)	0.0069					
$A_{C8 AGG}$	0.26					

Tableau III-7 : Résultats de l'essai d'aplatissement pour le granulat BAK.

Tamis (mm)	4	5	6.3	8	10	12.5
Masse totale (kg)	1.2504	1.3898	1.6463	1.3001	1.4009	1.1798
Masse tamis (kg)	0.8547	0.809	0.8135	0.8709	0.9889	0.8315
Refus (kg)	0.3957	0.5808	0.8328	0.4292	0.412	0.3483
Total refus (kg)	2.9988					
Tamis à maille carrée	2.5	3.15	4	5	6.3	8
Masse totale (kg)	2.21	2.2513	2.216	2.2348	2.35	1.9024
Masse tamis (kg)	2.2083	2.1348	2.0144	1.8938	1.7809	1.6705
Refus (kg)	0.0017	0.1165	0.2016	0.341	0.5691	0.2319
Passant (kg)	0.0016	0.0017	0.0022	0.003	0.0003	0
Total passant (kg)	0.0088					
A_{BAK}	0.29					

Tableau III-8 : Résultats de l'essai d'aplatissement pour le granulat AE.

Tamis (mm)	4	5	6.3	8	10	12.5
Masse totale (kg)	1.0796	1.3639	1.4209	1.4832	1.5343	1.1382
Masse tamis (kg)	0.8547	0.809	0.8135	0.8709	0.9889	0.8315
Refus (kg)	0.2249	0.5549	0.6074	0.6123	0.5454	0.3067
Total refus (kg)	2.8516					
Tamis à maille carrée	2.5	3.15	4	5	6.3	8
Masse totale (kg)	2.4248	2.6729	2.6166	2.4947	2.2929	1.9693
Masse tamis (kg)	2.2083	2.1348	2.0144	1.8938	1.7809	1.6705
Refus (kg)	0.2165	0.5381	0.6022	0.6009	0.512	0.2988
Passant (kg)	0.008	0.0159	0.0092	0.0159	0.0328	0.0076
Total passant (kg)	0.0894					
A_{AE}	3.14					

Tableau III-9 : Résultats de l'essai d'aplatissement pour le granulat O.

Tamis (mm)	4	5	6.3	8	10	12.5
Masse totale (kg)	0.9259	1.1213	1.3515	1.5538	2.0053	1.1834
Masse tamis (kg)	0.8547	0.809	0.8135	0.8709	0.9889	0.8315
Refus (kg)	0.0712	0.3123	0.538	0.6829	1.0164	0.3519
Total refus (kg)	2.9727					
Tamis à maille carrée	2.5	3.15	4	5	6.3	8
Masse totale (kg)	2.2646	2.3986	2.4648	2.4712	2.5555	1.9697
Masse tamis (kg)	2.2083	2.1348	2.0144	1.8938	1.7809	1.6705
Refus (kg)	0.0563	0.2638	0.4504	0.5774	0.7746	0.2992
Passant (kg)	0.0146	0.0485	0.0878	0.1103	0.2418	0.0529
Total passant (kg)	0.5559					
A_O	18.7					

Les coefficients d'aplatissement A des granulats carbonatés résumés sur l'histogramme de la figure III-10 sont très inférieurs à ceux des granulats de référence, ce qui prouve l'absence de forme plate ou allongée des granulats. Les granulats carbonatés sont de forme sphérique ce qui s'explique par le processus de fabrication utilisant dans un mélangeur rotatif. Ceci est prouvé dans la littérature, par Arnould et al. , la forme des granulats dépend de leur technique de fabrication et de la matière première (Arnould, et al., 1986).

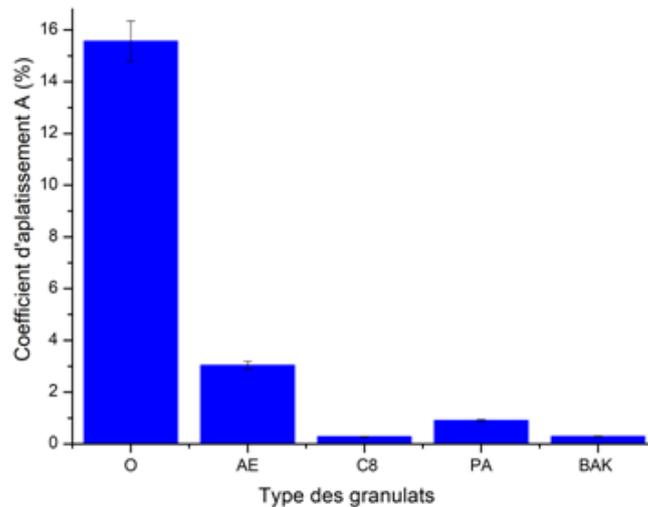


Figure III-10 : Coefficients d'aplatissement des granulats.

La forme des granulats influe sur les propriétés des bétons. Une mauvaise forme de granulat diminue la maniabilité et participe à la ségrégation des bétons (Khaouadjia, 2016).

3. Masses volumiques

Les plus importantes propriétés qui caractérisent les granulats sont leurs masses volumiques. La masse volumique apparente en vrac des granulats légers est la caractéristique la plus fondamentale compte tenu de sa conséquence sur les propriétés des bétons. La différence entre les masses volumiques apparente réelle est la prise en compte des vides. Dans cette partie, nous allons présenter les différentes masses volumiques déterminés ainsi que les protocoles d'essai.

3.1. Masse volumique apparente

Les masses volumiques apparentes ρ_{app} des granulats ont été mesurées selon la norme NF EN 1097-3 (AFNOR NF EN1097-3, 1998) avec un contenant normalisé de 1 litre (figure III-11). Elle s'obtient par l'équation (16).

$$\rho_{app} = \frac{M_1 - M_0}{V} \quad (16)$$

où M_0 est la masse du récipient vide, M_1 est la masse du récipient plein avec l'échantillon mis en place sans tassement et V est le volume du récipient.



Figure III-11 : Mesure de la masse volumique apparente.

Les masses sont mesurées par pesées. Pour chaque type des granulats, les essais ont été réalisés sur 3 échantillons. Les valeurs présentées sur la figure III-12 sont la moyenne des résultats trouvés pour les différents échantillons testés.

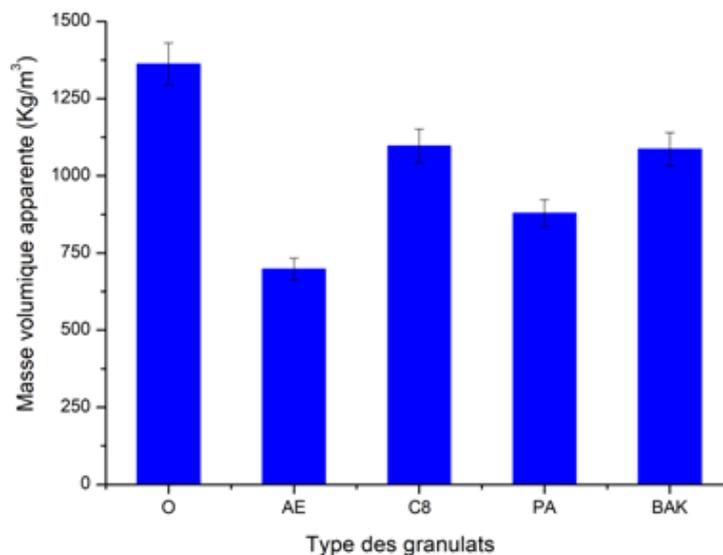


Figure III-12 : Masses volumiques apparentes des granulats.

Les masses volumiques apparentes des éco-granulats sont inférieures à 1200 kg/m^3 ce qui les classent donc dans la catégorie des granulats légers comme l'argile expansée. La masse volumique du granulat à base de cendre de papier PA est légèrement supérieure à celle de l'argile expansée AE. Le granulat ordinaire de référence O a une masse volumique supérieure à 1200 kg/m^3 ce qui confirme son classement comme granulats traditionnel ou lourd.

3.2. Masse volumique réelle

La méthode du pycnomètre à eau, conformément à la norme NF EN 1097-6 (AFNOR NF EN 1097-6, 2014), a été utilisée pour mesurer les masses volumiques réelles et absolues des granulats (figure III-13). La masse des granulats surface sèche est déterminé en séchant les grains par du papier absorbant. L'essai est réalisé sur 3 échantillons pour chaque granulat.



Figure III-13 : La méthode pycnométrique.

Nous déterminons les masses volumiques afin de vérifier la régularité minéralogique des matériaux ainsi que le rendement volumique des différentes formulations des bétons. Les résultats obtenus issus de la moyenne de 3 échantillons pour chaque type de granulat sont présentés dans le tableau III-10.

Ces résultats nous permettent également d'identifier les porosités intraparticule et intergranulaire. Comme attendu, le granulat ordinaire présente une très faible porosité intraparticule (de l'ordre de 3.5%) quand les granulats légers montrent des taux significativement supérieurs. En revanche, la porosité intergranulaire semble relativement similaire pour tous les granulats étudiés. La porosité intraparticule pourrait donc être à l'origine des différences de propriétés des granulats, en sus de leurs caractéristiques chimiques.

Tableau III-10 : Masses volumiques réelles, porosité et coefficients d'absorption d'eau des granulats.

Type des granulats	Masse volumique réelle surface sèche ρ_{ssd} (kg/m ³)	Masse volumique absolue ρ_a (kg/m ³)	Masse volumique séchée à l'étuve ρ_{rd} (kg/m ³)	Coefficient d'absorption d'eau à 24h W_{a24} (%)	Porosité intra-particule (%)	Porosité inter-granulaire (%)
O	2540	2590	2500	1.38	3.46	45.62
AE	1376	1456	1200	14.53	17.46	41.90
C8	2100	2560	1815	16.01	29.08	39.65
PA	1850	2435	1440	28.26	40.78	39.06
Bak	2240	2756	1946	15.09	29.37	44.21

Un volume total V d'un granulat léger est constitué d'un volume de pores ouverts intérieurs V_e et d'un volume de pores fermés comme indiqué sur la figure III-14 ci-dessous. La masse sèche des grains est M_s , l'eau contenue dans les pores ouverts a une masse M_e et la masse totale du granulat saturé est M_s+M_e .

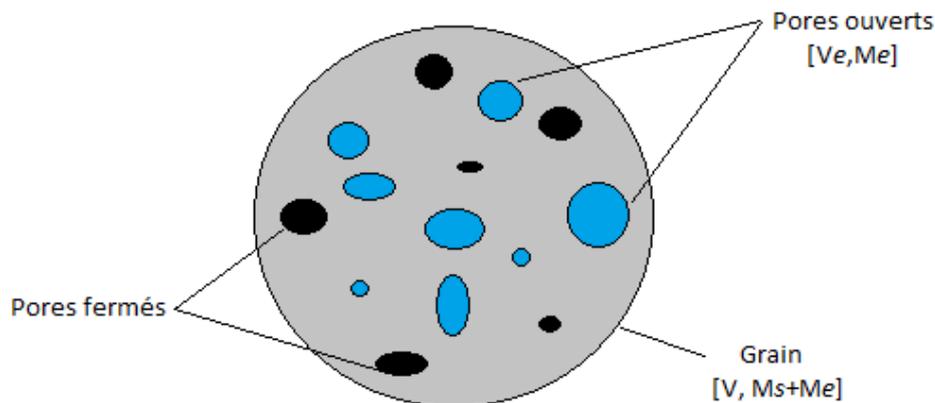


Figure III-14 : Système poreux des granulats légers.

La masse volumique réelle surface sèche ρ_{ssd} est le rapport entre la masse des grains avec l'eau présent dans les pores ouverts (M_s+M_e) et le volume total qu'ils occupent.

$$\rho_{ssd} = \frac{M_s + M_e}{V} \quad (17)$$

La masse volumique séchée à l'étuve ρ_{rd} est le rapport de la masse des granulats séchés à l'étuve et le volume total qu'ils occupent.

$$\rho_{rd} = \frac{M_s}{V} \quad (18)$$

La masse volumique absolue ρ_a est le rapport de la masse séchée à l'étuve et le volume total sans le volume des pores ouverts (pores accessibles à l'eau)

$$\rho_a = \frac{M_s}{V - V_e} \quad (19)$$

Globalement, les masses volumiques réelles des granulats sont encadrées par celles des granulats de référence O et AE. Compte tenu de leurs absorptions d'eau qui diffèrent selon le type de granulat, les écarts des masses volumiques réelles surface sèche sont importantes. Après 24h, l'absorption d'eau W_{A24} est de l'ordre de 15% pour les granulats C8, BAK et AE alors qu'elle atteint 29% pour les granulats PA. La porosité inter-granulaire des granulats carbonatés est de l'ordre de 0.4.

En se basant sur les résultats expérimentaux, une relation linéaire avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0.96$ a été établit entre l'absorption d'eau à 24h W_{A24} et la masse volumique des granulats (figure III-15). La relation peut être exprimée par l'équation (20) :

$$d = 2600 - 51 W_{A24} \quad (20)$$

avec d la masse volumique et W_{A24} en pourcentage

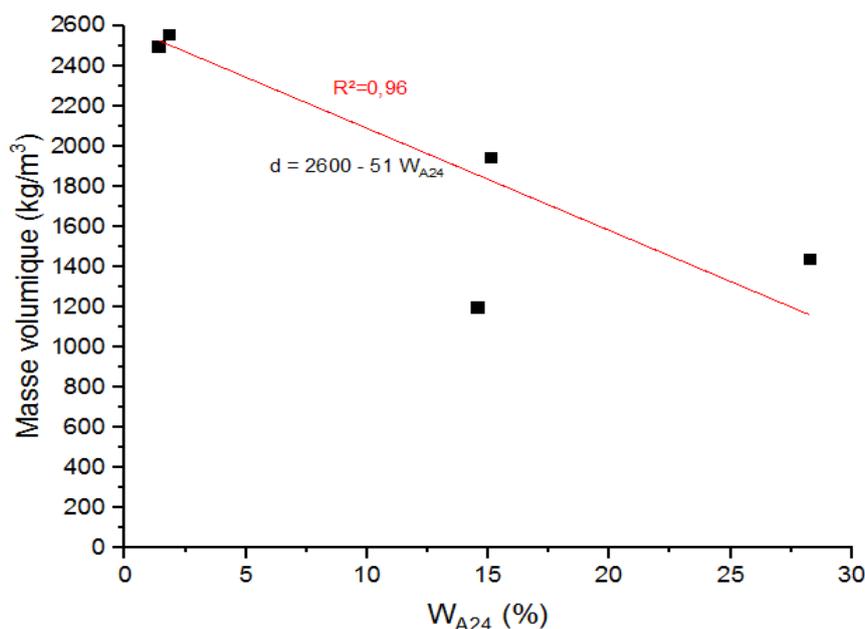


Figure III-15 : Masses volumiques des granulats en fonction de W_{A24} .

4. Porosité totale et compacité

La porosité représente le volume des pores par le volume total du matériau. La porosité totale a été mesurée directement sur le granulat sans ajout d'eau par la méthode utilisée par Collet (**COLLET, et al., 2013**) et est calculée à partir de l'équation (26). Elle est fonction de la masse volumique réelle des grains et la masse volumique apparente des granulats à l'état sec. L'échantillon est placé dans une fiole où le volume est complété par un liquide chimiquement inerte : le toluène, en raison du caractère absorbant des granulats (figure III-16). L'ensemble est agité pour s'assurer que les vides soient comblés. On pèse l'ensemble régulièrement jusqu'à stabilisation de la masse.



Figure III-16 : Mesure de la porosité des granulats.

Les différentes pesées donnent :

- m_1 : Masse de la fiole
- m_2 : Masse de la fiole + échantillon
- m_3 : Masse de la fiole + échantillon + Toluène.

Les relations qui mènent au calcul de la porosité des granulats sont :

Masse de l'échantillon :

$$M_{ech} = m_2 - m_1 \quad (21)$$

Masse du Toluène :

$$M_t = m_3 - m_2 \quad (22)$$

Volume du Toluène :

$$V_t = \frac{M_t}{\rho_t} \quad (23)$$

Volume de l'échantillon :

$$V_{ech} = V_{tot} - V_t \quad (24)$$

A partir de ces équations, la masse volumique réelle des granulats est déterminée :

$$\rho_s = \frac{M_{ech}}{V_{ech}} \quad (25)$$

Connaissant la masse volumique apparente, la porosité totale des granulats est ainsi déterminée :

$$n = \frac{\rho_s - \rho_{app}}{\rho_s} \times 100 \quad (26)$$

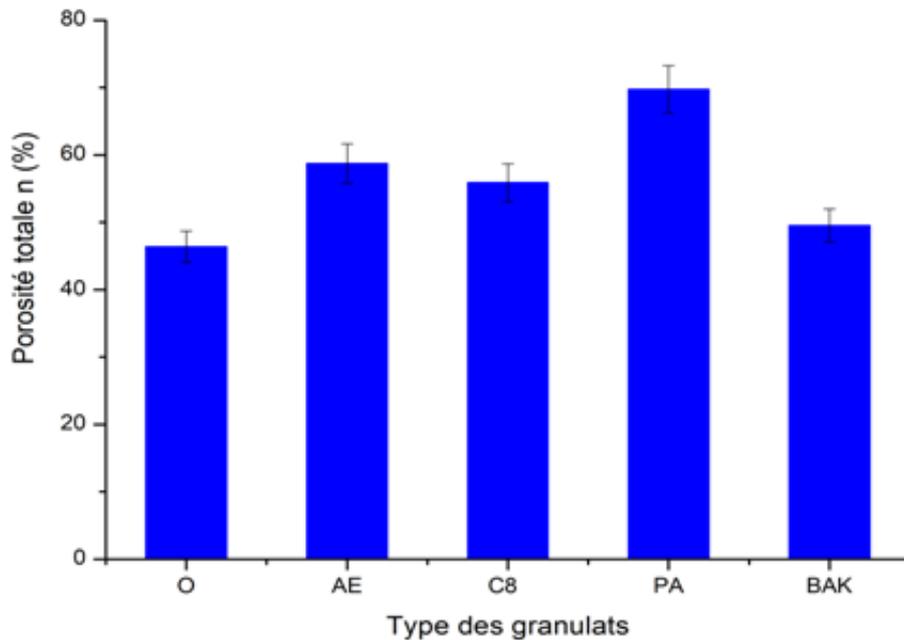


Figure III-17 : Porosité totale des granulats.

La figure III-17 nous montre que les granulats à base de déchets C8 et PA sont beaucoup plus poreux que le granulat naturel. La porosité du granulat à base de cendres de papier atteint les 70%. Ceci confirme la légèreté des granulats carbonatés, due à leur porosité élevée d'où le fait que ces granulats soient beaucoup plus absorbants que les granulats naturels.

On distingue deux types de porosité : porosité inter-particules qui représente l'air créé par l'arrangement plus au moins compact des particules entre eux et porosité intra-particules qui résulte de l'air propre aux particules.

La porosité inter-particules est calculée suivant la formule (27).

$$\rho_{inter} = 1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{rd}} \quad (27)$$

La porosité intra-particules est déterminée selon l'équation (28) :

$$\rho_{intra} = n - \rho_{inter} \quad (28)$$

Les résultats des porosités inter et intra-particules sont résumés dans le tableau II-9. Pour le granulat à base de cendres de papier PA, la porosité est répartie de façon équilibrée entre inter et intra-particules alors que dans le cas des autres granulats, la porosité est plus inter qu'intra-granulaire.

Nous pouvons aussi déterminer la compacité des granulats. Elle représente le volume des pleins sur le volume total du matériau. Les valeurs de la compacité de nos granulats sont représentées sur la figure III-18.

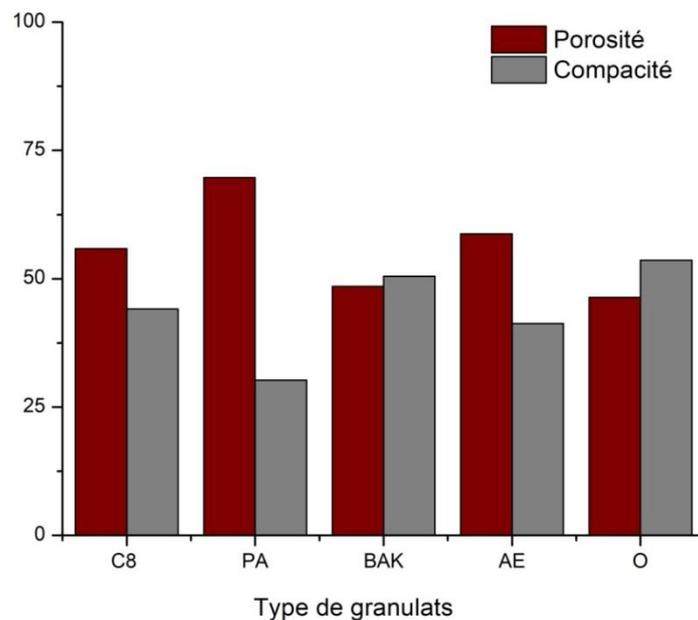


Figure III-18 : Porosité et compacité des granulats.

La compacité d'un mélange est une caractéristique fondamentale afin de réaliser un béton présentant une résistance mécanique suffisante. En effet, au-delà des propriétés mécaniques des grains, s'assurer d'une bonne compacité du mélange granulats-ciment permet de confirmer la formulation du béton. Indépendamment du type du granulat, en se basant sur les résultats expérimentaux, une relation linéaire a été retrouvée entre la porosité des granulats et

le coefficient d'absorption d'eau à 24h W_{A24} (figure III-19) exprimée par l'équation (29). Un matériau de forte porosité absorbera une quantité plus importante d'eau lors du mélange avec la matrice cimentaire. Ceci impactera donc directement la quantité d'eau de gâchage à introduire dans le mélange et la formation d'un réseau de capillaires lors du séchage de la pâte cimentaire (modification du squelette du béton).

$$n = 1.06 W_{A24} + 46.7 \quad (29)$$

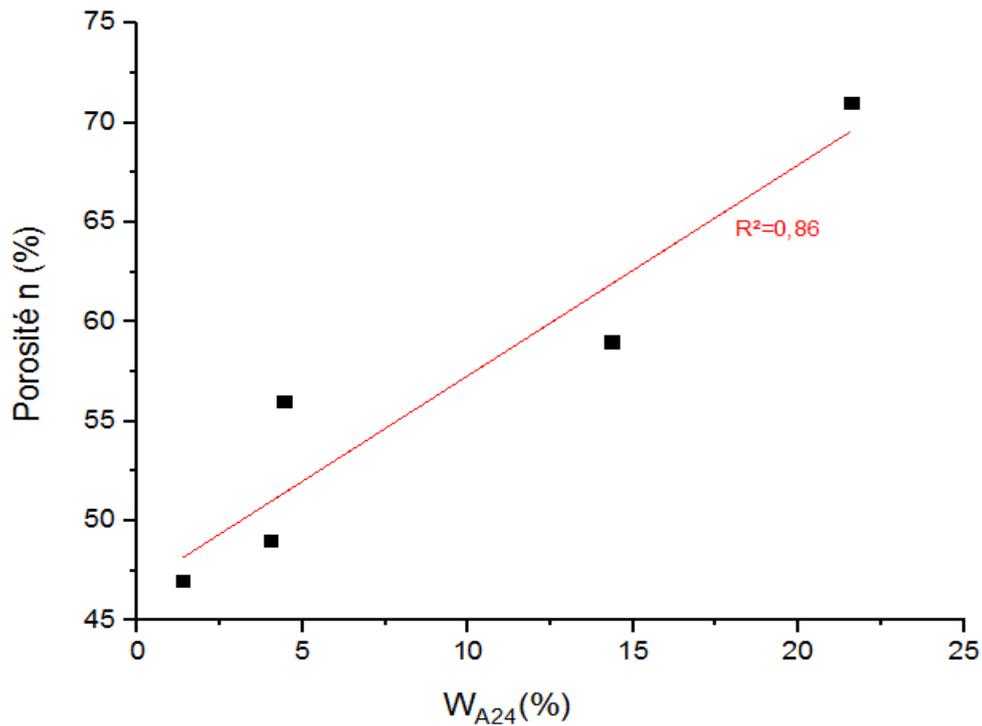


Figure III-19 : Porosité des granulats en fonction de W_{A24} .

5. Absorption d'eau

Les granulats légers sont connus pour leurs importantes absorptions d'eau. Lors de la fabrication des bétons, nous devons prendre en considération l'absorption d'eau de ces granulats. Afin d'adapter au mieux la formulation du béton, la mesure d'absorption d'eau des granulats a été faite sur trois échantillons de 400g immergés dans l'eau pendant 7 jours afin de mesurer la capacité d'un granulat à absorber l'eau (figure III-20). Avant de les immerger dans l'eau, les granulats ont été séchés à l'étuve à 70°C jusqu'à stabilisation de leur masse. Cet essai est réalisé afin de prendre en compte l'absorption des granulats dans le calcul du rapport Eau efficace/Ciment dans les bétons et avoir une estimation de l'aptitude du granulat à influencer la rhéologie du béton.



Figure III-20 : Essai d'absorption d'eau.

Le coefficient d'absorption d'eau est le rapport de la masse d'eau présent dans l'échantillon après imbibition à l'eau pendant 7 jours sur la masse de l'échantillon séchée à l'étuve à 70°C.

$$w = \frac{M_e}{M_s} \times 100 \quad (30)$$

Les résultats montrent une absorption immédiate pour les granulats PA proche de 22% (figure III-21). Après 7 jours, les granulats AE atteignent environ 20% d'absorption d'eau. En ce qui concerne les granulats C8 et BAK, ceux-ci ont montré un comportement atypique, avec une absorption rapide de l'ordre de 5 % puis une perte de masse liée à la désagrégation des granulats dans l'eau. Ces différents résultats soulignent la nécessité d'adapter la proportion en eau lors de la confection des bétons afin d'optimiser les formulations.

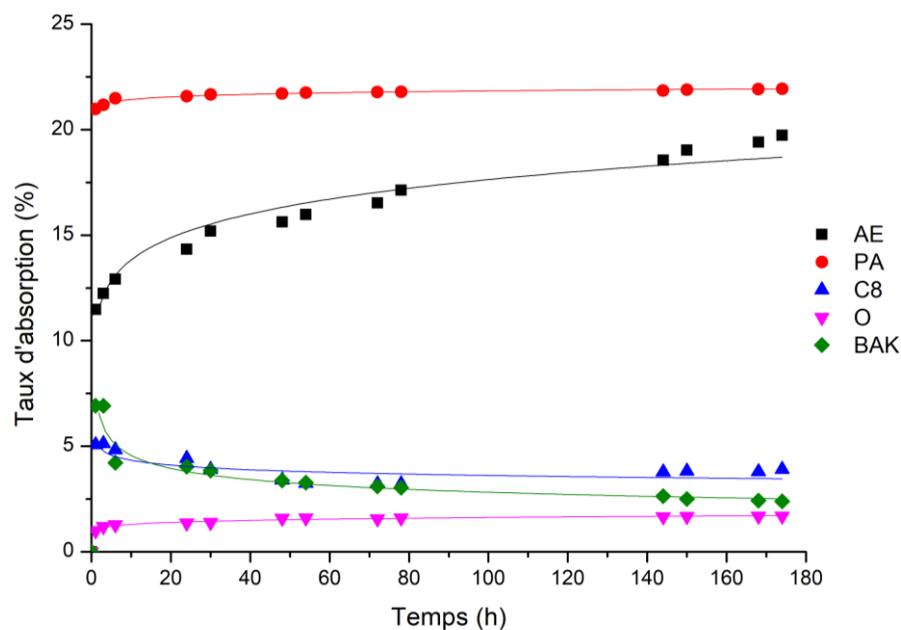


Figure III-21 : Absorption d'eau des granulats à 7 jours.

La figure III-22 montre la variation de l'indice d'absorption d'eau, défini par $i_w = W_{At}/W_{A24}$, en fonction du temps. On peut observer que l'absorption d'eau à 24h n'est pas suffisante pour déterminer le coefficient d'absorption d'eau des granulats. En effet, certains granulats ont continué à absorber de l'eau pendant 3 jours avant la stabilisation. Cette augmentation est significative pour les granulats naturels O et les granulats d'argile expansée AE. Pour les granulats à base de cendres de papier PA, l'indice d'absorption d'eau reste presque égal à 1. Cela souligne l'importance de la qualité des granulats sur leurs propriétés physiques. Il est important de prendre en considération le coefficient d'absorption d'eau des granulats après stabilisation, c'est-à-dire au minimum à 72h.

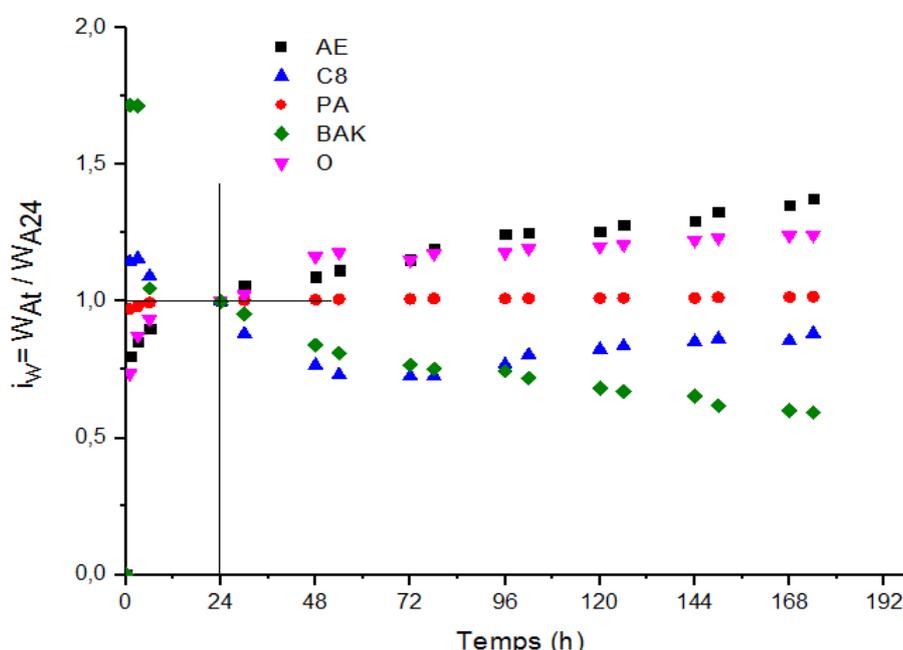


Figure III-22 : Variation de l'indice d'absorption d'eau en fonction du temps.

IV. Caractérisation mécanique des granulats

1. Résistance à l'écrasement en vrac

Dans le but d'évaluer la résistance mécanique des éco-granulats, des essais d'écrasement en vrac (figure III-23) ont été réalisés selon la norme EN 13055-1 (AFNOR NF EN 13055-1, 2002). Des granulats sont placés en vrac dans un cylindre de 100 mm de hauteur et de 200 cm² de section (figure III-24). L'échantillon est ensuite soumis à un effort de compression à l'aide d'un piston cylindrique. L'essai est réalisé sur une presse électromécanique de capacité

nominale de 250 kN de chez Shimadzu. La vitesse d'enfoncement du piston est de 1 mm par minute et l'essai est terminé lorsque l'enfoncement du piston atteint 20 mm.



Figure III-23 : Essai d'écrasement en vrac des granulats.

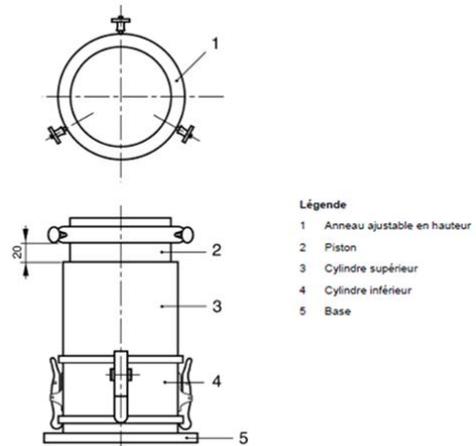


Figure III-24 : Appareillage d'essai d'écrasement en vrac (AFNOR NF EN 13055-1, 2002).

A l'issu de l'essai d'écrasement en vrac, nous obtenons la courbe présentée à la figure III -25. Cette courbe présente la force équivalente en fonction de l'enfoncement du piston dans le cylindre rempli de granulats selon la norme 13055-1 (AFNOR NF EN 13055-1, 2002).

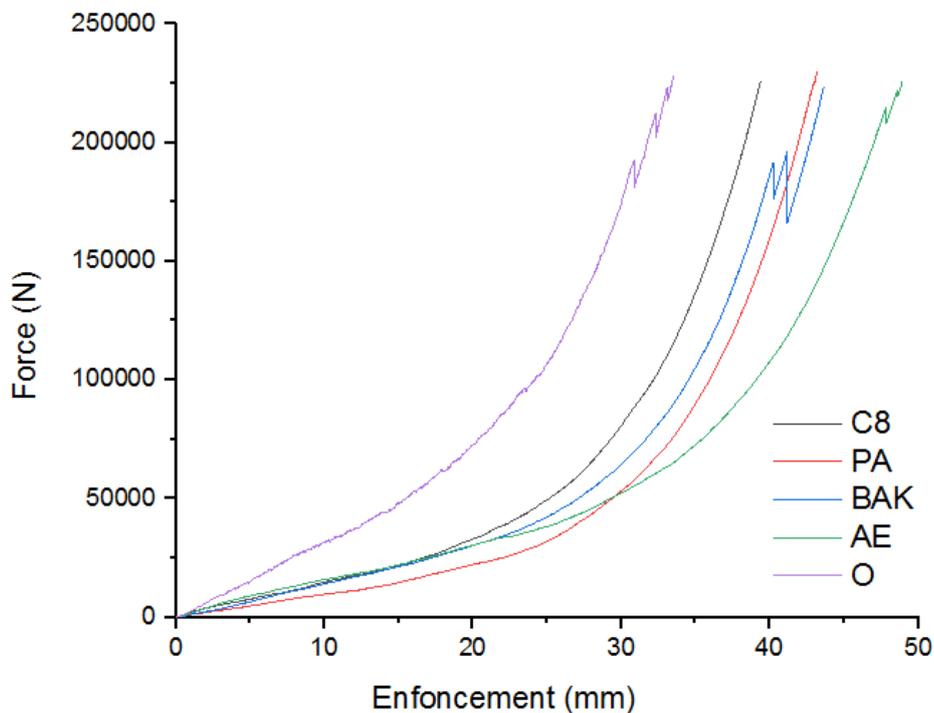


Figure III-25 : Courbe force-enfoncement de l'essai d'écrasement des granulats.

La résistance conventionnelle des granulats est définie par le quotient de la force appliquée nécessaire pour obtenir l'enfoncement de 20 mm du piston par section du cylindre. La résistance à l'écrasement C_a exprimée en N/mm^2 est déterminée à partir de l'équation suivante :

$$C_a = \frac{L+F}{A} \quad (31)$$

avec :

- L le poids du piston ;
- F la force de compression ;
- A l'aire du piston.

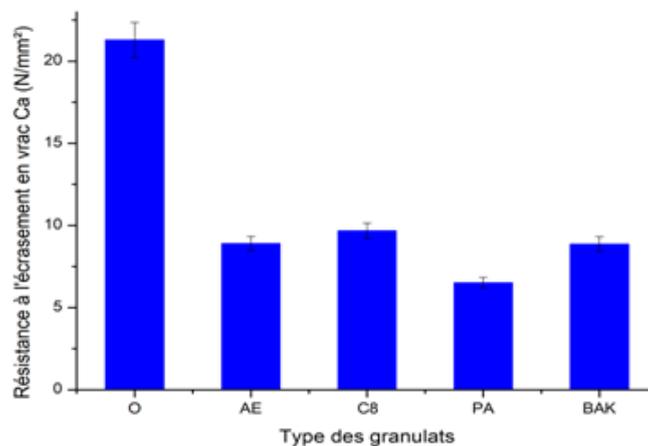


Figure III-26 : Résistance à l'écrasement en vrac des granulats.

Les éco-granulats C8, PA et BAK ont une résistance à l'écrasement en vrac inférieure à celle des granulats O, comme attendu au regard des masses volumiques réelles et apparentes. Les granulats C8 tendent à montrer une bonne résistance à l'écrasement plus élevée que les granulats PA, BAK et AE. Ces résultats (figure III -26) traduisent l'intérêt que présentent les granulats carbonatés pour la fabrication de blocs de construction. La variation des résistances dépend de la matière première dont le granulat est produit ainsi que la quantité de chaleur utilisée pour la production des granulats (**Bello, 2014**).

Nous pouvons établir une relation linéaire entre la porosité des granulats et la résistance de l'écrasement en vrac C_a (figure III -27) avec un coefficient de corrélation $R^2=0.82$. Elle est exprimée selon l'équation (32).

$$C_a = 20.31 - 0.23 n \quad (32)$$

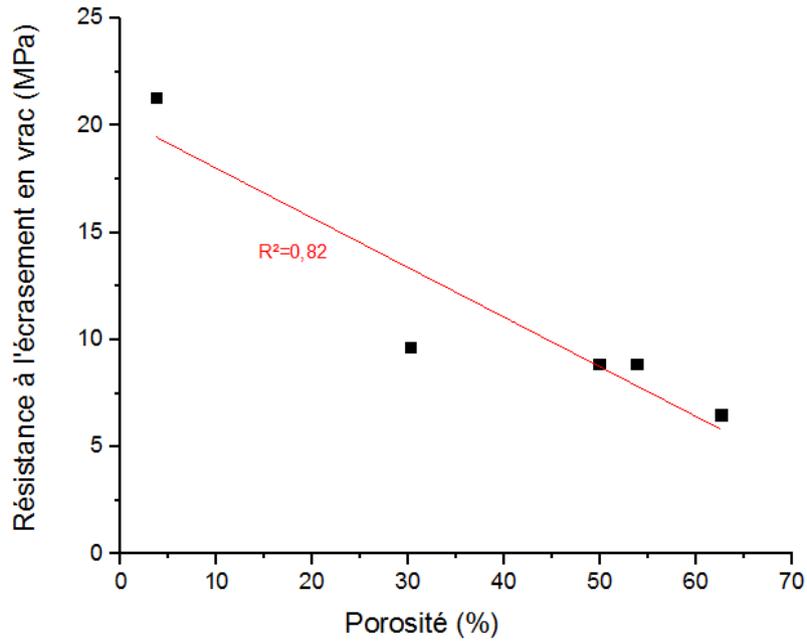


Figure III-27 : Résistance à l'écrasement en vrac en fonction de la porosité des granulats.

Nous pouvons aussi déterminer la résistance à l'écrasement en vrac en fonction de la masse volumique des granulats. Une relation linéaire s'établit entre ces deux paramètres (figure III - 28) avec un coefficient de corrélation $R^2=0,7$. Elle est exprimée selon la relation (33) :

$$C_a = 0.001 \rho - 6.34 \quad (33)$$

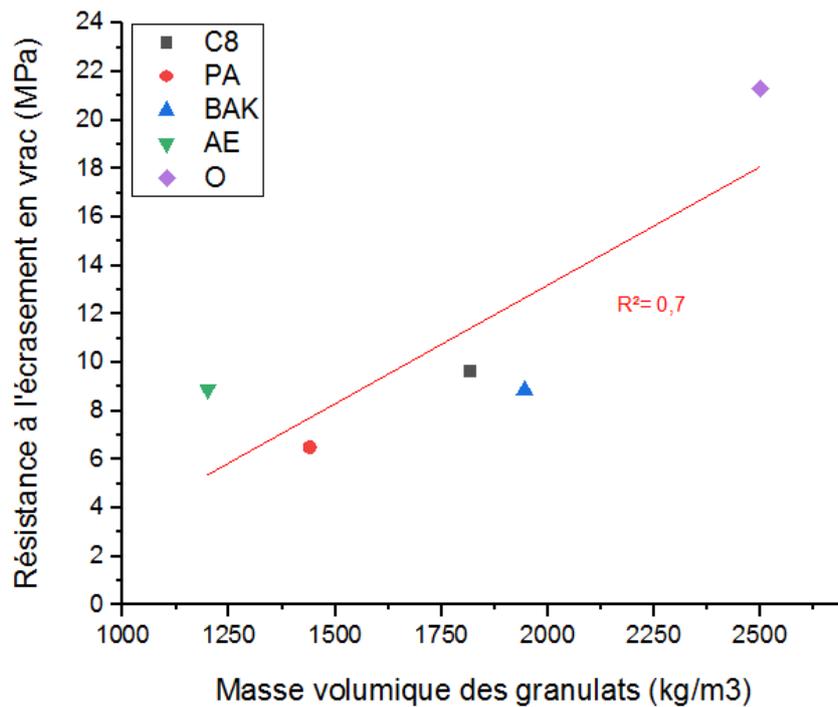


Figure III-28 : Résistance à l'écrasement en vrac en fonction de la masse volumique.

2. Résistance à la fragmentation

Le coefficient Los Angeles est obtenu selon la norme NF EN 1097-2 (AFNOR NF EN 1097-2, 2010). Il est calculé en fonction du pourcentage des éléments fins après l'essai. Il permet d'évaluer la résistance à la fragmentation des granulats. Pour tester la dureté des granulats, ils sont soumis à des chocs et des frictions réciproques dans un tambour contenant des boulets en acier normalisés durant un nombre de cycles défini. La rotation de l'échantillon dans le tambour entraîne une fragmentation du matériau (NADAH, 2010). Une fois l'essai terminé, le matériau est tamisé par lavage sur le tamis 1.6 mm (Vimane Phoummavong, 2000). Le coefficient de Los Angeles est calculé à partir de la masse du passant.



Figure III-29 : Essai de Los Angeles.

Le coefficient LA, exprimé en pourcentage, se calcule selon la formule (34).

$$LA = \frac{M - M'}{M} \quad (34)$$

où :

- M est la masse initiale de l'échantillon ;
- M' est la masse de l'échantillon après l'essai.

Le tableau III-11 présente la classification européenne pour les granulats selon le coefficient Los Angeles.

Tableau III-11 : Classification des granulats selon LA.

LA	Appréciation
< 15	Très bon à bon
15 à 25	Bon à moyen
25 à 40	Moyen à faible
> 40	Médiocre

Les résultats de l'essai de Los Angeles (LA) sont présentés sur la figure III-30. Plus le coefficient LA est faible, plus le matériau est résistant à l'abrasion et aux frictions.

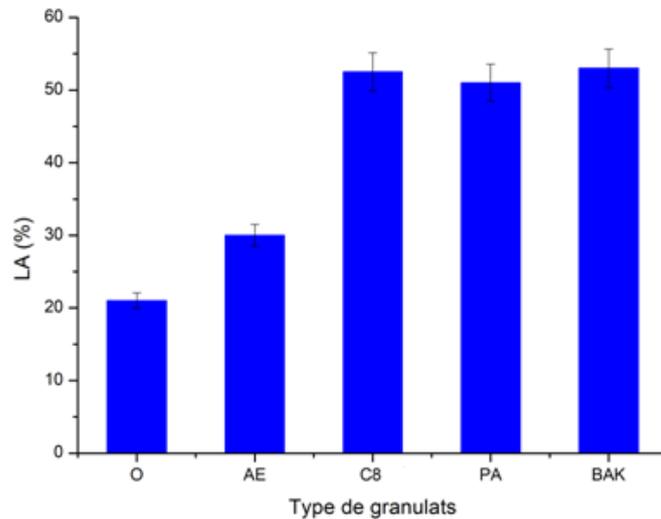


Figure III-30 : Résistance à la fragmentation des granulats.

Ces résultats montrent que le gravier ordinaire convient bien pour la confection de béton de qualité ($15 < LA < 25$). Par contre, la valeur du coefficient Los Angeles des granulats à base de déchets est assez élevée ($LA > 40$). Selon la norme française P 18-557 (AFNOR P18-557, 1990), la résistance mécanique des roches est directement liée à leur porosité. Le granulat AE est acceptable mais la résistance de C8 et PA est considérée comme assez faible. Les granulats carbonatés ont des faibles résistances à l'abrasion mécanique. Une attention particulière devra donc être portée leur de leur manipulation pour la confection d'un béton (notamment dans un processus industriel utilisant un fort tonnage de granulats)

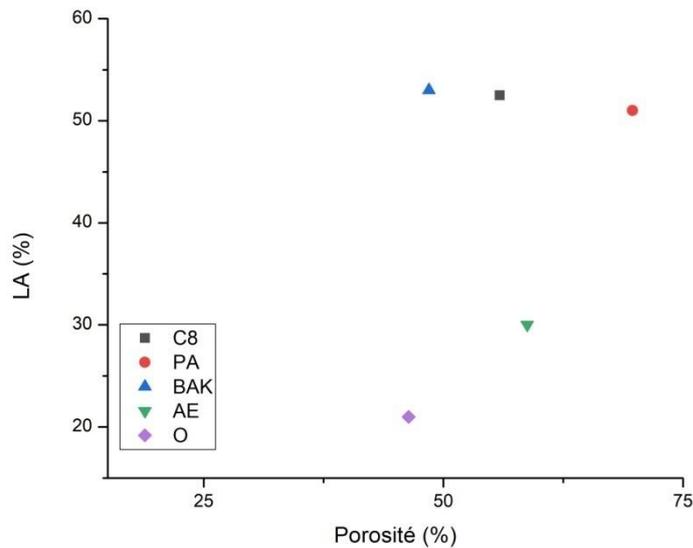


Figure III-31 : Résistance à la fragmentation en fonction de la porosité des granulats.

La résistance à la fragmentation ne semble, en revanche, pas être directement dépendante de la porosité des granulats. La composition chimique des granulats semble avoir une incidence nettement plus significative. Cette caractéristique n'indique donc pas une contre-utilisation de ces matériaux carbonatés pour la confection d'un béton mais uniquement la nécessité de mettre en place un procédé industriel adapté afin d'éviter l'endommagement prématuré des granulats lors des différentes phases de manipulation et de transport.

V. Caractérisation thermique des granulats

Les granulats carbonatés sont plus légers et poreux que les granulats ordinaires ce qui nous incite à penser à une amélioration de la performance thermique des bétons. A ces fins, l'évaluation de la conductivité thermique constitue une première approche de la performance thermique de ces matériaux. Afin de mesurer la conductivité thermique des granulats, plusieurs méthodes sont utilisables dans la littérature : en régime permanent ou en régime transitoire.

Les méthodes utilisées en régime permanent se réalisent en imposant à travers l'échantillon un flux de chaleur unidirectionnel constant et en mesurant les températures des plaques chaude T_c et froide T_f . Il existe différentes méthodes en régime permanent à savoir la méthode de plaque chaude gardée, boîte chaude, méthode des boîtes symétriques (**Bastian, 1982**)(**Braymand, et al., 2010**) (**Cerezo, 2005**), (**NGUYEN, 2013**),(**Collet, 2004**), (**Tlijani,**

2016). Dans ces méthodes, il n’y a pas d’intervention de temps. Elles permettent de déterminer la conductivité thermique. Pour les méthodes de mesure en régime transitoire (exemple fil chaud, méthode flash), les mesures se font en fonction du temps et permettent de déterminer la conductivité thermique, la chaleur spécifique et la diffusivité thermique. **(Rahim, 2015), (Derbal, 2014) , (Tlijani, 2016).**

Pour mesurer la conductivité thermique des granulats, la méthode de la plaque chaude gardée en régime permanent a été utilisée sur des échantillons 25x25x6 cm. Cette méthode peut être classée comme la plus précise pour mesurer la conductivité thermique des matériaux isolants à faible conductivité thermique où λ est inférieure à 1 W/m.K **(Salmon, 2001).**

Afin de mesurer la conductivité des granulats, les échantillons ont été délimités par un cadre en polystyrène extrudé pour former le volume de mesure et l’épaisseur de l’échantillon. Le polyester est un excellent isolant, il sert ici à limiter le flux de chaleur transversal et de maintenir ainsi, un flux unidirectionnel dans le sens de l’épaisseur de l’échantillon. Cette méthode ne permet pas d’évaluer des paramètres comme la diffusivité thermique et la capacité thermique. L’échantillon de granulats à étudier est placé dans un moule 25x25x6 cm composé de polystyrène extrudé et du papier plastique transparent ci-dessous. Le moule a été rempli avec une quantité maximale de granulats pour limiter les vides d’air. Le polystyrène est un excellent isolant et permet de maintenir un flux unidirectionnel dans le sens de l’épaisseur de l’échantillon. L’échantillon est placé entre deux plaques échangeuses, reliées à un bain thermostaté. Le contact thermique est assuré par l’application d’un champ de compression de 400 N. Cette compression permet de limiter la résistance thermique potentiellement induite par présence de lames d’air à l’interface entre l’échantillon et les plaques échangeuses. Dans un premier temps, les deux plaques échangeuses sont régulées à une température constante homogène jusqu’à la stabilité du flux de chaleur. Puis, la plaque supérieure va générer une sollicitation en température ; l’unidirectionnalité du flux de chaleur est assurée par l’anneau de garde. L’exploitation de la densité du flux de chaleur en régime établi permet de déterminer la conductivité thermique de l’échantillon. Ainsi, nous pouvons déterminer la conductivité thermique des matériaux.

L’origine étant au niveau du point de contact entre la plaque chaude et l’échantillon, la conductivité thermique est déterminée en état d’équilibre en partant de l’équation de la conduction :

$$\begin{cases} \nabla^2 T(x) = 0 \\ T(0) = T_c \\ T(e) = T_f \end{cases} \quad (35)$$

$$T(x) = T_c + \frac{T_f - T_c}{e} x \quad (36)$$

$$\phi = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda \frac{\Delta T S}{e} \quad (37)$$

$$\lambda = \frac{\phi e}{S \Delta T} = \frac{\phi e}{S(T_c - T_f)} \quad (38)$$

avec :

- ϕ le flux traversant l'échantillon ;
- e l'épaisseur de l'échantillon ;
- T_c et T_f sont respectivement les températures de la plaque chaude et la plaque froide ;
- S la surface d'échange.

Des thermocouples et fluxmètres sont installés sur les faces supérieure et inférieure de l'éprouvette pour mesurer les champs de température et densité de flux (figure III-33) ; le contact thermique est assuré par pâte thermique. Un anneau de garde est utilisé pour empêcher la fuite de chaleur latérale de part et d'autre de l'échantillon.

L'utilisation de l'appareillage à plaque chaude gardée (figure III-32) est limitée soit par la conception de l'appareillage lui-même (possibilité de maintenir une densité de flux thermique constante, uniforme et unidirectionnelle dans l'éprouvette ; possibilité de mesurer la puissance, la température et les dimensions dans les limites de précision exigées), soit par la nature et la forme des éprouvettes (identité des épaisseurs et uniformité de structure des éprouvettes, ainsi que qualité de surface: planéité et parallélisme).



Figure III-32 : Méthode de la plaque chaude gardée.

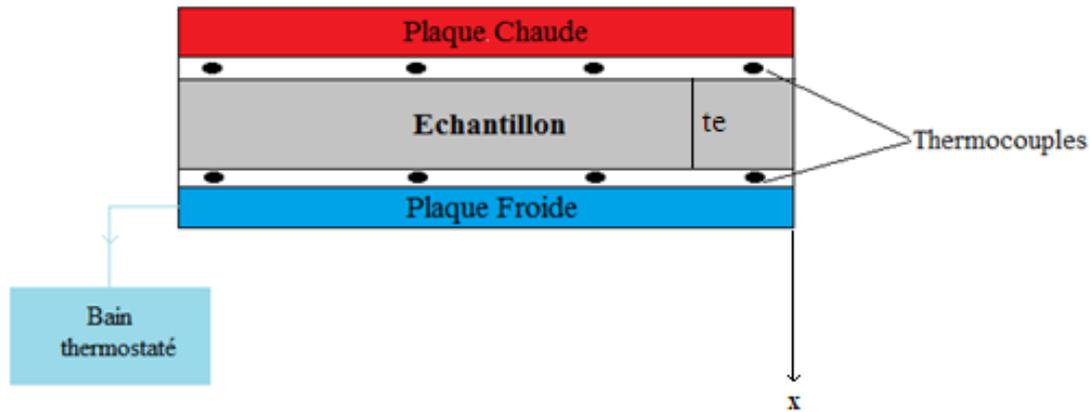


Figure III-33 : Schéma de principe de la méthode de plaque chaude gardée.

L'essai de la plaque chaude gardée permet la détermination de la conductivité thermique en vrac λ_{exp} . La conductivité thermique réelle des granulats λ_{agg} est calculée en deux étapes en utilisant la moyenne arithmétique des limites de Hashin-Shtrikman d'un matériau à deux phases λ_U et λ_L selon les équations (40) et (41).

$$\lambda_{eff} = \frac{\lambda_U + \lambda_L}{2} \quad (39)$$

Pour $\lambda_U > \lambda_L$, les limites inférieures et supérieures de Hashin-Shtrikman pour la conductivité thermique de composite à deux phases peuvent s'écrire comme suit.

$$\lambda_U = \lambda_S + \frac{\varepsilon}{\frac{1}{\lambda_a - \lambda_S} + \frac{1-\varepsilon}{3\lambda_S}} \quad (40)$$

$$\lambda_L = \lambda_a + \frac{1-\varepsilon}{\frac{1}{\lambda_S - \lambda_a} + \frac{\varepsilon}{3\lambda_a}} \quad (41)$$

où λ_S , λ_{eff} et λ_a sont respectivement la conductivité thermique du granulat de la phase solide, du granulat en vrac et de l'air. ε est la fraction volumique de l'air. La conductivité thermique des granulats a été calculée en utilisant la fraction volumique d'air inter et intra particulaire. Le tableau montre les résultats mesurés pour les conductivités théoriques des granulats mesurée et celles réelles. Les résultats présentés en figure III-34 montrent de bonnes performances thermiques pour le granulat PA avec une conductivité thermique de 0,15 W/m.K, similaire à celle du granulat léger de référence AE. Le granulat C8 présente de meilleures propriétés thermiques que le granulat O. Les résultats des conductivités thermiques λ_{agg} présentés au tableau III-12 montrent que les granulats carbonatés ont des conductivités thermiques inférieures à celle du granulat ordinaire. La conductivité de la phase solide montre

que les granulats C8, PA et BAK et les granulats ordinaires ont des conductivités similaires. Ces granulats carbonatés produit en recyclant des déchets et du CO₂ ont des faibles conductivités thermiques en raison de leurs porosités élevées.

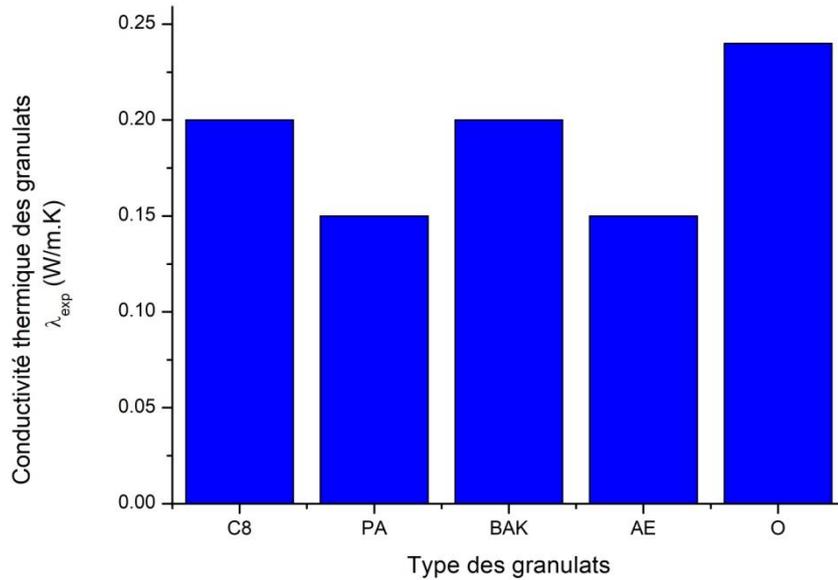


Figure III-34 : Conductivité thermique à 10°C des granulats secs.

Tableau III-12 : Conductivité thermique des granulats étudiés.

Granulats	C8	PA	BAK	AE	O
ε inter-particulaire	0.4	0.39	0.44	0.42	0.46
ε intra-particulaire	0.3	0.41	0.31	0.18	0.03
λ_{exp} (W/m.K)	0.2	0.15	0.2	0.15	0.24
λ_{agg} (W/m.K)	0.54	0.53	0.62	0.39	0.81
λ_s (W/m.K)	0.9	0.85	0.81	0.5	0.95

Nous avons réussi à établir une relation linéaire de la conductivité thermique des granulats en fonction de leurs porosités et ce avec un coefficient de corrélation $R^2=0.82$. La relation est exprimée par l'équation (42).

$$\lambda = 0.25 - 0.0014 n \quad (42)$$

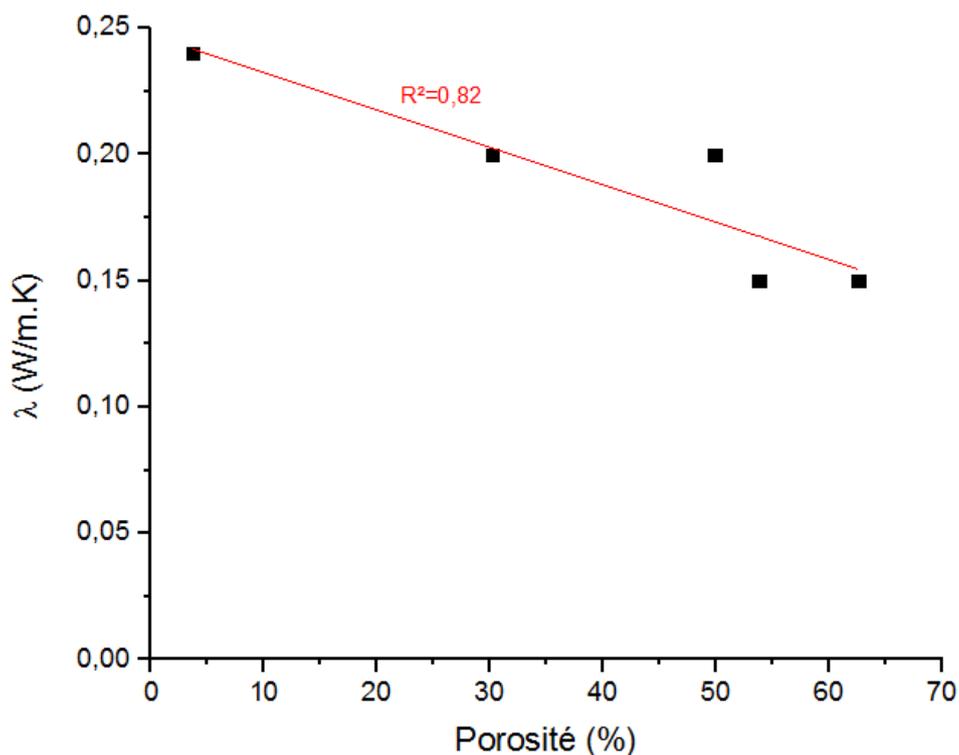


Figure III-35 : Conductivité thermique des granulats en fonction de la porosité des granulats.

VI. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présentés la caractérisation physique, mécanique et thermique des granulats carbonatés qui nous a permis d'évaluer la qualité de ces granulats comparés aux granulats de référence. Les principales caractéristiques de ces granulats sont résumées dans le tableau III-13. Les essais mettent en évidence des porosités importantes des granulats carbonatés. Les granulats C8 à base de REFIOM et ceux à base de cendres de biomasse BAK ont montré des performances mécaniques et thermiques acceptables. Les granulats à base de cendres de papiers PA présentent des performances mécaniques moyennes et de très bonnes propriétés thermiques comparables au granulat de référence d'argile expansée AE. Les relations entre les propriétés physiques (porosité, masse volumique) et mécaniques des granulats ont été établis avec des coefficients de corrélation élevés. On peut souligner que la masse volumique d'un granulat, sa résistance à l'écrasement et sa conductivité thermique ont une relation linéaire avec leurs porosités. L'augmentation de la porosité ainsi que l'absorption d'eau entraîne une diminution de la densité et de la résistance des granulats.

Tableau III-13 : Caractéristiques physiques, mécaniques et thermiques des granulats.

Type de granulats	ρ_{app} (kg/m ³)	n(%)	Ca (N/mm ²)	LA (%)	λ_{exp} (W/m.K)
O	1362	3.46	21.29	21	0.24
AE	698	17.46	8.89	30	0.15
C8	1096	29.08	9.67	52.5	0.2
PA	879	40.78	6.51	51	0.15
BAK	1086	29.37	8.86	53	0.2

A l'aide des relations linéaires, basées notamment sur la porosité, identifiées lors de cette campagne expérimentale, la prédiction des performances multiphysiques des granulats carbonatés par rapport au procédé de transformation initial (la carbonatation accélérée) peut être mise exergue. Ainsi, à l'aune du paramétrage de la ligne de production et des caractéristiques chimiques des cendres utilisés, il est possible de prédire les performances des granulats. Ces performances constituent ensuite le point de départ à la formulation de la composition des bétons, abordée dans le chapitre suivant.

CHAPITRE IV.

MODELE DE FORMULATION DU BETON A BASE DE GRANULATS CARBONATES

I. Introduction

Les différents granulats produits à partir des déchets d'incinérateurs ont été étudiés afin de déterminer leurs aptitudes à entrer dans la composition des bétons et ainsi pouvoir remplacer tout ou partie des granulats traditionnels. A l'aune de ces résultats, différentes formulations de bétons à base des granulats étudiés ont été étudiées. Les méthodes de formulation retenues sont présentées. Dans ce chapitre, les étapes de préparation des matériaux, le calcul des formulations des bétons, les étapes de préparation des gâchées, les types de bétons et la composition des différents bétons sont présentées. Enfin, nous nous intéressons aux propriétés à l'état frais des matériaux ainsi fabriqués, ainsi qu'aux propriétés physiques des bétons à l'état durci. L'objectif ici est de démontrer par l'expérience la possibilité de réaliser des bétons cohérents avec des spécifications ciblées.

II. Les bétons

Le béton est un assemblage de constituants dont nous pouvons citer :

- **La partie liante** : Elle se compose de ciment, d'eau et/ou d'additions minérales. Cette phase assure le passage du béton de l'état fluide à l'état solide.
- **Le squelette** : Cette phase est constituée des divers granulats. Elle occupe la plupart du volume du béton (environ 60%). Elle contribue aux propriétés du matériau à l'état frais et à l'état durci.
- **La partie liquide** : Elle contient l'eau et éventuellement un ou des adjuvants. L'eau participe au phénomène d'hydratation du ciment pour assurer la rhéologie à l'état frais du béton. Quant aux adjuvants, ils peuvent modifier les propriétés du matériau à l'état frais ou à l'état durci.
- **L'air** : Le béton contient toujours de l'air. Cette quantité d'air, variant de 1 à 2.5%, est piégée lors du malaxage du béton. L'air influe sur les performances mécanique, thermique et hygrique du matériau durci (**Franck, 2007**).

L'étude de la formulation de béton est faite afin de répondre à certaines caractéristiques imposées, à savoir la résistance mécanique, la maniabilité et la durabilité des bétons. Un béton léger a les mêmes constituants qu'un béton traditionnel à part les granulats traditionnels qui sont remplacés par des granulats légers. L'utilisation des granulats légers permet d'obtenir des bétons plus légers que les bétons courants, avec des meilleures qualités d'isolation thermique, et des répercussions non négligeables sur les masses des structures. Cependant, dans le cas des bétons légers, on doit prendre en considération la capacité d'absorption d'eau des granulats légers. La quantité d'eau qui permet l'hydratation du ciment dépend de l'eau absorbée par les granulats légers lors du malaxage. Cette quantité d'eau est essentiellement gouvernée par la porosité intraparticule des granulats légers. Deux cas s'imposent pour la formulation des bétons légers : soit on utilise des granulats secs, soit des granulats humidifiés préalablement avant le malaxage des constituants.

En utilisant des granulats secs pour la confection de bétons légers, G. Coquillat a trouvé que la résistance en compression s'améliore. En revanche, la maniabilité diminue par rapport à des granulats utilisés saturés en eau (**Coquillat, 1976**).

Dans le cas d'utilisation des granulats légers humidifiés avant leur utilisation dans le béton, il faut différencier les quantités d'eau à ajouter au mélange. Il faut prévoir deux quantités

d'eau : l'eau absorbée qui n'est pas considérée dans l'eau de gâchage, et d'autre part, l'eau adsorbée à la surface des granulats légers qui fait partie de l'eau de gâchage (**Holm, et al., 2004; Coquillat, 1976**).

L'approche donnée par T. Holm (**Holm, et al., 2004**) a pour but d'estimer la quantité d'eau provenant des granulats légers humidifiés ou saturés, qui interviendra dans l'eau de gâchage des bétons légers. Selon Holm, seule l'eau absorbée par la surface des granulats légers intervient dans l'eau de gâchage et agit sur le rapport E/C.

L'estimation de la quantité d'eau intervenant dans l'eau de gâchage est donnée par Holm, grâce à l'équation (43).

$$M_{AD} = M_T - M_{AB} \quad (43)$$

où :

- M_{AD} représente l'eau libre évaluée dans le rapport E/C ;
- M_T est la teneur en eau effective des granulats au moment de la fabrication de béton ;
- M_{AB} est la teneur en eau des granulats légers après séchage de la surface avec une serviette.

Afin d'éviter que les granulats légers n'absorbent une partie de l'eau de gâchage et diminuent la maniabilité du béton, les granulats légers préalablement séchés à l'étuve, sont immergés dans l'eau avant d'être utilisés dans la fabrication des bétons légers. Plus le temps d'immersion est grand, plus la teneur en eau des granulats légers est élevée. Selon l'hypothèse de Holm, un échantillon des granulats légers est prélevé trois heures avant le malaxage des constituants afin d'en déterminer la teneur en eau. Cet échantillon est laissé à l'air libre pendant trente minutes afin que les granulats légers s'égouttent. La teneur en eau des granulats légers est donc mesurée après 30 minutes d'égouttage de l'échantillon. Après cette période d'égouttage, la masse de l'échantillon est déterminée, notée m_1 , utilisée dans la détermination de M_T . L'échantillon est après séché à l'aide d'une serviette, puis replacé dans le récipient sec et la masse est mesurée, notée m_2 , utilisée pour déterminer M_{AB} . Enfin, l'échantillon est séché sur une plaque électrique pendant deux heures et la masse sèche m_s est mesurée.

Cette procédure permet de calculer les deux paramètres suivants des granulats légers au moment de la fabrication du béton :

- Teneur en eau effective des granulats légers : $M_T = \frac{m_1 - m_s}{m_s}$

- Teneur en eau des granulats légers, surface séchée : $M_{AB} = \frac{m_2 - m_s}{m_s}$

Les méthodes utilisées pour déterminer la composition des bétons traditionnels peuvent être utilisées pour fabriquer des bétons légers sous réserve de certaines corrections empiriques pour adapter quelques caractéristiques (consistance, compacité, densité ou résistance) aux valeurs désirées (**Arnould, et al., 1986**).

La cinétique d'absorption des granulats légers utilisés doit être prise en considération dans la formulation. Dans le cas des granulats légers, l'eau est absorbée au sein des particules alors que pour les granulats traditionnels, l'eau se trouve essentiellement en surface (**Holm, et al., 2004**). Ceci joue un rôle important quant à la formulation des mélanges de bétons légers.

Parmi les méthodes de composition les plus connues, nous pouvons citer celles de Dreux-Gorisse, de Baron-Olivier ainsi que celle de Delarard (bétonLab). Dans cette partie, nous citerons les matériaux utilisés pour la confection des bétons de notre étude ainsi que les méthodes de formulation utilisés et les propriétés physiques des bétons confectionnés.

III. Les matériaux utilisés

Les bétons sont constitués de granulats légers carbonatés et d'une matrice cimentaire. Nous citerons ici les matériaux utilisés lors de la confection des bétons de notre étude.

1. Le ciment

Le ciment utilisé est un ciment multi-usage CEMII/B 32.5 R CE NF produit par le groupe EQIOM-France. Il est composé de 65 à 79% de clinker, de 21 à 35% de laitier granulé de haut fourneau (S), calcaire (L ou LL) ou cendres volantes (V ou VV) et de 0 à 5 % de constituants secondaires. Pour assurer la régularité de la prise, il existe une faible quantité de sulfate de calcium. Sa masse volumique absolue est de 3.1 g/cm^3 .

2. Le sable

Le sable de cette étude est un sable local siliceux roulé de classe granulaire 0/5 mm de densité spécifique égale à 2.7 pour un module de finesse de 2.23. Le module de finesse est compris entre 2.2 et 2.8 ce qui le classe comme apte pour la confection de béton.

3. L'eau

L'eau de gâchage peut avoir une influence sur le temps de prise et l'évolution des résistances du béton. L'eau de gâchage utilisée pour la confection des différents bétons est une eau potable du réseau public reconnu acceptable pour la confection des différentes formulations de bétons.

4. Les granulats

Les granulats préalablement décrits dans les chapitres précédents sont ceux utilisés pour la confection des bétons. Leurs caractéristiques sont résumées au tableau III-13 précédemment présenté.

IV. Formulation et composition des bétons

Dans cette étude, nous visons à réaliser différentes formulations en faisant varier les granulats et la proportion des constituants. Ainsi, pour chaque type de granulat, nous étudions 4 fractions massiques différentes : 0.25, 0.5, 0.75 et 1 comparé à un béton de référence ordinaire sans éco-granulats. La comparaison des résultats des essais nous permettra de déterminer l'influence de ces paramètres sur les caractéristiques des bétons confectionnés. La première étape était de choisir les formulations étudiées. Il existe de nombreuses méthodes de formulation de bétons, Dreux Gorisse, Baron-Olivier, Bolomey, Abrams... qui sont essentiellement des méthodes empiriques. L'étude de la formulation du béton consiste dans le choix d'une composition optimale en granulats, en ciment et en eau afin de satisfaire les exigences recherchées. Il existe différentes approches pour formuler les bétons afin d'étudier l'influence des granulats sur le comportement des bétons. Chaque auteur choisit les paramètres fixés soit ouvrabilité constante, taux d'humidité des granulats ou la quantité d'eau (Arnould, et al., 1986), (Hafidh, 2012), (Zingg, 2013).

Dans le cadre de nos travaux, les différents bétons ont été formulés avec la méthode de Dreux-Gorisse et celle de Baron-Olivier pour comparer les deux méthodes et choisir la méthode qui semble la plus adaptée aux granulats carbonatés. Les principes de ces deux méthodes seront présentés en Annexes A et B.

L'étude expérimentale passe en premier lieu par la formulation théorique des différents bétons (en fonction du protocole retenu). Puis ces formulations sont réalisées expérimentalement au laboratoire.

Suite à la formulation théorique par les deux méthodes (Dreux-Gorisse et Baron-Olivier) du béton à base des granulats classiques (sable roulé et gravillon ordinaire O), une série d'essais d'ajustement et de correction de la formule du mélange a été effectuée. Les compositions issues des deux méthodes suivant la démarche des méthodes détaillées en Annexes A et B sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau IV-1 : Composition théorique du béton à base de GO par les deux méthodes de formulation.

Méthodes de formulation	Dreux-Gorisse		Baron-Olivier	
	%	Quantité (kg/m³)	%	Quantité (kg/m³)
Ciment	15	350	16	365.75
Granulat GO	47	1074.166	45	1024.89
Sable	29	673.92	29	670.8
E _{eff}	9	205.9	9	199.5
Air	-	-	1	21
Volume Béton (m ³)	1001		1000	
Densité	2304		2282	
E/C	0.59		0.55	
G/S	1.59		1.53	
Correction des formules				
Ciment	15	350	16	365.75
Granulat GO	48	1121.41	45	1024.89
Sable	30	703.56	29	670.80
E _{eff}	7	175	9	199.50
Air	-	-	1	21
Volume Béton (m ³)	1000		1000	
Densité	2350		2282	
E/C	0.5		0.55	
G/S	1.59		1.53	
Méthodes de formulation	Dreux-Gorisse		Baron-Olivier	

Quelle que soit la méthode utilisée, la composition théorique des bétons ne peut pas parfaitement correspondre à la composition souhaitée. La qualité des constituants (forme, porosité, type etc.) influe sur la qualité et sur les performances des bétons.

Dans un second temps, des formulations suivant les protocoles de Dreux-Gorisse et Baron-Olivier ont été réalisées avec des granulats carbonatés de type PA, en substituant la totalité de la fraction de gravillon ordinaire. Des essais préliminaires de caractérisation des propriétés à l'état frais et à la résistance mécanique à 28 jours ont été menés afin de comparer les deux méthodes de formulation.

Tableau IV-2 : Propriétés des bétons à base de PA formulés par les deux méthodes.

Propriétés mécaniques	Dreux-Gorisse	Baron-Olivier
Résistance en compression à 28 jours (MPa)	18.25	15.34
Résistance en flexion à 28 jours (MPa)	2.1	1.8
SLUMP (mm)	143	63
Masse volumique à l'état frais (kg/m ³)	1820	1885

En comparant les propriétés des bétons à base de PA, nous avons noté des résistances mécaniques plus faibles dans le cas de formulation par la méthode de Baron-Olivier qui s'accompagne par une réduction des résistances en flexion. Cette méthode n'est donc pas adéquate pour formuler des bétons à base de nos granulats carbonatés, en raison de la plus faible compacité du squelette granulaire. La quantité d'eau dans le béton est plus importante que celle donnée par Dreux-Gorisse conduisant à une forte ouvrabilité (14.3 cm) et à une perte de résistance mécanique. Les bétons formulés par la méthode de Baron-Olivier sont sous-dosés en granulats et sur-dosés en ciment ce qui est de loin un extremum économique : ils ne sont donc pas fiables économiquement.

Cette étude préliminaire a permis de confronter les deux méthodes de formulation des bétons et de comparer expérimentalement leurs propriétés à l'état frais et leurs résistances mécaniques. Selon les résultats trouvés, bien qu'ils soient limités, nous pouvons relever les avantages et les inconvénients des deux méthodes

Tableau IV-3 : Avantages et inconvénients des deux méthodes de formulation

Méthode de composition	Inconvénients	Avantages
Dreux-Gorisse	<ul style="list-style-type: none"> ✓ % de gravier plus important que le% du sable : ✓ Méthode demandant des corrections. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Rapport G/S=1.59 appartenant à l'intervalle normatif [1.2 ; 1.7] ; ✓ Quantité de ciment moins importante que celle donné par Baron-Olivier sachant que le ciment est plus cher que les granulats (aspect économique) ; ✓ Quantité de granulats plus importante que celle donné par Baron-Olivier ce qui donne des propriétés thermiques pour le béton léger plus intéressantes ;
Baron-Olivier	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Dosage de ciment plus élevé. Prix du ciment plus cher que celui des granulats. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Rapport G/S=1.53 appartenant à l'intervalle normatif [1.2 ; 1.7] ; ✓ Prend en compte l'air dans la composition ✓ Méthode prend en compte les nouvelles normes de béton.

L'intérêt de cette première campagne expérimentale était de retenir, de manière empirique, une méthode de formulation relativement adaptée pour répondre aux besoins attendus tout en optimisant la quantité des granulats naturels utilisés (compte tenu de l'appauvrissement des ressources naturels). Les critères de choix de la méthode utilisée sont essentiellement les résistances mécaniques (en comparaison aux valeurs seuils de définition d'un matériau porteur) ainsi que l'ouvrabilité des bétons.

A partir des résultats trouvés lors de cette étude expérimentale et en se basant sur les conclusions tirées précédemment, nous pouvons conclure que la méthode de Dreux-Gorisse semble la plus adéquate pour formuler des bétons à base de granulats carbonatés à performances mécaniques suffisantes, comparée à celle donnée par Baron-Olivier.

Finalement, la méthode choisie est basée sur la méthode de Dreux-Gorisse en l'adaptant à nos granulats carbonatés prenant en compte leurs absorptions d'eau. Un remplacement partiel ou total des granulats traditionnels a été réalisé tout en maintenant une consistance semi-plastique pour tous les bétons. Les données de base prises en considération pour la formulation de nos bétons sont donc :

- une classe de béton cible de 25 MPa ;
- un dosage en ciment constant de 350 kg par 1 m³ de béton ;
- un rapport E/C constant égal à 0.5 ;
- une même consistance semi-plastique de classe S₂ mesurée au cône d'Abrams.

L'annexe C présente en détail la méthodologie de formulation proposée, mixant les performances de l'approche de Dreux-Gorisse avec les spécificités de la méthode de Baron-Olivier au regard de la forte absorption d'eau des granulats carbonatés.

L'eau efficace est calculée en tenant compte de l'eau du mélange et de celle absorbée par les granulats. Pour chaque type de béton, une fiche de formulation a été établie sur Excel définie par son nom et sa date de fabrication. Les quantités des constituants sont déterminées pour 1m³ de béton, on déterminera ainsi les quantités nécessaires pour le volume des gâchées à fabriquer. Nous avons considérés cinq types de granulats avec différentes fractions massiques. Au final, 17 compositions différentes de bétons ont été réalisées, en intégrant les bétons de granulats carbonatés et les deux bétons avec des granulats ordinaires et d'argile expansée. Les pertes dues aux manipulations successives du béton ont été prises en compte à hauteur de 15%, au regard des volumes de gâchées réalisées. Les compositions des différents bétons fabriqués sont présentées au tableau IV-4 ci-dessous.

Tableau IV-4 : Composition des bétons de granulats carbonatés et de références.

Composition des bétons (kg/m ³)		Ciment	Eco-granulats	Granulats ordinaires	Sable	Eau efficace	E/C	Affaissement (mm)
% C8	100	350	1007	-	639	227	0.5	80
	75	350	755	252	639	214	0.5	70
	50	350	503	503	639	201	0.5	70
	25	350	252	755	639	188	0.5	80
% PA	100	350	869	-	658	275	0.5	70
	75	350	652	217	658	267	0.5	80
	50	350	435	435	658	259	0.5	70
	25	350	217	652	658	221	0.5	80
% BAK	100	350	1069	-	639	249	0.5	80
	75	350	817	267	649	220	0.5	70
	50	350	534	534	639	212	0.5	70
	25	350	267	817	639	193	0.5	80
% AE	100	350	475	-	551	261	0.5	90
	75	350	356	119	532	219	0.5	90
	50	350	238	238	532	204	0.5	80
	25	350	119	356	570	190	0.5	80
% O	100	350	-	1103	755	175	0.5	70

L'organigramme suivant présente le protocole expérimental qui a été suivi durant les phases de fabrication des bétons. Les échantillons réalisés sont conservés dans une ambiance relativement stable en humidité relative, autour de 60 à 80%, pendant 7, 28, 90 et 365 jours afin d'identifier l'évolution des performances des bétons en fonction du temps de séchage.

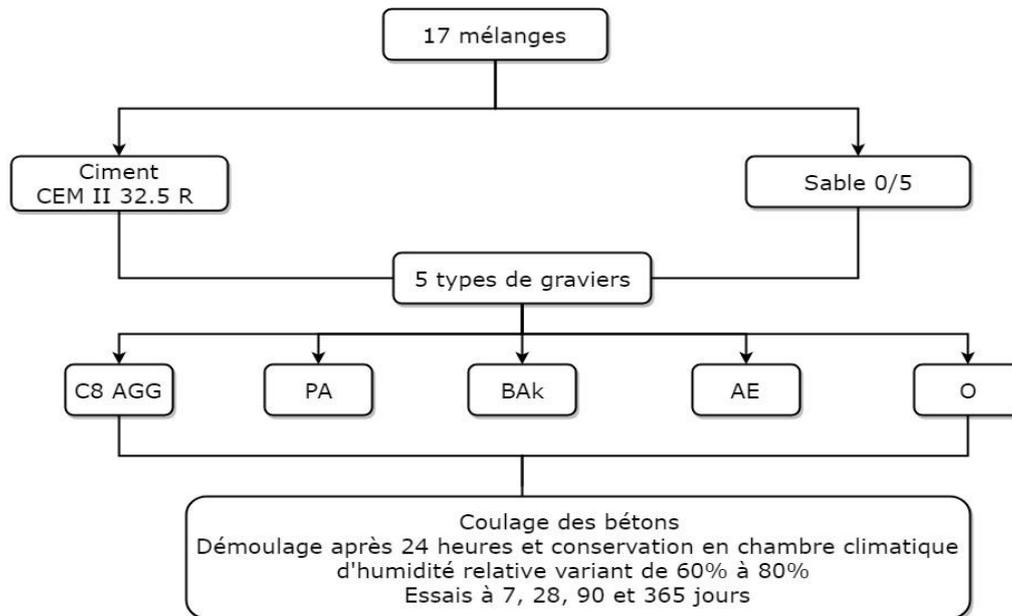


Figure IV-1 : Protocole expérimental suivi.

V. Confection des éprouvettes

Pour chaque formulation, nous avons confectionnés 12 éprouvettes 11x22 cm destinées pour les essais mécaniques de compression à 7, 28, 90 et 365 jours, 12 éprouvettes 7x7x28 cm pour les essais de traction indirecte par flexion trois points, 6 éprouvettes 4x4x16 cm pour les essais d'absorption d'eau par capillarité et par immersion, 1 éprouvette 25x25x6 cm pour les essais thermiques et 1 éprouvette cubique 10x10x10 cm pour les tests de capacité tampon hygrique. Tous les essais expérimentaux à 7, 28, 90 et 365 jours sont réalisés sur des éprouvettes séchées à l'air libre dans une chambre de conservation d'humidité relative variant de 60 à 80%. Les échantillons ont été préparés de la même gâchée afin de limiter les biais introduit éventuellement par l'opérateur. Pour ne pas influencer le rapport E/C, les granulats sont humidifiés avant le malaxage de bétons. La quantité d'eau nécessaire à l'absorption d'eau des granulats est ajoutée. Avant le malaxage des constituants, le malaxeur est également humidifié. L'ordre d'incorporation des constituants est le suivant : granulats légers préalablement humidifiés, sable et ciment. On mélange à sec pendant 1 minute puis l'eau est ajoutée petit à petit au cours du malaxage durant 2 minutes. Le temps de malaxage ne doit pas être trop long pour que les granulats légers ne s'endommagent pas, au regard de leur faible résistance aux chocs et à la friction réciproque (essai Los Angeles). Les moules cylindriques sont remplis par le béton frais en trois couches vibrées alors que les autres sont remplis en deux couches vibrées. La vibration du béton est assurée par une table vibrante, d'une durée de

10 secondes pour chaque couche. Le temps de vibration ne doit pas être important pour éviter la remontée des granulats légers à la surface. Toutes les éprouvettes ont été démoulées après 24h du coulage et sont ensuite conservés dans une chambre de conservation d'humidité relative variant entre 60 et 80% jusqu'au moment des essais.

VI. Principales propriétés physiques du béton

1. Masse volumique à l'état frais

Les essais d'affaissement au cône d'Abrams et la masse volumique ont été réalisés pour chaque gâchée lors du malaxage du béton. Les valeurs de masses volumiques à l'état frais déterminées par mesure de la masse et du volume d'un récipient plein de béton. Elles sont utilisées afin de corriger la composition des bétons. Nous mesurons l'ouvrabilité (le SLUMP) à l'aide du cône d'Abrams selon la norme NF EN 12350-2 afin de vérifier d'obtenir une ouvrabilité semi-plastique pour tous les types de bétons. Les valeurs de l'affaissement ainsi que les masses volumiques sont résumées dans le tableau IV-5 qui suit.

Tableau IV-5 : Caractéristiques des bétons à l'état frais.

Caractéristiques des bétons		Affaissement (mm)	Masse volumique à l'état frais (kg/m ³)	SLUMP (classe)
% C8	100	80	2110	S2
	75	70	2170	S2
	50	70	2260	S2
	25	80	2320	S2
% PA	100	70	2020	S2
	75	80	2060	S2
	50	70	2160	S2
	25	80	2290	S2
% BAK	100	80	2160	S2
	75	70	2180	S2
	50	70	2210	S2
	25	80	2230	S2
% AE	100	90	1860	S2
	75	90	1900	S2
	50	80	1920	S2
	25	80	1960	S2
% O	100	70	2340	S2

2. Masse volumique du béton à l'état durci

Les masses volumiques à l'état durci ont été mesurées lors de l'essai de compression sur des éprouvettes séchées à l'air libre. Elles ont été déterminées afin d'étudier l'effet des éco-granulats sur la densité des bétons. En comparant les résultats, il est évident que le béton contenant que des granulats ordinaires aient une masse volumique de 2300 kg/m^3 qui est supérieure à la masse d'un béton fabriqué de 100% de granulats carbonatés. Les masses volumiques des bétons à base de granulats carbonatés sont encadrées par celle des bétons de référence : béton ordinaire (2300 kg/m^3) et béton d'argile expansée (1750 kg/m^3). Il y a une bonne corrélation de type linéaire entre les mesures des masses volumiques du béton avec le pourcentage d'éco-granulats introduit dans la composition (figure IV-2).

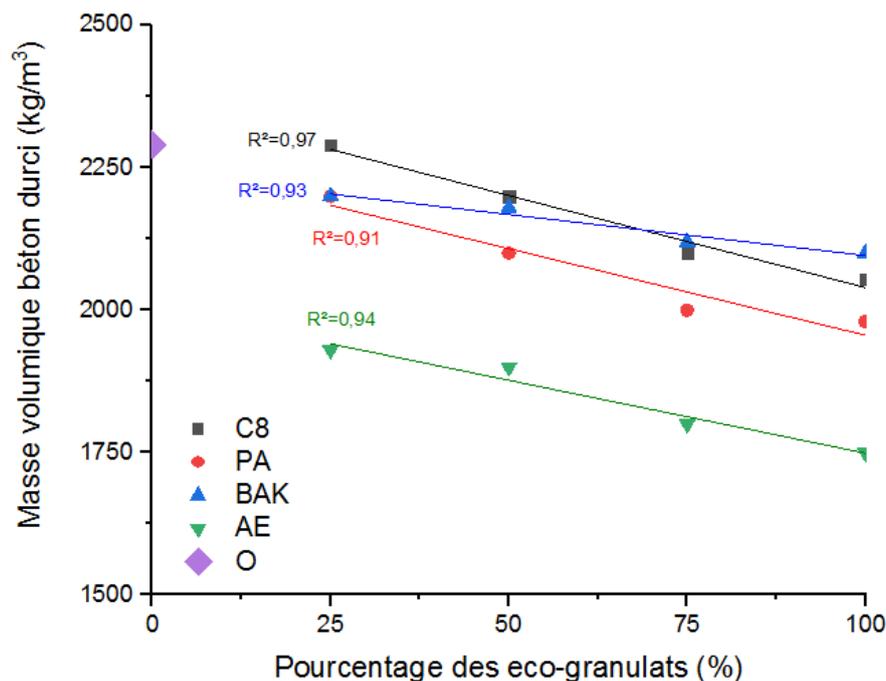


Figure IV-2 : Masse volumique du béton durci en fonction du pourcentage des éco-granulats.

Comme présenté au cours de la première partie du manuscrit, les propriétés des bétons (essentiellement mécaniques) dépendent fortement de leurs masses volumiques. Le remplacement des granulats traditionnels par des granulats légers provoque une augmentation de la porosité des bétons donc une diminution de la masse volumique.

VII. Conclusion

Différentes méthodes de formulation des bétons sont couramment utilisées dans l'industrie du béton. Dans la grande majorité des cas, pour des bétons dits courant, la méthode de Dreux-Gorisse est employée. Dans le cas des bétons légers, la méthode de Baron-Olivier permet de s'adapter aux propriétés des granulats poreux. Toutefois, cette dernière ne semble pas adaptée à nos granulats carbonatés, conduisant à des résistances mécaniques plus faibles dues à un excédent d'eau dans la formulation (l'essai de consistance met en exergue la forte ouvrabilité obtenue avec la méthode Baron-Olivier).

A l'aune de ces résultats préliminaires, une méthode de formulation adaptée, basée sur le principe de Dreux-Gorisse est proposé ici. Cette méthode permet de remplacement de tout ou partie des granulats dits « nobles » dans la composition d'un béton hydraulique, en conservant les exigences de mise en œuvre du matériau, à l'état frais, à savoir une consistance semi-plastique lors de l'essai au cône d'Abrams.

Enfin, le remplacement de granulats ordinaires par des granulats carbonatés engendre une évolution de la masse volumique du béton réalisé. Cette évolution est linéaire, directement proportionnelle à la quantité de granulats carbonatés introduite lors de la formulation. Au regard des résultats mis en lumière grâce à l'étude de la bibliographique, l'évolution de la masse volumique du béton impactera directement les performances mécaniques, voire thermiques et hygriques des bétons. Ainsi, l'identification de ces propriétés confirmera ces premières observations et nous conduira vers la prédiction empirique des caractéristiques des bétons de granulats carbonatés.

Une large campagne expérimentale a été menée et a permis d'identifier les caractéristiques physiques, mécaniques et thermiques des granulats carbonatés, comparativement aux propriétés des granulats ordinaires. Ces granulats ont présenté des porosités importantes, des performances mécaniques suffisantes et des bonnes propriétés thermiques confrontés aux granulats de référence. Les principales caractéristiques de ces granulats à savoir la masse volumique, la résistance à l'écrasement et la conductivité thermique sont fortement liées à leur porosité. A l'aide de relations que nous avons pu mettre en lumière, il est possible de prédire les performances multi-physiques des granulats qui constituent la base de la formulation des bétons. Une méthode de formulation, combinant les approches de Dreux-Gorisse et de Baron-Olivier a été proposée et utilisée pour formuler nos bétons en remplaçant tout ou une partie des granulats ordinaires par des granulats carbonatés. Les premières analyses des caractéristiques des bétons à l'état frais mettent en exergue une évolution linéaire de la masse volumique en fonction du pourcentage des granulats écologiques. Cette évolution a un impact sur les performances mécaniques, thermiques et hygriques des bétons confectionnés, qui sont analysées au cours de la partie suivante.

PARTIE III.

ANALYSE PERFORMANTIELLE DES

PROPRIETES DES BETONS

Après avoir formulé les différents types de bétons. Nous procédons à la caractérisation mécanique, thermique et hygrique des bétons formulés, à l'échelle mésoscopique. Cinq types de granulats ont été utilisés pour les différentes formulations et, afin d'optimiser les formulations, nous avons fait varier les pourcentages massiques des granulats. Les études ont été menées sur cinq fractions massiques différentes de granulats carbonatés : 0, 25, 50, 75 et 100%. Dans un premier temps, les propriétés mécaniques ont été déterminées, à savoir les résistances mécaniques, résistance à la flexion, module d'Young. Dans un second temps, les propriétés thermiques, puis hygriques ont aussi été identifiées et comparés aux résultats déduits par des modèles de prédiction. A travers les résultats expérimentaux obtenus, nous étudions l'influence des différents paramètres sur le comportement des bétons.

CHAPITRE V.

ANALYSE DES PROPRIETES MECANIQUES DES BETONS

I. Introduction

Ce chapitre est consacré à l'identification des propriétés mécaniques des bétons étudiés, à base de différents taux de granulats carbonatés. Dans un premier temps, les résistances mécaniques en compression et en flexion sont mesurées. Puis, nous nous sommes intéressés à l'estimation des modules d'élasticité. Enfin, des observations au microscope électronique à balayage sont aussi menées afin de caractériser la zone d'interface entre la matrice et le granulats pour les différents bétons considérés. A travers ces résultats, nous allons étudier l'influence du type des granulats et de leurs pourcentages dans la matrice sur le comportement mécanique des bétons. Des résultats de modèles prédictifs sont également confrontés aux résultats expérimentaux afin d'identifier les théories utilisables pour la mise en place d'un modèle de formulation prédictif empirique et ainsi, permettre aux donneurs d'ordre d'envisager l'emploi de ces granulats carbonatés en lieu et place des granulats « nobles ».

II. Compression uni-axiale : résistance à la rupture

Les essais de compression sont réalisés à 7, 28, 90 et 365 jours sur des éprouvettes cylindriques de dimension (11x22) cm². Pour chacune des formulations, 3 éprouvettes ont été utilisées afin de déterminer la résistance à la compression. Le dispositif d'essai utilisé est une presse électromécanique de puissance nominale de 250 kN de type SHIMADZU équipée d'un capteur de force de 250 kN et de deux capteurs de déplacements de technologie LVDT (voir figure V-1). La machine est pilotée en déplacement afin d'identifier le comportement post-pic du matériau. Le plateau supérieur est équipé d'un système rotulé afin d'assurer un contact parfait avec l'échantillon. De plus, la rotule permet de limiter les problèmes de perpendicularité et planéité entre les surfaces.

La presse est reliée à un système d'acquisition pour enregistrer les données à une fréquence de 10 Hz. La vitesse de chargement est de 1 mm/min. Une pré-charge de 0.4 kN est appliquée sur l'éprouvette afin d'assurer un contact parfait avec les plateaux de la presse. Avant l'essai, les éprouvettes sont surfacées à l'aide d'une surfaceuse semi-automatique. Le but du surfacage est d'obtenir des surfaces de chargement planes et parallèles. La planéité des surfaces garantit l'absence de sur-contraintes qui peuvent endommager le matériau et par conséquent conduire à une rupture prématurée de l'échantillon (et donc à mésestimer la résistance en compression). Pour déterminer l'influence des granulats sur les propriétés mécaniques des bétons confectionnés, des éprouvettes cylindriques ont été fabriquées avec une matrice identique et différents pourcentages de granulats carbonatés. Les bétons formulés sont comparés à des bétons de référence : un béton traditionnel fabriqué à base de granulat naturel et un béton léger d'argile expansée de type LECA.

En raison de leur résistance mécanique plus élevée, les essais sur les bétons ordinaires ont été menés à l'aide d'une presse hydraulique à pression d'huile de type TREBEL de capacité nominale de 2600 kN, pilotée en déplacement. Au cours de l'essai, le déplacement entre les deux plateaux est enregistré à l'aide des trois capteurs de type LVDT. Les échantillons de béton traditionnel ont subi le même protocole de préparation que les bétons de granulats carbonatés, et ont été conservés dans les mêmes conditions de stockage.



Figure V-1 : Essai de compression uniaxiale.

L'analyse de la rupture des éprouvettes de bétons de granulats carbonatés montre que, sous chargement en compression uni-axiale, la rupture est caractérisée par plusieurs plans parallèles au chargement. Du fait de la masse volumique faible des granulats et la bonne adhérence entre la matrice et granulat due à leur structure poreuse, les ruptures sont fragiles et plutôt mixtes : fissuration au niveau des granulats (Arnould, et al., 1986) et/ou décollement des granulats de la matrice cimentaire. Dans le cas des bétons légers, les granulats semblent moins résistants que la matrice. Les coques restent intactes et solidaires à la matrice tandis que l'intérieur des granulats se détache de la matrice. Ces modes de rupture ont été aussi rencontrés par (KE, 2008). Nous pouvons voir sur la figure V-2 le mode de rupture des différents bétons étudiés.

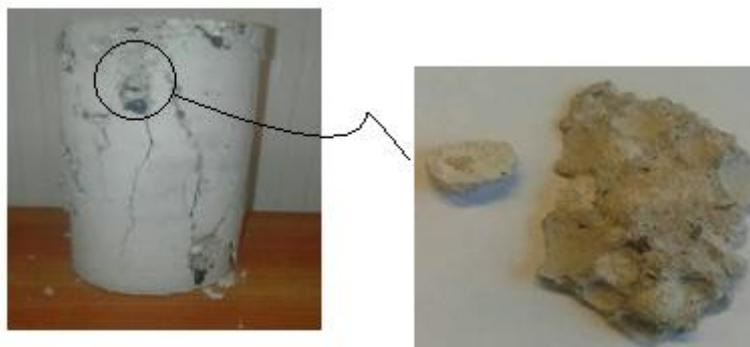


Figure V-2 : Rupture des éco-bétons.

Au contraire du béton ordinaire, la propagation des fissures ne se fait pas à l'interface entre le ciment et les granulats. La propagation de fissuration est parallèle à la direction de la charge mais par rupture ou par décollement des granulats légers. Ceci confirme la nécessité

d'une étude de la microstructure de la zone d'interface entre les granulats et la matrice, par microscope électronique à balayage. Les résultats seront exploités afin d'analyser l'influence des granulats sur la résistance à la rupture des bétons selon la qualité de la matrice. Ce qui sera aussi intéressant est de déterminer l'épaisseur de la coque extérieure et l'interconnectivité des pores des granulats, ils ont certainement une influence sur le comportement mécanique des bétons.

L'interprétation des résultats des essais de compression sur les éprouvettes de béton doit prendre en considération les caractéristiques de la machine d'essai utilisée, notamment la complaisance de la presse. Ainsi, conformément à la norme, il est possible d'identifier le module d'élasticité en compression uni-axiale. Les résultats des essais de compression sont déterminés à partir de 3 éprouvettes pour chaque formulation. A 28 jours, les écarts types varient entre 0.13 et 2.53 MPa, ce qui montre une faible dispersion des résultats. Les résistances obtenues varient entre 14 et 33 MPa.

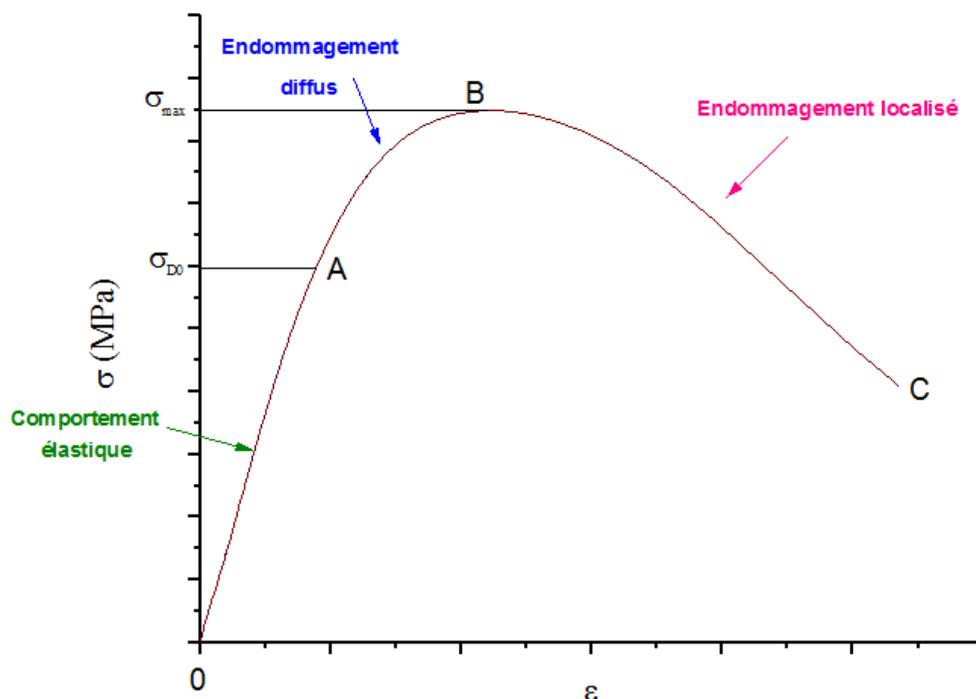


Figure V-3 : Phases de comportement d'un béton étudié.

Différentes recherches s'accordent sur la description du phénomène de l'apparition, la propagation et l'agrandissement des fissures. En faisant augmenter la charge progressivement, 3 phases distinctes peuvent être observées (figure V-3) :

- **Phase OA** : Dans cette zone, le béton ne présente aucune fissuration. Il présente un comportement élastique, linéaire ou non linéaire, le béton subit une déformation temporaire. Dans le cas où nous arrêtons l'essai lors de cette phase, le matériau reprend sa forme initiale.
- **Phase AB** : Des microfissures longitudinales apparaissent. Le matériau subit une déformation plastique. Cette déformation est permanente. Le module d'élasticité diminue progressivement.
- **Phase BC** : C'est une zone de rupture qui peut être fragile ou ductile. Des fissures verticales apparaissent à partir de la partie centrale de l'éprouvette. L'endommagement est localisé et l'éprouvette rompt.

L'évolution de la résistance à la compression à 28 jours en fonction du pourcentage d'éco-granulats dans la matrice sur présentée sur la figure V-4. Une relation linéaire décroissante avec un coefficient de corrélation supérieur à 0.6 a été établie entre la résistance à la compression et le pourcentage des éco-granulats contenue dans le mélange.

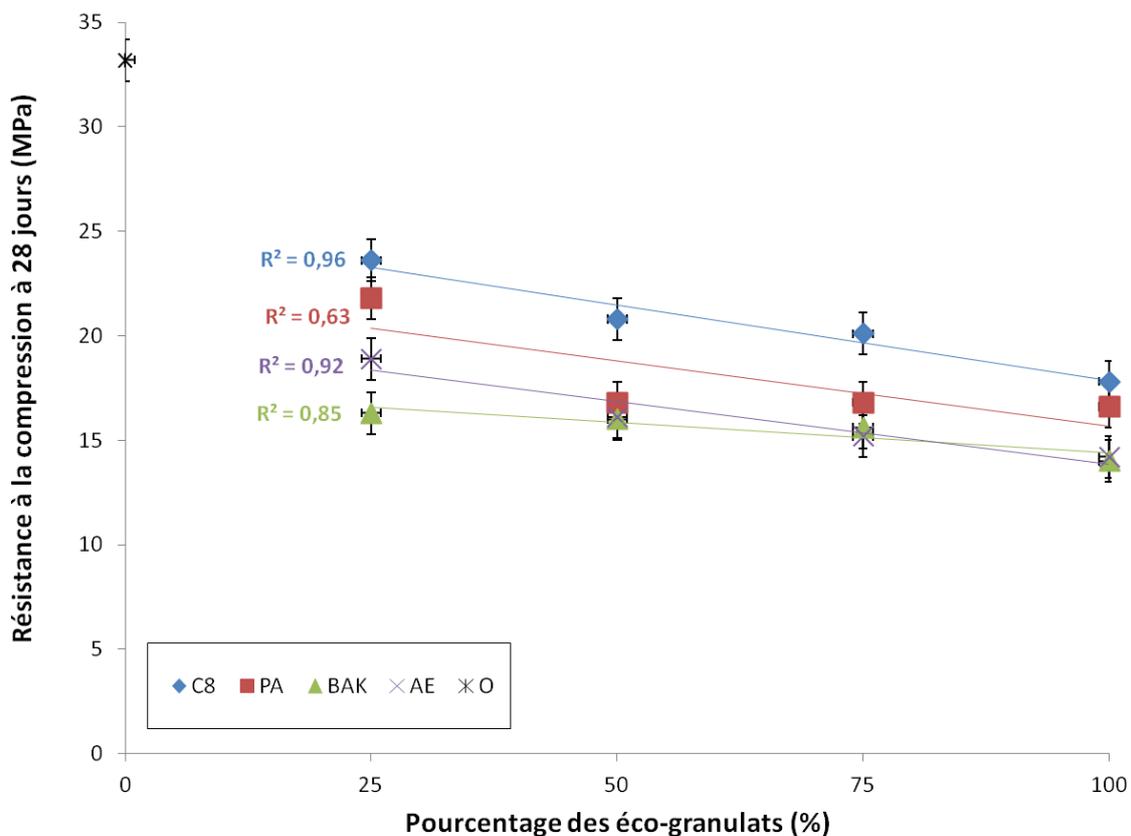


Figure V-4 : Résistance à la compression en fonction du pourcentage des éco-granulats.

Dans notre étude, dans le cas de bétons à base de granulats de déchets de biomasse et de béton d'argile expansée, nous avons noté des résistances en compression similaires de 14 MPa à 28 jours. Ces bétons sont produits à partir de granulats dont la résistance à l'écrasement en vrac est égale à 8.8 MPa. Ainsi, la figure V-5 montre l'évolution de la résistance en compression à 28 jours en fonction de la résistance en vrac des granulats. Une relation linéaire entre ces deux paramètres semble se dégager, pour un rapport E/C identique. Plusieurs études montrent que de multiples autres paramètres entrent en jeu lors de la rupture en compression, à savoir les caractéristiques physiques et chimiques des granulats et leurs influences sur la zone d'interface matrice/granulat (Calais, 2013). Pour les granulats carbonatés, l'utilisation de la résistance en vrac semble néanmoins être un bon indicateur de la résistance à la compression du béton.

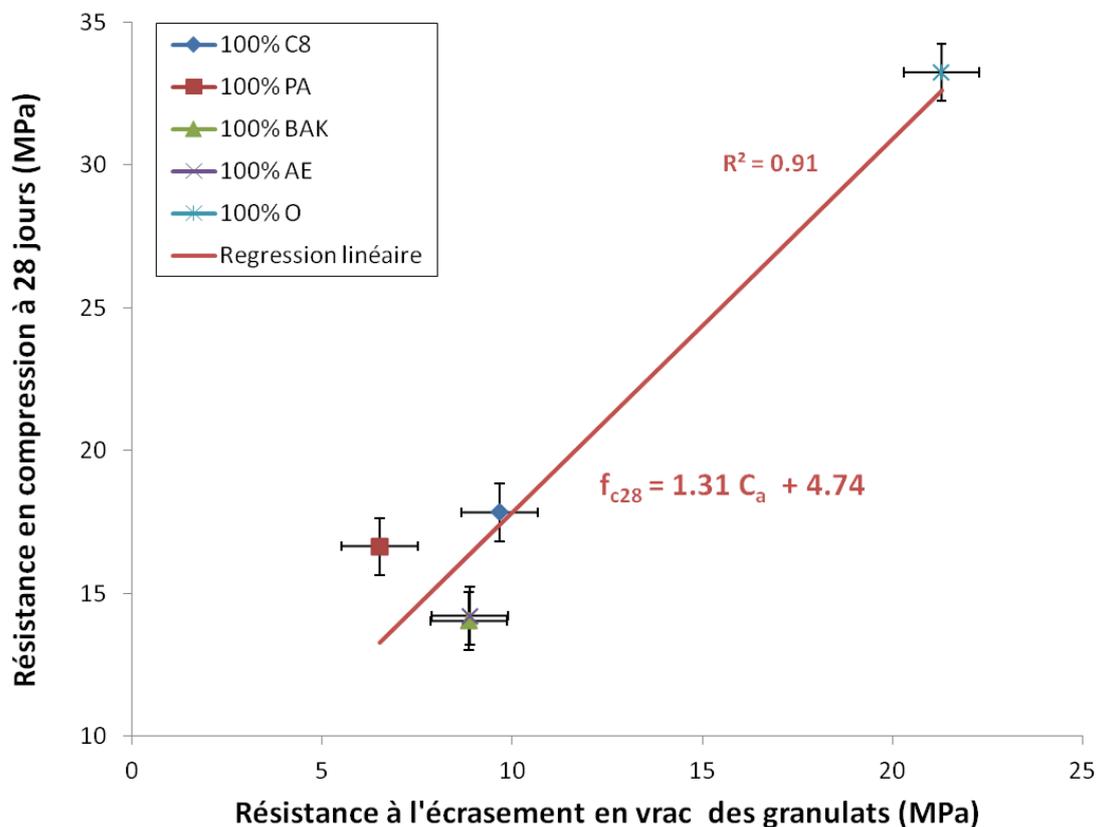


Figure V-5 : Résistance en compression des bétons en fonction de la résistance à l'écrasement en vrac des granulats.

Le tableau V-1 présente les résultats expérimentaux des résistances à la compression des bétons étudiés à différents âges (Bogas, et al., 2014) (GaneshBabu, et al., 2003). Comme prévu, la résistance à la compression augmente avec l'âge. Après les 28 premiers jours, le

développement de la résistance est plus lent, avec un gain de l'ordre de 27% avec un séchage d'une année complète (quand le béton traditionnel montre une augmentation de 27% de la résistance mécanique en une année).

Tableau V-1 : Évolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge.

Type de béton		Résistance à la compression à 7 jours (MPa)	Résistance à la compression à 28 jours (MPa)	Résistance à la compression à 90 jours (MPa)	Résistance à la compression à 365 jours (MPa)
% C8	100	7.7	17.8	19.9	23.8
	75	8.4	20.1	21.7	25.4
	50	10.9	20.8	22	26.1
	25	19.1	23.6	23.4	26.2
% PA	100	15.2	16.6	17.1	19.8
	75	15.3	16.8	17.2	18.0
	50	15.4	16.8	17.9	20.3
	25	18.5	21.8	24.8	25.3
% BAK	100	10.3	14	17.6	20.6
	75	11.9	15.6	18.2	22.6
	50	12.3	16	19.6	21
	25	12.7	16.3	19.8	21.1
% AE	100	13.2	14.2	16.1	19.6
	75	14.3	15.2	16.2	20.3
	50	14.4	16.1	16.8	18.8
	25	17.2	18.9	20.8	21.4
% O	100	26.9	33.2	38.5	42.2

Plus le pourcentage des éco-granulats est élevé plus la résistance à la compression est faible. Comparant à un béton ordinaire, la résistance mécanique à 7, 28, 90 et 365 jours des éco-bétons de granulats carbonatés est plus faible mais reste intéressante supérieure à 15 MPa à 28 jours (limite d'un matériau considéré comme porteur). Cela est dû à la porosité des granulats notamment dans le cas où le pourcentage des granulats légers est élevé par rapport aux granulats ordinaires. L'absorption d'eau des granulats influe négativement sur les propriétés mécaniques des bétons. Pour un pourcentage de granulat identique, la résistance à la

compression est meilleure pour un granulats peu absorbant. Les caractéristiques mécaniques de ces éco-bétons sont inférieures à celles d'un béton ordinaire mais restent supérieures à 15 MPa à 28 jours d'où la possibilité de leur utilisation dans une structure porteuse de construction.

Sur certaines éprouvettes de composition 100% C8 et 75% C8 (figure V-6), lors de leurs conservations dans la chambre humide, nous constatons l'apparition d'une mousse blanche qui peut être du salpêtre, une sorte de sels minéraux essentiellement des nitrates de potassium. Les granulats de REFION ont la particularité d'attirer l'humidité de l'air ambiant, notamment dans le cas où la ventilation de la salle de conservation est de mauvaise qualité avec une humidité relative importante (de l'ordre de 80%). Ce phénomène peut être dû à la composition des granulats de C8 qui sont produits à base de déchets de REFION contenant des carbonates de calcium. Le salpêtre est engendré par développement des bactéries qui se nourrissent des carbonates de calcium contenu dans le matériau. La migration de l'eau et de l'humidité se fait à travers les pores provoquant le processus de formation du salpêtre.



Figure V-6 : Salpêtre sur une éprouvette de béton.

Afin d'estimer les résistances en compression, nous confrontons les résultats expérimentaux aux formules empiriques qui relient la résistance en compression aux masses volumiques des bétons. Cette prédiction est faite selon les formules (44) et (45) suivantes :

$$f_{cm28} = 50 (\rho_{bs} - 1.7)[BPEL 91] \quad (44)$$

$$f_{cm28} = 50 (\rho_{bs} - 1.45)(Arnould, et al., 1986) \quad (45)$$

avec ρ_{bs} est la masse volumique après séchage à l'étuve exprimée en g/cm^3 .

Les deux formules théoriques ne prédisent pas de manière satisfaisante les résistances en compression et nous proposons donc l'utilisation d'une approche empirique modifiée de la manière suivante :

$$f_{c28} = 18(\rho_{bs} - 1.03) \quad (46)$$

Les formules issues du BPEL91, des travaux de Arnould et al. et de notre proposition mènent à des écarts moyens respectives de 2.6%, 6.3% et 1.24 %. Notre approche prédit au mieux les résultats expérimentaux des résistances en compression des bétons de granulats carbonatés (figure V-7). En revanche, notre approche n'est pas adaptée aux formulations traditionnelles, comme on peut le voir avec la résistance en compression du béton dont la masse volumique est de 2300 kg/m³.

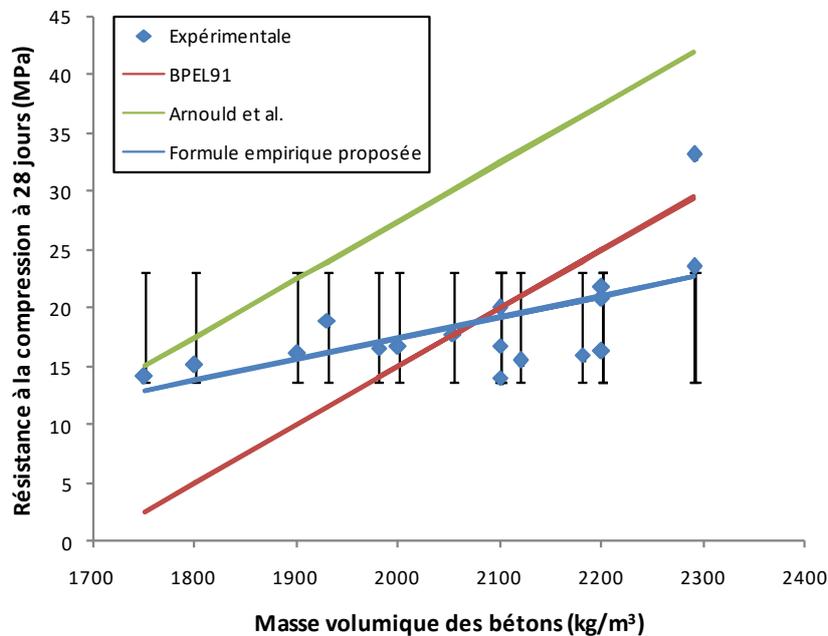


Figure V-7 : Confrontation des résistances en compression expérimentales et théoriques.

III. Module d'élasticité en compression

Le module d'élasticité en compression est identifié grâce aux essais mécaniques précédents (essais de compression uniaxiale à 28 jours), par l'exploitation des déformations subies par les échantillons. Les résultats des modules d'Young présentés ici sont la moyenne des valeurs effectués sur 3 éprouvettes. Comme le montre la figure V-8, le module d'élasticité est inversement proportionnel au pourcentage d'éco-granulats présent dans le mélange. Par exemple, le module d'élasticité du mélange de référence est de 37.4 GPa, valeur typique du

béton conventionnel, tandis que celle du mélange à 100% de PA est de 23,6 d'où une diminution d'environ 36%. Des courbes de tendance par régression linéaire sont présentées avec leurs coefficients de corrélation.

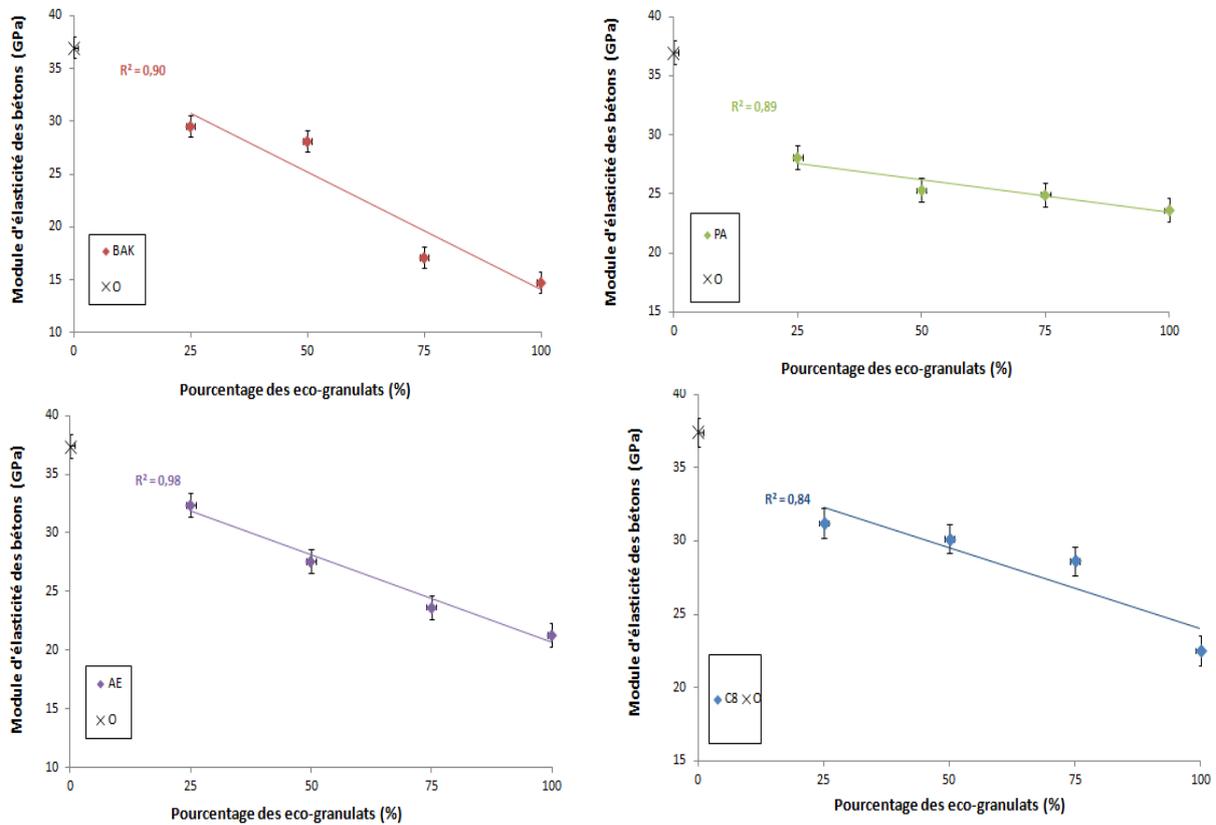


Figure V-8 : Évolution du module d'Young en fonction du pourcentage d'éco-granulats.

Un module d'Young E élevé est caractéristique d'un matériau se déformant peu sous l'action d'une force de compression. L'augmentation du pourcentage des granulats légers dans le béton entraîne une réduction du module d'Young du béton. Ce phénomène est gouverné par le module d'Young des granulats légers qui est inférieur à celui des granulats ordinaires, comme avancé par M. Shink (**SHINK, 2003**). Il existe une relation, proposée dans les manuels du CEB-FIP, basée sur des mesures dynamiques, afin de prédire le module d'Young E_g des granulats légers en fonction de leurs masses volumiques apparentes ρ_g .

$$E_g = 8 \rho_g^2 \quad (47)$$

Ainsi, les prédictions des modules l'élasticité des granulats légers peuvent être évaluées à l'aide des résultats du chapitre 3, et sont présentées dans le tableau V-2.

Tableau V-2 : Prédiction du module d'élasticité des granulats étudiés.

	C8	PA	BAK	AE	O
ρ_g (g/cm ³)	1.1	0.88	1.09	0.7	1.36
E_g (MPa)	9.68	6.20	9.44	3.92	14.80

Compte tenu que la rigidité des granulats légers est très inférieure à celle de la matrice, le module d'Young diminue avec l'augmentation du pourcentage des granulats légers. Les résultats précédents montrent que l'évolution du module d'Young est presque proportionnelle au pourcentage des granulats légers. Afin de prédire les modules d'Young des différents bétons, il existe différentes formules en fonction de la résistance en compression et de la masse volumique. Nous pouvons citer :

$$E_c = 0.043 w_c^{1.5} \sqrt{f_c} \text{ (ACI - 318 - 08, 2008)} \quad (48)$$

(49)

$$E_c = 22000 \left(\frac{f_c}{10} \right)^{0.3} \left(\frac{w_c}{2200} \right)^2 \text{ (EN 1992 - 1 - 1, 2007)} \quad (50)$$

$$E_c = 9500 (f_c)^{0.3} \left(\frac{w_c}{2400} \right)^{1.5} \text{ (Zhang, et al., 1991)} \quad (51)$$

$$E_c = (3320 \sqrt{f_c} + 6895) \left(\frac{w_c}{2320} \right)^{1.5} \text{ (Slate, et al., 1986)} \quad (52)$$

$$E_c = 22000 \left(\frac{f_c}{10} \right)^{0.3} \left(\frac{w_c}{2200} \right)^{1.5} \text{ (KE, 2008)} \quad (53)$$

où E_c est le module d'élasticité des bétons en MPa, f_c est la résistance en compression à 28 jours en MPa et w_c est la masse volumique des bétons en kg/m³. Les prédictions déterminées par ces formules empiriques sont présentés sur la figure V-9.

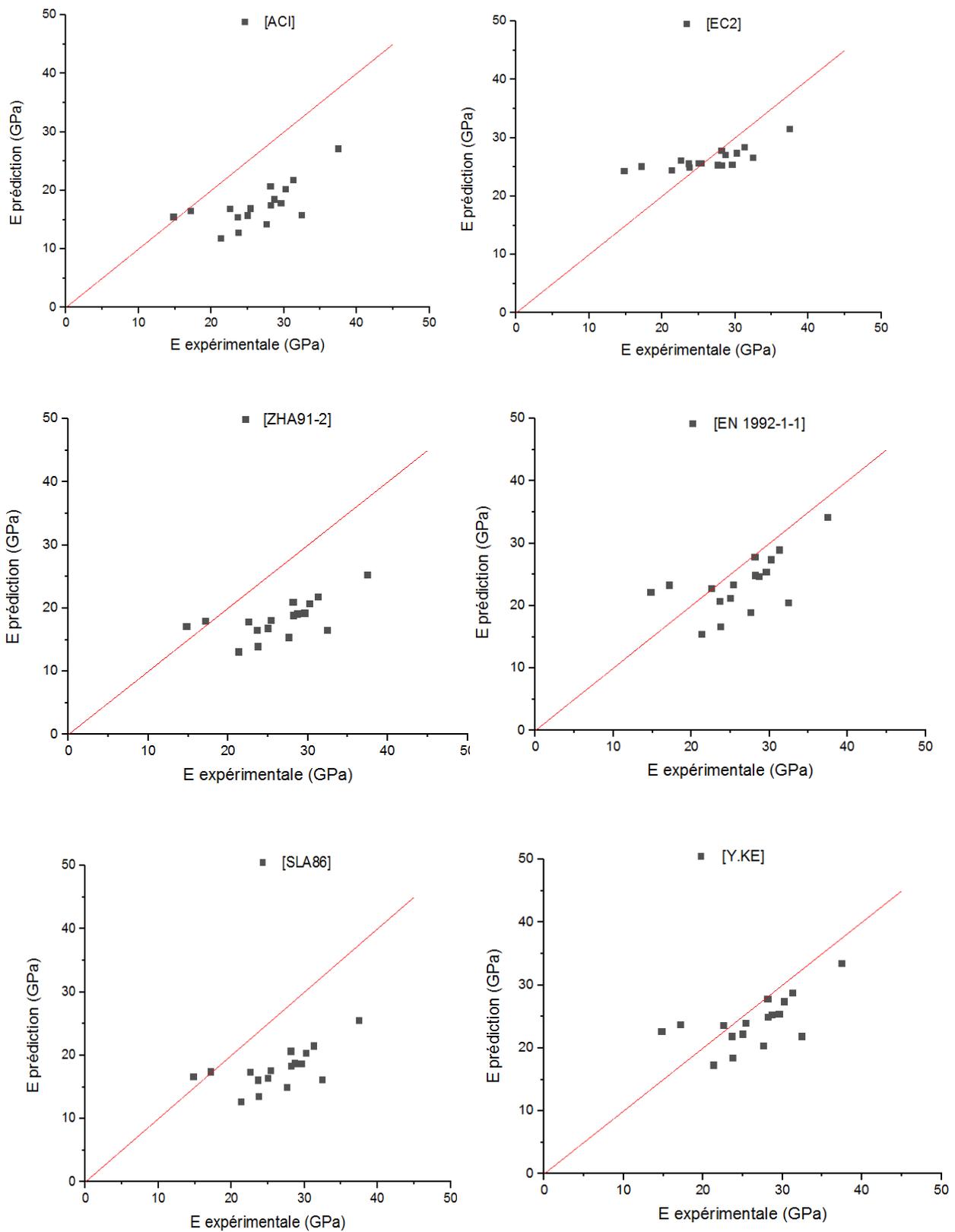


Figure V-9 : Modules d'élasticité expérimentaux vs théoriques.

La figure V-10 présente la superposition de ces modèles avec les résultats expérimentaux. En confrontant les résultats expérimentaux et les résultats obtenus à partir de ces modèles, nous

pouvons constater que les formules sous-estiment les modules d'Young des bétons mesurés par expérience.

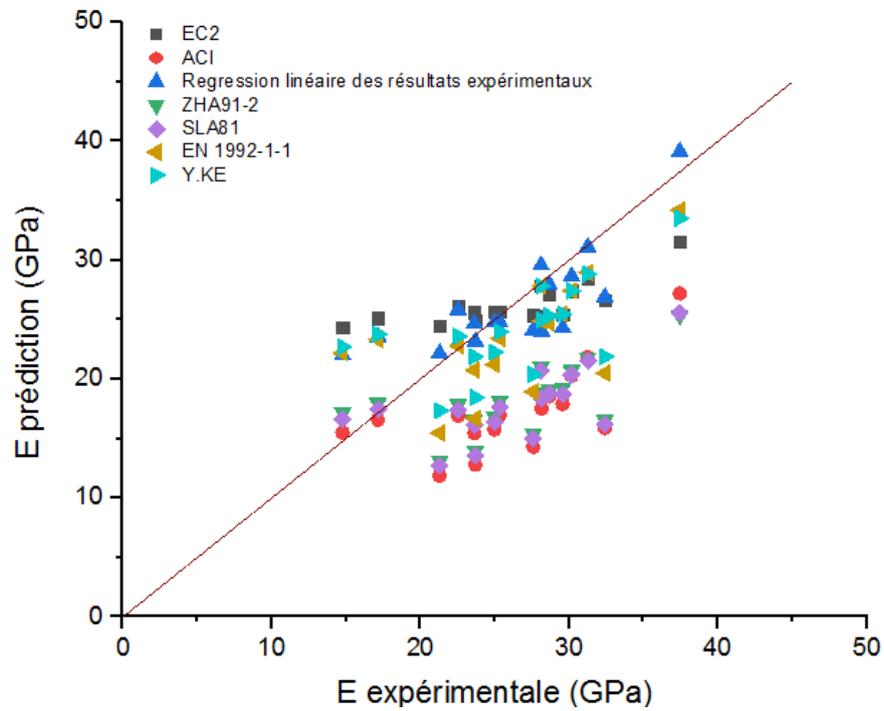


Figure V-10 : Confrontation des modules d'Young des résultats expérimentaux et formules empiriques.

Les écarts moyens des modules d'élasticités ont été calculés entre les résultats déterminés par les formules de prédiction et les résultats expérimentaux et sont présentés au tableau V-3.

Tableau V-3 : Écart moyen des modules d'élasticité entre formules empiriques et résultats expérimentaux.

Formule empirique	EC2	ACI	ZHA91-2	SLA81	EN1992-1-1	KE
Écart moyen	1.70%	4.50%	4.20%	4.30%	2.20%	2%

Nous proposons donc une nouvelle approche (Eq. 54) déterminée par régression linéaire des résultats expérimentaux pour affiner ces modèles prédictifs empiriques :

$$E_c = 17540 \left(\frac{f_c}{10} \right)^{0.6684} \quad (54)$$

La comparaison avec les résultats expérimentaux semble ainsi de meilleure facture, avec un écart moyen de 1.30 %. Ainsi, la figure V-11 montre la confrontation des résultats expérimentaux avec les résultats obtenus de l'équation 54. L'approche prédictive semble efficace afin d'estimer le module d'élasticité des bétons de granulats carbonatés

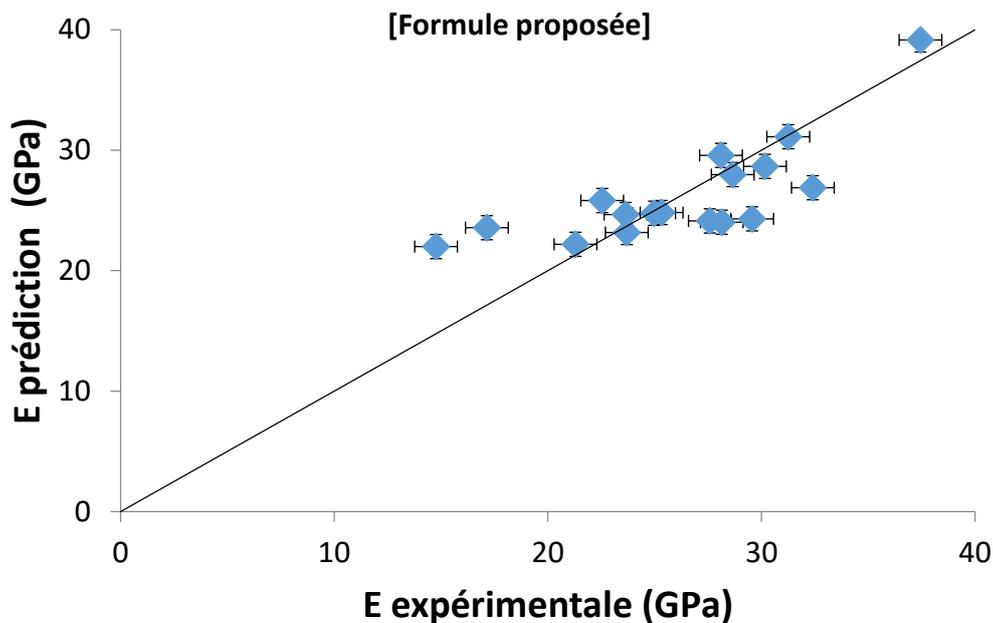


Figure V-11 : Confrontation des modules d'élasticité expérimentaux avec l'approche proposée.

IV. *Traction indirecte : flexion trois points*

La résistance en traction indirecte des bétons a été évaluée par des essais de flexion trois points sur des éprouvettes (7x7x28) cm³. En effet, un essai de traction direct sur le béton étant particulièrement délicat à mettre en place (fixation de l'éprouvette dans les mors qui induit un glissement et un défaut d'alignement de la force, rupture prématurée au niveau des sur-contraintes locales ou encore défaut microscopique du béton entraînant une rupture non maîtrisée), un essai de caractérisation indirecte est généralement mis en œuvre en raison de son approche maîtrisée. Ainsi, les éprouvettes sont testées sous un chargement piloté en déplacement et appliqué à mi-portée. La vitesse de chargement est de 0.4 mm/min, sur une presse de capacité maximale de 50 kN. La figure V-12 présente les résistances en flexion des bétons étudiés en fonction du pourcentage des éco-granulats.

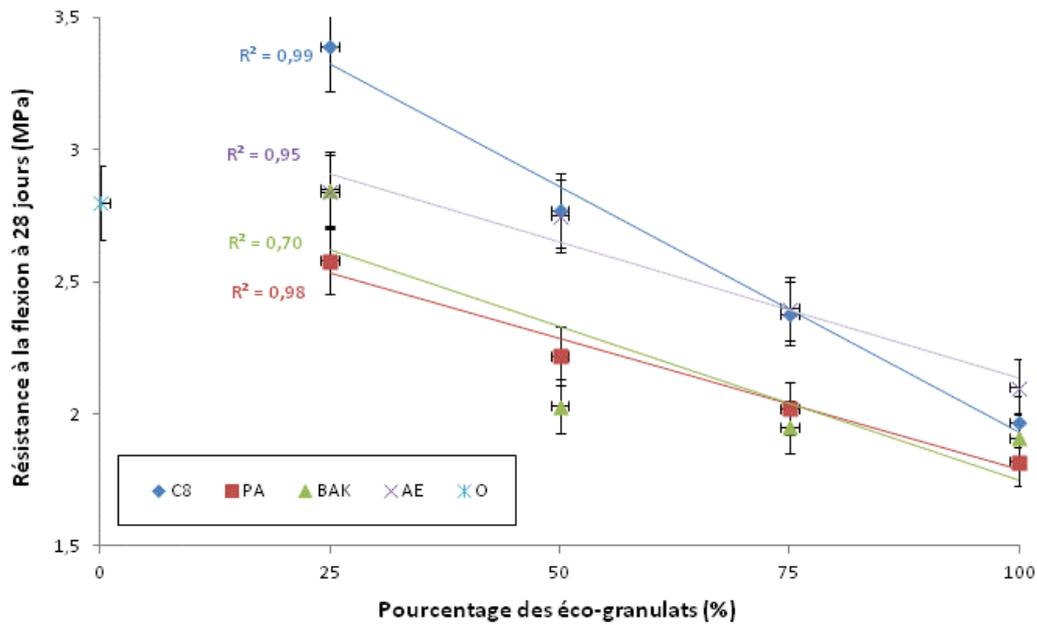


Figure V-12 : Résistance en flexion en fonction du pourcentage des éco-granulats.

En flexion, le béton présente une résistance relativement faible, en raison de la rupture de l'échantillon en traction, dans la zone tendue, à mi-portée de l'éprouvette. Les éco-bétons ont des résistances à la flexion faibles, autour de 3.5 MPa à 28 jours (figure V-12). Un béton traditionnel montre une résistance en traction de l'ordre de 10 à 15 % de sa résistance en compression. Le mode de rupture associée à la traction est gouverné par la faible adhérence entre la matrice cimentaire et les granules. Dans le cas des bétons de granules carbonatés, les essais mettent en exergue une propagation de la fissuration au travers des granules, ce qui engendre une réduction de la résistance en traction, par rapport aux bétons traditionnels (figure V-13).



Figure V-13 : Faciès de rupture des éprouvettes en traction indirecte par flexion.

La tangente à l'origine de la courbe de comportement du béton en flexion (évolution de la force appliquée en fonction du déplacement à mi-portée) permet ainsi d'identifier le module de flexion des bétons. La figure V-14 présente l'évolution du module d'élasticité en flexion en fonction du pourcentage des éco-granulats présent de la composition.

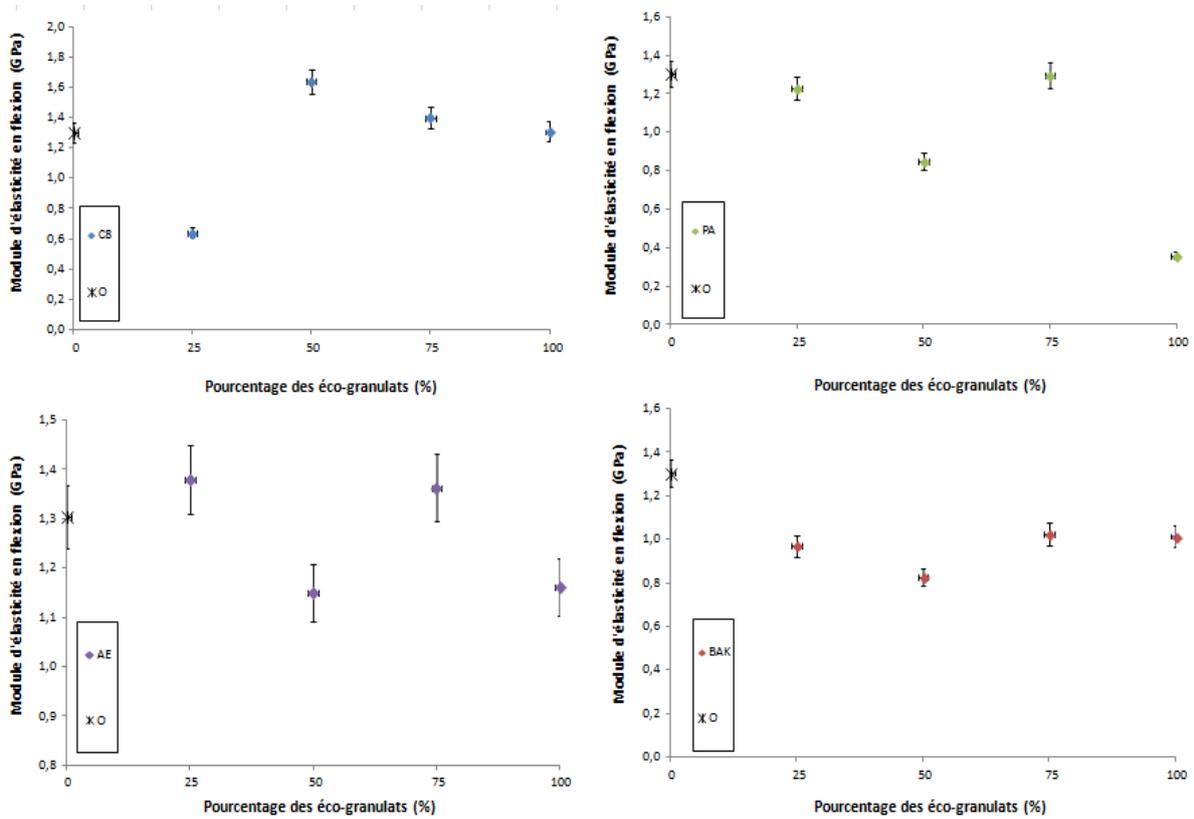


Figure V-14 : Module d'élasticité en flexion en fonction du pourcentage des éco-granulats.

L'essai de traction indirecte par flexion trois points est une alternative viable pour déterminer les caractéristiques en traction d'un matériau sous certaines hypothèses :

- le matériau est considéré élastique linéaire jusqu'à la rupture ;
- le principe de Navier-Bernoulli est confirmé ;
- et le module de traction (E_t) est différent du module de compression (E_c).

Les déformations à une distance y de l'axe neutre sont déterminées par la formule suivante, avec ρ le rayon de courbure :

$$\varepsilon_x = \frac{y}{\rho} \quad (55)$$

Les contraintes de traction et de compression sont :

$$\begin{cases} \sigma_t = E_t \frac{y}{\rho} \\ \sigma_c = E_c \frac{y}{\rho} \end{cases} \quad (56)$$

L'équilibre de la section transversale conduit à :

$$0 = \int_{\Sigma} \sigma d\Sigma = \int_{\Sigma_t} \sigma_t d\Sigma_t + \int_{\Sigma_c} \sigma_c d\Sigma_c = \int_0^{h_t} \sigma_t b dy + \int_{-h_c}^0 \sigma_c b dy \quad (57)$$

avec :

- h_t et h_c les hauteurs tendue et comprimée de la section rectangulaire Σ
- b est la largeur de la poutre

On obtient donc :

$$0 = \frac{b E_t}{\rho} \int_0^{h_t} \sigma_t b dy + \frac{b E_c}{\rho} \int_{-h_c}^0 \sigma_c b dy \quad (58)$$

Puis :

$$E_t y_t \Sigma_t + E_c y_c \Sigma_c = 0 \quad (59)$$

Or

$$y_t = \frac{h_t}{2} \text{ et } y_c = \frac{h_c}{2} \quad (60)$$

D'où :

$$\Sigma_t = b h_t \text{ et } \Sigma_c = b h_c \quad (61)$$

En posant :

$$\lambda = \frac{E_c}{E_t} \quad (62)$$

On obtient donc :

$$y_t \Sigma_t + \lambda y_c \Sigma_c = 0 \quad (63)$$

Ce qui conduit à :

$$\sqrt{\lambda} = \frac{h_t}{h_c} \quad (64)$$

D'où :

$$\begin{cases} h_t = \frac{h \sqrt{\lambda}}{1 + \sqrt{\lambda}} \\ h_c = \frac{h}{1 + \sqrt{\lambda}} \end{cases} \quad (65)$$

Le moment de flexion résistant, noté M , est déterminé par la somme des moments induits par les contraintes internes :

$$M = \int_{\Sigma} \sigma y d\Sigma = \int_0^{h_t} \sigma_t y b dy + \int_{-h_c}^0 \sigma_c y b dy \quad (66)$$

D'où :

$$M = \frac{E_c}{\rho} \cdot \frac{bh^3}{12} \cdot 4 \left[\frac{1}{(1 + \sqrt{\lambda})^3} + \frac{\sqrt{\lambda}}{(1 + \sqrt{\lambda})^3} \right] \quad (67)$$

Puis,

$$M = \frac{E_c}{\rho} \cdot \frac{bh^3}{12} \cdot \frac{4}{(1 + \sqrt{\lambda})^2} \quad (68)$$

On pose :

$$\beta = \frac{4}{(1 + \sqrt{\lambda})^2} \quad (69)$$

La théorie classique des poutres démontre que : $M = \frac{E_{fl} I}{\rho}$ avec E_{fl} est le module d'élasticité en flexion. Ainsi, par identification des coefficients, on obtient $E_{fl} = \beta E_c$

D'où :

$$E_t = \frac{E_c}{\left(2 \sqrt{\frac{E_c}{E_{fl}}} - 1\right)^2} \quad (70)$$

Il est donc possible de trouver le module d'élasticité en traction (E_t) connaissant les modules d'élasticité en compression (E_c) et en flexion (E_{fl}) (tableau V-4).

De plus :

$$\sigma_t = \frac{M}{\lambda \beta I} y \quad (71)$$

Les contraintes maximales sont donc :

$$\sigma_{t,max} = \frac{M_{max}}{\lambda \beta I} h_t \quad (72)$$

En flexion trois points, on a :

$$M_{max} = \frac{P L}{4} \quad (73)$$

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (74)$$

$$h_t = \frac{h \sqrt{\lambda}}{1 + \sqrt{\lambda}} \quad (75)$$

Donc :

$$\sigma_{t,max} = \frac{P L}{4} \cdot \frac{12}{bh^3} \cdot \frac{h \sqrt{\lambda}}{1 + \sqrt{\lambda}} \cdot \frac{(1 + \sqrt{\lambda})^2}{4 \lambda} = \frac{3 P L}{4} \cdot \frac{1 + \sqrt{\lambda}}{bh^2 \cdot \sqrt{\lambda}} \quad (76)$$

Par la suite, à l'aune de l'identification des modules d'élasticité en traction et en compression, les contraintes à la rupture en traction des bétons étudiés peuvent être déduites. Le tableau V-4 présente ainsi les résultats obtenus par l'exploitation de l'essai de flexion.

Tableau V-4 : Identification des caractéristiques des bétons en traction.

Type de Béton		Module d'élasticité en compression E_c (GPa)	Module d'élasticité en Flexion E_n (GPa)	Module d'élasticité en traction E_t (GPa)	σ_t max (MPa)
% C8	100	22.54	1.31	0.42	1.96
	75	28.65	1.40	0.44	2.35
	50	30.16	1.64	0.53	2.55
	25	31.25	0.64	0.19	3.20
% PA	100	23.63	0.36	0.10	1.69
	75	24.97	1.30	0.41	2.02
	50	25.32	0.85	0.26	1.95
	25	28.1	1.23	0.38	3.04
% BAK	100	14.76	1.01	0.34	1.93
	75	17.14	1.03	0.33	1.94
	50	28.14	0.83	0.25	1.94
	25	29.56	0.97	0.29	2.74
% AE	100	21.29	1.16	0.37	2.08
	75	23.69	1.36	0.44	2.39
	50	27.58	1.15	0.36	2.95
	25	32.4	1.38	0.43	3.14
% O	100	37.44	1.30	0.40	2.70

La figure V-15, à gauche, présente l'évolution de la contrainte en traction en fonction de la masse volumique des bétons. La faible résistance des bétons en traction est conditionnée par la nature même de l'interface entre le squelette granulaire et la matrice cimentaire. Les résultats obtenus sont compris dans un intervalle entre 1.75 MPa et 3.2 MPa, quelle que soit la nature des granulats. On peut tout de même noter une sensible baisse de la résistance en traction des bétons de granulats carbonatés au regard des performances du béton de granulats ordinaires, ce qui pourrait suggérer une liaison plus faible entre la pâte cimentaire et les granulats carbonatés. Cette observation semble confirmée par l'exploitation de la figure V-15, à droite, qui montre l'évolution de la résistance en traction en fonction du pourcentage de granulats carbonatés introduit dans le mélange. En effet, l'ajout d'une quantité plus importante de granulats carbonatés induit une baisse progressive – et linéaire – de la résistance en traction des bétons, jusqu'à une valeur minimale de l'ordre de 1.75 MPa.

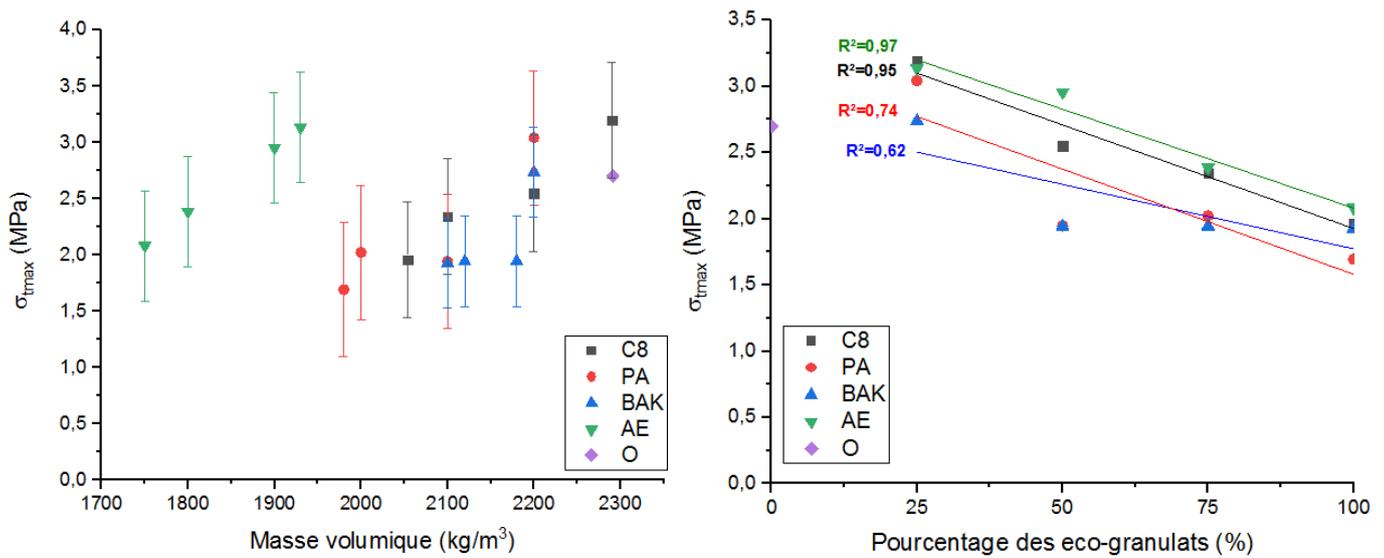


Figure V-15 : Évolution de la contrainte en traction en fonction de la masse volumique (à gauche) et en fonction du pourcentage de granulats carbonatés (à droite)

V. Propriétés microstructurales

Les propriétés mécaniques, à l'échelle mésoscopique, des bétons sont fortement dirigées par les propriétés microstructurales du mélange entre la matrice cimentaire et le squelette granulaire. Une campagne de caractérisation microscopique a donc été menée sur des échantillons des bétons afin d'étudier la nature de la zone d'interface entre la matrice et le squelette granulaire. Les essais ont été effectués à la plateforme de microscopie électronique à l'Université de Picardie Jules Verne, à Amiens (France).

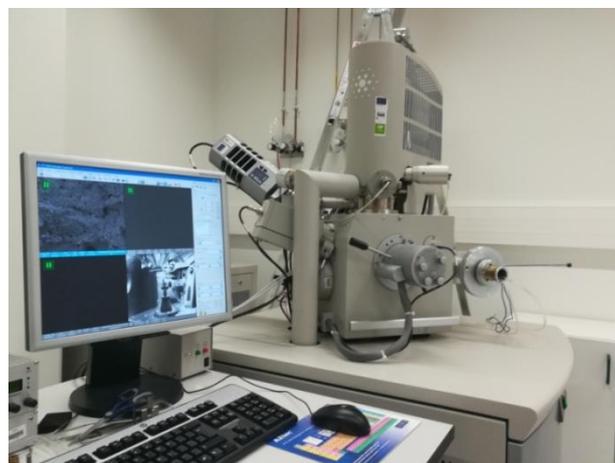


Figure V-16 : Microscope électronique à balayage de l'UPJV.

Le microscope électronique à balayage (MEB) utilisé est un microscope haute résolution de type environnemental Quanta 200 FEG (société FEI compagny) équipée d'une platine Peltier permettant l'observation de tout type d'échantillon ce qui lui confère un large domaine d'utilisation (figure V-17). Il est également équipé d'une microanalyse X INCA OXFORD de type SDD 80 mm³. Le microscope électronique à balayage se base sur l'analyse des interactions électron-matière soumis à des bombardements d'électrons.

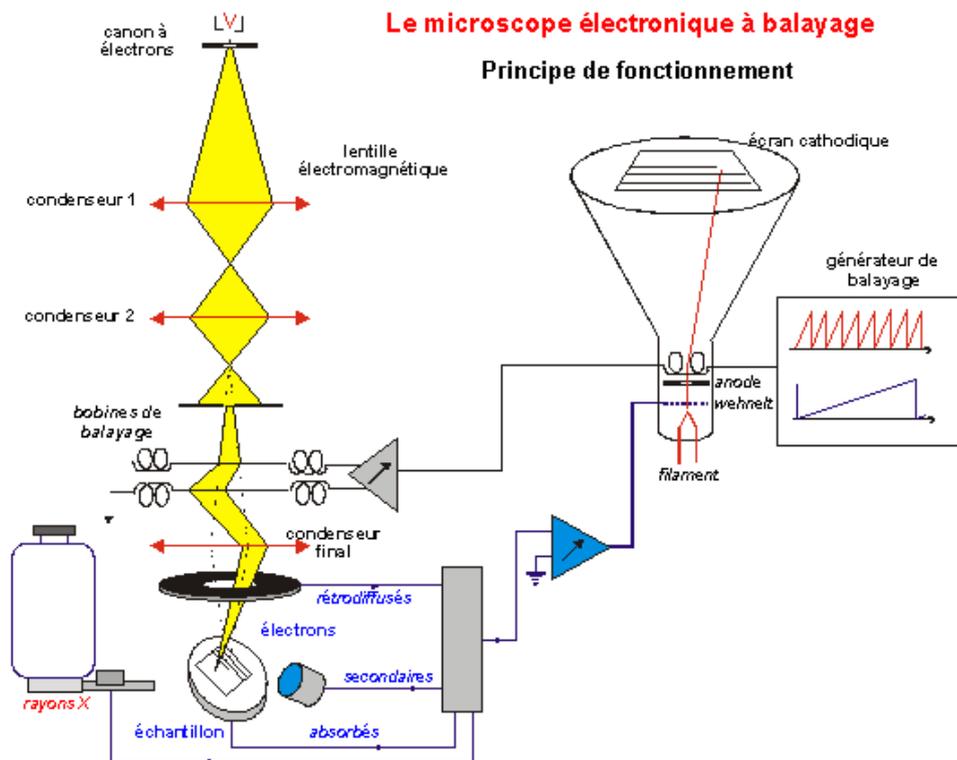


Figure V-17 : Principe de fonctionnement du microscope électronique à balayage(Ruste).

Les dimensions de l'échantillon doivent être assez petites, d'environ 1 à 2 cm³ (figure V-14). Après l'essai de compression sur des éprouvettes (11x22) cm², nous récupérons la surface de rupture pour l'identification de la nature de la zone interfaciale et des mécanismes de ruine. Un échantillon de 1 à 2 cm³ de volume est prélevé, lavé et séché à l'étuve à 45°C (afin de limiter l'apparition d'éventuelles fissures dues au retrait) pendant 72 heures afin d'évaporer la totalité de l'eau libre. Les échantillons sont ensuite métallisés pour que la surface soit conductrice et permet le passage des électrons. Ils sont collés sur une platine de MEB par du scotch carbone double face. Nous avons choisi une tension de 5 kV afin d'obtenir le meilleur compromis possible entre le contraste et la qualité de l'image obtenue. Après préparation de l'échantillon, ce dernier est mis dans la chambre d'observation du MEB, en mode haut-vide.



Figure V-18 : Préparation des échantillons pour visualisation au MEB.

Les résultats obtenus sont présentés dans les figures V-20 à V-24. Les propriétés physiques des granulats (absorption d'eau et porosité) influent sur la formation de la zone d'interphase entre la matrice et le granulat, et sa largeur. Les granulats utilisés sont des granulats poreux possédant des coefficients d'absorption d'eau assez importants et des porosités élevées. A cause de la forte absorption d'eau, la largeur de la zone d'interphase est extrêmement faible. Au niveau mécanique, il y a une bonne liaison de la zone avec les granulats. Certains auteurs ont observés la migration de la pâte et des grains de ciment dans les pores des granulats poreux (KE, 2008). Cela est dû la cinétique d'absorption d'eau qui entraîne le mouvement des grains et de la pâte de ciment vers les pores. Ce phénomène a été observé dans notre cas (figure V-19).

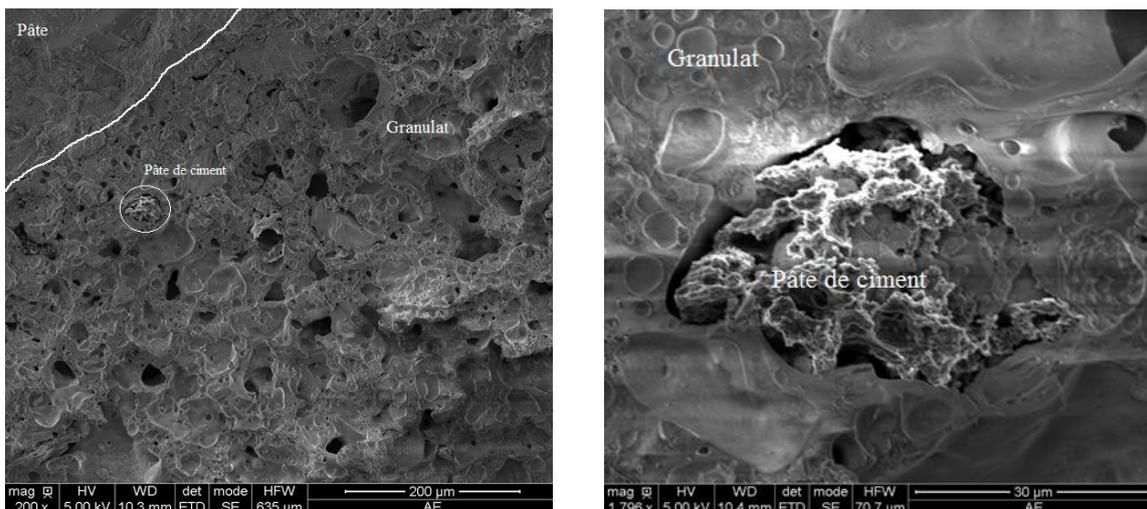


Figure V-19 : Migration de la pâte de ciment dans le granulat AE.

Les images prises au MEB (figures V-20 à V-24) nous ont montré que les pores de surface des granulats d'argile expansée contiennent de la pâte de ciment. Ces granulats sont très poreux (la porosité est de 59 %) avec un coefficient d'absorption d'eau de 20%.

Les granulas carbonatés ainsi que l'argile expansée sont des granulats légers qui ont des porosités importantes qui atteignent 70%. Plus l'absorption des granulats légers est importante, plus l'épaisseur de la zone d'interphase est faible.

Pour les bétons légers, les auteurs affirment que la zone d'interphase est trop faible voire même inexistante (KE, 2008).

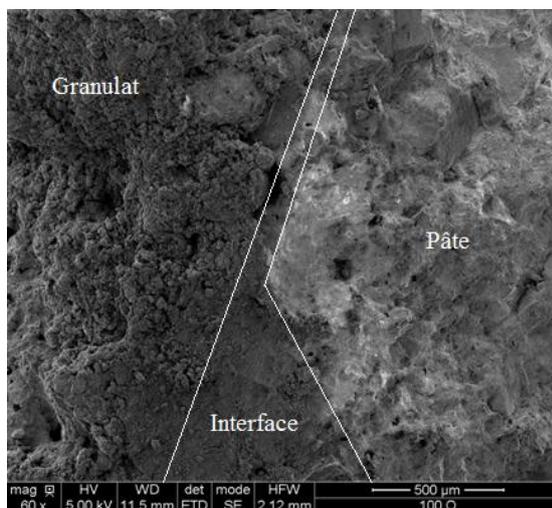


Figure V-20 : Observation au MEB du béton à base de granulats ordinaires O.

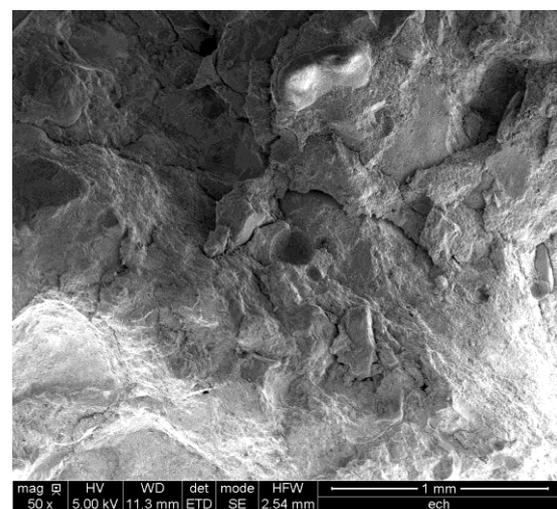


Figure V-22 : Observation au MEB des bétons à base de BAK.

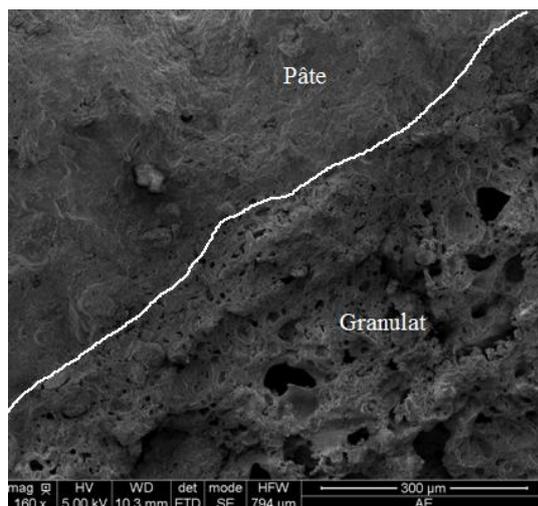


Figure V-21 : Observation au MEB du béton d'argile expansée AE

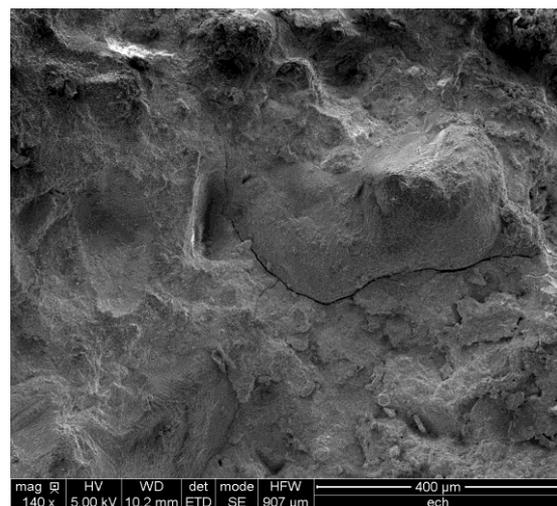


Figure V-23 : Observation au MEB des bétons à base de C8 AGG.

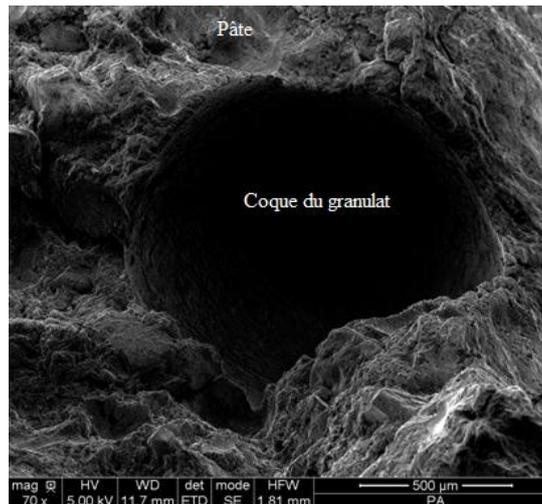


Figure V-24 : Observation au MEB des bétons à base de PA.

La bonne adhérence entre la matrice cimentaire et le granulat carbonaté confirme les observations réalisées durant les essais de caractérisation mécaniques à l'échelle du matériau. Un déchaussement des gravillons est rarement observé lors de la rupture. Ces granulats semblent, en revanche, être traversés par la fissure, avec une ruine au niveau de la circonférence externe du grain. Une coque rigide, fortement ancrée dans la matrice cimentaire est généralement visible sur les faciès de rupture (voir figure V-9). Il semblerait donc que les granulats soient formés d'une enveloppe externe qui favorise la propagation de la fissuration. Cette enveloppe est probablement engendrée par le procédé de transformation des granulats, par carbonatation accélérée dans un tambour rotatif sous environnement enrichi en dioxyde de carbone. Lors du processus de fabrication, le granulat se forme par carbonatation en couches successives jusqu'à l'obtention finale d'un granulat parfaitement rond (caractérisé par la mesure du coefficient d'aplatissement A proche de 0, voir chapitre 3). Les dernières couches, plus éloignées du centre du granulat circulaire semblent présenter des faiblesses d'adhérence mécanique et/ou d'adhésion physico-chimique avec les couches précédentes. Cette conséquence est d'autant plus visible sur les grains les plus gros. En effet, seuls les plus gros grains laissent une « empreinte », sous la forme d'une coquille vide, dans la matrice cimentaire sur les faciès de rupture. Les grains les plus fins sont, soit déchaussés, soit traversés en leur centre par la fissuration. Ainsi, l'utilisation de granulats carbonatés modifie substantiellement les mécanismes de propagation de la fissure et finalement les modes de ruine par rapport à un béton classique. Ces modifications microstructurales doivent donc être prise en considération pour la formulation de modèles empiriques afin de prédire le comportement mécanique du béton, tant en compression qu'en traction et en flexion. Enfin, ces observations confirment donc que l'augmentation du nombre de grains carbonatés dans

une formulation de béton engendrera systématiquement une baisse des performances mécaniques en raison de la nature microstructurale même des grains carbonatés et leurs résistances plus faibles à la propagation de la fissuration.

VI. Conclusion

L'étude expérimentale présentée dans ce chapitre porte sur l'identification des propriétés mécaniques des bétons étudiés à l'échelle du matériau. Dans un premier temps, les résultats présentés dans ce chapitre ont montré l'influence de la nature des granulats carbonatés sur les performances mécaniques des bétons :

- L'ajout de granulats carbonatés entraîne une réduction significative des résistances mécaniques en compression et en traction.
- L'évolution des modules d'élasticité en compression et en traction est directement et linéairement influencée par la fraction massique de granulats carbonatés.

Une méthode de caractérisation indirecte des propriétés en traction par flexion 3 points est proposée, en égard des difficultés de mise en œuvre d'un essai de traction directe sur le béton. Ces essais ont permis de proposer des modèles empiriques de prédiction des caractéristiques mécaniques à l'échelle mésoscopique au regard de la quantité de granulats carbonatés, en substitution des granulats ordinaires, dans le mélange avec la pâte cimentaire.

Dans un second temps, une analyse d'images obtenues par Microscope Électronique à Balayage (MEB) a mis en exergue les interactions entre les échelles micro- et méso-structurales. En effet, l'identification de la zone d'interphase entre le squelette granulaire et la matrice cimentaire montre l'influence de la faculté d'absorption d'eau des granulats sur l'adhérence mécanique et l'adhésion physico-chimique entre la matrice et les granulats.

Enfin, les observations des résultats issus du MEB soulignent que la cinétique de fabrication des granulats carbonatés gouverne les mécanismes d'endommagement et de propagation de la fissuration. Lors de la production de granulats, la carbonatation par couches successives autour du noyau de grain semble conduire à une résistance mécanique faible en périphérie du grain, d'où la désolidarisation d'une enveloppe externe, visible sur les faciès de rupture.

L'analyse des différents résultats expérimentaux montre l'importance de l'optimisation de la formulation des bétons en prenant en compte le type des granulats ainsi que leurs fractions massiques dans le mélange.

CHAPITRE VI.

INFLUENCE DU TYPE DE GRANULATS SUR LES PERFORMANCES THERMIQUES DES BETONS

I. Introduction

Les propriétés thermiques sont liées aux constituants, à la morphologie de la matrice et sa porosité et les différents phénomènes de transfert dans le matériau. Afin de déterminer les propriétés thermiques des bétons, la conductivité thermique et la diffusivité sont les paramètres essentiels qui définissent la nature plus ou moins isolante des matériaux.

Dans ce chapitre, nous présentons, dans un premier temps, les différents phénomènes de transfert de chaleur (conduction, convection, rayonnement). Puis, le comportement des bétons carbonatés est étudié, en milieu sec ; les différentes caractéristiques thermiques ont été identifiées expérimentalement : conductivité thermique, chaleur massique spécifique, diffusivité thermique et effusivité thermique.

Dans un second temps, ces résultats expérimentaux ont été confrontés aux résultats issus d'une modélisation par homogénéisation auto-cohérente. Nous avons choisi un modèle

générique de type tri-composite pour définir un modèle de prédiction de la conductivité thermique sèche du matériau en fonction de sa masse volumique et de sa composition.

II. Phénomènes de transfert de chaleur

Un transfert de chaleur est tout échange d'énergie thermique d'un milieu avec un autre. En effet, c'est un transfert d'énergie microscopique désordonnée. Il existe trois modes de transfert de chaleur :

- Conduction : la chaleur passe d'un corps à un autre par contact sans déplacement de matière ;
- Convection : un corps qui se déplace emmène la chaleur qu'il contient. La quantité de chaleur ainsi transportée peut être importante, notamment dans le cas d'un changement de phase ;
- Rayonnement : tous les corps émettent de la lumière, en fonction de leur température, et se font eux-mêmes chauffer par la lumière qu'ils reçoivent.

1. Conduction thermique (régime permanent)

Nous supposons un transfert élémentaire de chaleur élémentaire δQ entre deux plans indéfinis où les températures de surface sont T et $T+dT$, comme illustré à la figure VI-1.

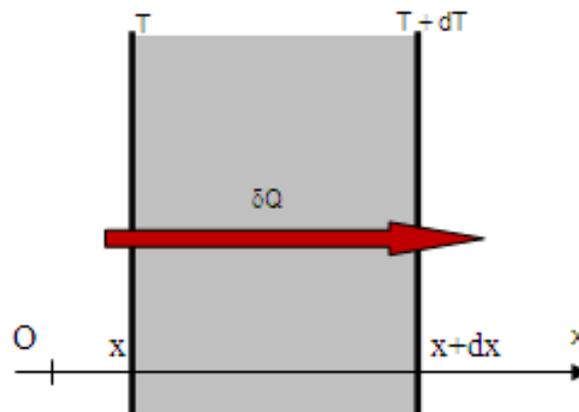


Figure VI-1 : Loi de Fourier.

Soit la loi de Fourier (Eq. 77), le transfert élémentaire de chaleur est défini comme suit :

$$\delta Q = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} dt \quad (77)$$

- S la surface d'échange perpendiculaire à l'axe Ox ;
- dT l'écart de température entre les deux plans séparés de dx ;
- dt le temps de l'expérience ;
- λ la conductivité thermique.

Le signe négatif est dû à un phénomène de convention qui assujettie une quantité de chaleur $\delta Q > 0$ dans le sens x croissant.

Nous pouvons ainsi définir le flux thermique :

$$\phi = \frac{\delta Q}{\delta t} \quad (78)$$

Nous pouvons donc écrire :

$$\phi = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \quad (79)$$

Soit la densité de flux correspondant au flux échangé par unité de surface :

$$\varphi = \frac{\phi}{S} \quad (80)$$

Donc dans le cas d'un problème unidimensionnel :

$$\varphi = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (81)$$

Nous considérons un phénomène de conduction unidimensionnel perpendiculaire à Ox.

Généralement, nous exprimons la densité flux de chaleur selon (O, x, y, z).

Soit :

$$\begin{cases} \varphi_x = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{y,z} \\ \varphi_y = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{x,z} \\ \varphi_z = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{x,y} \end{cases} \quad (82)$$

Donc globalement :

$$\vec{\varphi} = -\lambda \text{grad } \vec{T} \quad (83)$$

La loi de Fourier généralisée s'exprime par :

$$\vec{\varphi} = -[\Lambda] \text{grad } \vec{T} \quad (84)$$

Le tenseur des conductivités thermiques $[\Lambda] = \begin{vmatrix} \lambda_{xx} & \lambda_{xy} & \lambda_{xz} \\ \lambda_{yx} & \lambda_{yy} & \lambda_{yz} \\ \lambda_{zx} & \lambda_{zy} & \lambda_{zz} \end{vmatrix}$

Le tenseur peut être diagonalisé $[\Lambda] = \begin{vmatrix} \lambda_x & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_y & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_z \end{vmatrix}$

avec $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ les conductivités principales du milieu selon les directions x, y et z.

La conservation de l'énergie dans le matériau conduit à l'équation de chaleur :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \dot{q} \quad (85)$$

avec :

- ρ la masse volumique du matériau ;
- C_p la chaleur spécifique massique à pression constante ;
- \dot{q} le terme de production d'énergie volumique.

Cette dernière équation correspond à un milieu anisotrope avec création d'énergie.

Or dans le cas, on s'intéresse à un milieu homogène et isotrope. Dans le cas d'absence de production d'énergie, l'équation de chaleur se simplifie :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \Delta T \quad (86)$$

Dans le cas d'un multi-matériau, comme dans ces travaux de recherche où le béton est constitué du mélange de plusieurs matériau tels que la matrice cimentaire, les grains et les vides, un « circuit thermique », en régime stationnaire et sans dégagement de puissance, peut être approché par une analogie avec un circuit électrique. Ainsi, deux possibilités sont offertes : une association des résistances thermiques en série et une association des résistances thermiques en parallèle.

➤ **Association en série**

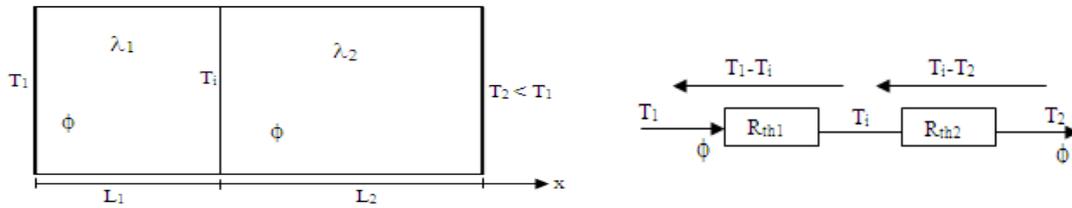


Figure VI-2 : Association des résistances thermiques en série.

Dans ce cas, les flux thermiques qui traversent des deux résistances thermiques sont identiques et s'expriment en fonction des résistances thermiques des deux phases et des températures à l'entrée et la sortie du circuit :

$$\phi = \frac{T_1 - T_i}{R_{th1}} \quad (87)$$

$$\phi = \frac{T_i - T_2}{R_{th2}} \quad (88)$$

où T_i est la température de l'interface entre les deux phases (les deux résistances électriques).

Le gradient de température se définit alors en fonction du flux thermique et de la somme des résistances thermiques :

$$T_1 - T_2 = \phi (R_{th1} + R_{th2}) \quad (89)$$

On peut donc exprimer les résistances thermiques en fonction des propriétés thermiques des deux phases :

$$R_{th1} = \frac{L_1}{\lambda_1 S_1} \quad (90)$$

$$R_{th2} = \frac{L_2}{\lambda_2 S_2} \quad (91)$$

➤ **Association en parallèle**

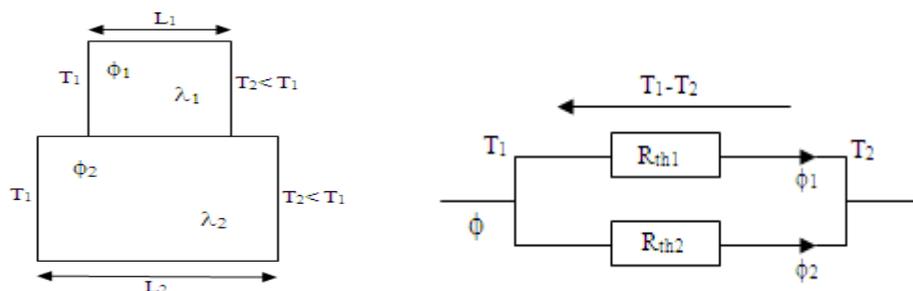


Figure VI-3 : Association des résistances thermiques en parallèle.

Ici, le flux thermique du système correspond à la somme des flux thermiques parcourant chaque résistance thermique.

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 \quad (92)$$

Les flux thermiques sont alors dépendants des conductances thermiques G des deux phases :

$$\phi_1 = G_{th1}(T_1 - T_2) \quad (93)$$

$$\phi_2 = G_{th2}(T_1 - T_2) \quad (94)$$

Et finalement, le flux thermique global s'exprime par l'expression suivante :

$$\phi = (G_{th1} + G_{th2})(T_1 - T_2) \quad (95)$$

On peut donc exprimer les conductances thermiques des deux phases par les approches suivantes :

$$G_{th1} = \frac{1}{R_{th1}} = \frac{\lambda_1 S_1}{L_1} \quad (96)$$

$$G_{th2} = \frac{1}{R_{th2}} = \frac{\lambda_2 S_2}{L_2} \quad (97)$$

2. Conduction non stationnaire (régime variable)

L'équation de transfert de chaleur s'écrit, à partir des résultats menant à l'équation 86 :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \Delta T \quad (98)$$

Pour un fluide infini dans milieu à température uniforme et constante T_f , on dispose d'un solide isotherme de température initiale T_0 , l'équation du bilan s'écrit :

$$h S (T_f - T_s) = \rho C_v \frac{\partial T}{\partial t} \quad (99)$$

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{hS}{\rho C_v} (T_f - T_s) \quad (100)$$

$$\frac{dT_s}{(T_f - T_s)} = \frac{hS}{\rho C_v} dt \quad (101)$$

$$\text{Ln}(T_f - T_s) = -\frac{hS}{\rho C_v} t + \text{Ln } K \quad (102)$$

à $t = 0$, $T_s = T_0$

$$\text{Ln} \frac{(T_f - T_s)}{(T_f - T_0)} = -\frac{hS}{\rho C_v} t \quad (103)$$

$$(T_f - T_s) = (T_f - T_0)e^{-\frac{hS}{\rho C_v} t} \quad (104)$$

$$T_s(t) = T_f - (T_f - T_0)e^{-\frac{hS}{\rho C_v} t} \quad (105)$$

Le terme $\frac{hS}{\rho C_v}$ a la dimension T^{-1} d'où on note le temps de relaxation τ :

$$\tau = \frac{\rho C_v}{h S} \quad (106)$$

D'où :

$$T_s(t) = T_f - (T_f - T_0)e^{-t/\tau} \quad (107)$$

Il est important de définir le nombre adimensionnel Bi (nombre de Biot thermique) :

$$\text{Bi} = \frac{h l}{\lambda} \quad (108)$$

avec l la longueur caractéristique du corps (en cas de sphère $l = r$).

Si $\text{Bi} < 0.1$, alors le milieu est à température uniforme. Cette condition est appelée relation d'accommodation thermique.

On définit le nombre de Fourier :

$$F_0 = \frac{a t}{l^2} \quad (109)$$

avec a est la diffusivité thermique.

On a donc :

$$\frac{t}{\tau} = F_0 \text{Bi} \quad (110)$$

$$T_s(t) = T_f - (T_f - T_0)e^{-F_0 \text{Bi}} \quad (111)$$

Afin de résoudre l'équation de chaleur $\frac{\partial T}{\partial t} = a \Delta T$, on utilise la méthode de la séparation des variables.

On cherche $T(x, t) = u(x) v(t)$

$$u(x) \frac{dv(t)}{dt} = a v(t) \frac{d^2 u(x)}{dx^2} \quad (112)$$

$$\frac{v}{v'} = a \frac{u''}{u} = k : \text{égalité de 2 fonctions dépendant de variables indépendantes}$$

Puis on recherche la fonction $u(x)$ qui satisfasse les conditions aux limites :

$$a \frac{u''}{u} = k \rightarrow u'' - \frac{k}{a} u = 0$$

Trois cas s'imposent alors :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{si } k = 0 \rightarrow u(x) = cx + d \\ \text{si } k > 0 \rightarrow u(x) = A e^{\sqrt{k/a} x} + B e^{-\sqrt{k/a} x} \\ \text{si } k < 0 \rightarrow u(x) = A' \sin \omega x + B' \cos \omega x \quad \text{avec } \frac{k}{a} = -\omega^2 \end{array} \right. \quad (113)$$

Les conditions aux limites sont ainsi :

$$\begin{cases} T(0, t) = 0 \\ T(L, t) = 0 \end{cases} \quad \forall t$$

où : - $k = 0$ conduit à $c = d = 0$, et, par suite $u(x) = 0$

- et $k > 0$ conduit à $A = -B$ et, par conséquent, $A = B = 0$.

Ainsi, seul le dernier cas ne conduit pas à une solution triviale. On obtient alors :

$$\begin{cases} A' \sin 0 + B' = 0 \rightarrow B' = 0 \\ A' \sin \omega L = 0 \end{cases} \quad (114)$$

ce qui nous amène à $\sin \omega L = 0$, donc $\omega L = n\pi$ pour tout $n \in \mathbb{N}$, et finalement $\omega = \frac{n\pi}{L}$.

$$u(x) = A' \sin \frac{n\pi}{L} x \quad (115)$$

Puis, on recherche la fonction $v(t)$ tel que :

$$\frac{v}{v'} = k = -\omega^2 a \quad (116)$$

$$\frac{dv}{v} = -a\omega^2 dt \quad (117)$$

On obtient donc :

$$v(t) = c e^{-a\omega^2 t} \quad (118)$$

Enfin, la solution générale s'écrit sous la forme suivante :

$$T(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n \sin \frac{n\pi x}{L} e^{-a\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 t} \quad (119)$$

Pour $t=0$,

$$T(x, 0) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n \sin \frac{n\pi x}{L} = f(x) \quad (120)$$

Les constantes C_n sont déterminées à partir de la formule d'Euler :

$$C_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(x) \sin \frac{n\pi x}{L} dx \quad (121)$$

3. Convection thermique

La convection thermique est un phénomène de transfert de chaleur qui se réalise avec déplacement de matière. Ce transfert de chaleur est rencontré dans des fluides, liquide ou gaz. Si le mouvement de fluide est induit à un mécanisme extérieur, on parle de convection forcée. Dans le cas où le mouvement de fluide est dû à une variation de densité à la suite d'un gradient de température, la convection est naturelle. Pour un écoulement à une température T_{∞} autour d'une structure à une température uniforme T_S de surface S . L'expression du flux de chaleur en convection est la suivante :

$$\phi = h S(T_S - T_{\infty}) \quad (122)$$

où h est le coefficient de transfert thermique qui dépend de l'état du système.

La résistance thermique de convection est définie comme suit :

$$R_{th} = \frac{T_S - T_\infty}{\phi} = \frac{1}{h S} \quad (123)$$

4. Rayonnement thermique

Contrairement aux deux modes de transfert précédents, ce mode ne nécessite pas de matière. Le rayonnement thermique peut avoir lieu dans le vide. Le rayonnement thermique est un phénomène se caractérisant par un échange d'énergie électromagnétique, sans que le milieu intermédiaire ne participe nécessairement à cet échange.

A l'aune de ces approches, on peut se rendre compte que le comportement thermique des matériaux dépend donc, en régime stationnaire de deux caractéristiques intrinsèques des matériaux, qui sont la conductivité thermique λ et de la capacité thermique massique C_p (équation 86). En régime non stationnaire, la diffusivité thermique apparaît dans les équations fondamentales (équation 112). Par ailleurs, les approches par associations en série ou en parallèle représentent des modèles limites de mélange des propriétés thermiques des phases d'un matériau multiphasique (équation 89 puis équation 95). Dans le cas du béton, deux phases sont en présence : la matrice cimentaire et le squelette granulaire. Ainsi, l'identification des performances thermiques des granulats, réalisée lors du chapitre 3 devrait nous permettre d'appliquer ces deux modèles afin de proposer une approche cohérente avec les résultats identifiés.

III. Propriétés thermiques des matériaux étudiés

Le transfert de chaleur qui domine dans un milieu poreux est le transfert par conduction. L'étude de la caractérisation thermique a pour objet l'identification des propriétés thermo-physiques des matériaux. Plusieurs paramètres thermiques sont définis pour chaque type de matériau tel que la conductivité thermique λ , la capacité thermique massique C , l'effusivité thermique E et la diffusivité thermique a .

1. Conductivité thermique

La conductivité thermique représente le flux de chaleur traversant un matériau d'un mètre d'épaisseur pour une différence de température de 1 degré Kelvin entre les deux faces. Elle s'exprime donc en W/m.K. La conductivité thermique permet de définir le pouvoir isolant des matériaux. Une conductivité thermique faible caractérise donc un matériau fortement isolant. Elle peut être obtenue, en régime stationnaire, par la détermination de gradient de température.

Ainsi, nous définissons la résistance thermique comme le rapport entre l'écart de température et le flux y résultant.

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{\phi} \quad (124)$$

Soit une éprouvette de matériau de conductivité λ de longueur L et de section S où on applique une différence de température $\Delta T = T_2 - T_1$.

L'équation de chaleur en régime permanent s'écrit :

$$\begin{cases} \nabla^2 T(z) = 0 \\ T(z = 0) = T_1 \\ T(z = L) = T_2 \end{cases} \quad (125)$$

La résolution de l'équation permet d'écrire l'expression de la température, celle du flux thermique est donnée par la loi de Fourier :

$$T(z) = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{L} z \quad (126)$$

$$\phi = \lambda S \frac{\partial T}{\partial z} = \lambda \frac{\Delta T S}{L} \quad (127)$$

Ainsi, la résistance thermique de l'échantillon est :

$$R_{th} = \frac{L}{\lambda S} \quad (128)$$

2. Capacité thermique massique

La capacité thermique massique représente la capacité d'un matériau à stocker de la chaleur. Elle s'exprime en J/Kg.K. Plus la chaleur spécifique est élevée, plus le matériau pourra stocker une quantité de chaleur importante. Elle intervient dans les problèmes thermiques non stationnaires.

$$C = \frac{1}{m} \frac{dQ}{dT} \quad (129)$$

Deux termes renvoient à la capacité thermique massique :

- la capacité thermique massique à pression constante C_p ;
- et la capacité thermique massique à volume constant C_v .

Dans notre étude, nous nous référons à la capacité thermique massique à pression constante C_p .

3. Effusivité thermique

L'effusivité thermique s'exprime en $J/m^2.K.s^{1/2}$. Elle représente la rapidité avec laquelle la température superficielle d'un matériau augmente. Plus le coefficient E est faible moins le matériau peut absorber une densité de flux. C'est donc la contribution de deux phénomènes différents : d'une part la conductivité thermique λ et d'autre part la capacité thermique massique C_p . Elle s'exprime de la façon suivante :

$$E = \sqrt{\lambda \rho C_p} \quad (130)$$

4. Diffusivité thermique

La diffusivité thermique est un coefficient qui intervient dans l'équation de chaleur. Elle s'exprime en m^2/s . Elle définit la capacité d'un matériau à transmettre une variation de température. C'est la vitesse à laquelle la chaleur se propage par conduction dans un corps. Plus la valeur de la diffusivité thermique est faible, plus le front de chaleur mettra du temps à traverser l'épaisseur du matériau, et donc, plus le temps entre le moment où la chaleur parvient sur une face d'un panneau et le moment où elle atteindra l'autre face est important.

Lorsqu'un flux de chaleur de densité φ traverse un matériau isotrope et homogène, l'équation de conservation d'énergie en conduction pure s'écrit comme suit :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \text{div} \varphi = 0 \quad (131)$$

Comme la densité de flux s'écrit :

$$\varphi = -\lambda \text{ grad } T \quad (132)$$

alors l'équation de chaleur devient :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div} (\lambda \text{ grad } T) \quad (133)$$

Pour un intervalle de température suffisamment faible, nous pouvons considérer la conductivité thermique λ comme constante. L'équation précédente s'écrit :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \Delta T \quad (134)$$

avec le coefficient a qui correspond à la diffusivité thermique du matériau. Elle est ainsi définie par la formule suivante :

$$a = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad (135)$$

On peut noter que la diffusivité thermique et l'effusivité thermique dépendent toutes deux de la conductivité thermique et de la capacité thermique massique. L'identification de la conductivité thermique et de la capacité thermique massique est donc suffisante pour déterminer les quatre principales propriétés thermiques d'un matériau.

5. Caractérisation thermique expérimentale des bétons

Il existe plusieurs méthodes de mesures des propriétés thermiques d'un matériau : les méthodes de mesure en régime permanent et les méthodes de mesure en régime variable. Les méthodes utilisées en régime permanent se réalisent en imposant à travers l'échantillon un flux de chaleur unidirectionnel constant et en mesurant les températures des surfaces chaude T_c et froide T_f . Différentes méthodes sont alors mises en œuvre en régime permanent, à savoir la méthode de la plaque chaude gardée, boîte chaude gardée, méthode des boîtes symétriques... Dans ces protocoles, il n'y a pas d'intervention du facteur temporel. Elles

permettent de déterminer la conductivité thermique. Pour les méthodes de mesure en régime transitoire (par exemple le fil chaud), les mesures se font en fonction du temps et permettent de déterminer la conductivité thermique, la chaleur spécifique et la diffusivité thermique.

Dans cette partie, nous allons présenter les protocoles des essais effectués ainsi que les résultats obtenus.

5.1. Méthode de la plaque chaude gardée

Cette méthode peut être considérée comme la plus précise pour mesurer la conductivité thermique des matériaux isolants à faible conductivité thermique, où λ est inférieure à 1 W/m.K (Salmon, 2001). Elle est décrite par la norme NF EN 12664 (AFNOR NF EN 12664, 2001). Le principe de la méthode est illustré sur la figure VI-4 :

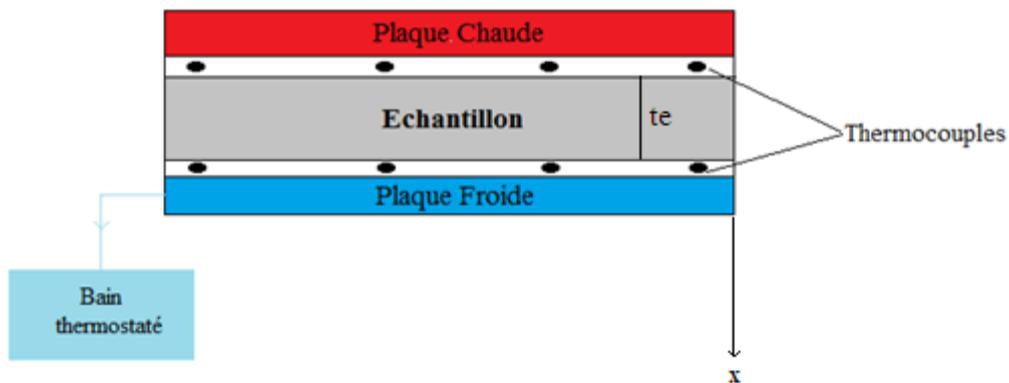


Figure VI-4 : Schéma de principe de la méthode de la plaque chaude gardée.



Figure VI-5 : Essai de la plaque chaude gardée.

Le principe de l'essai est de reproduire les conditions du transfert de chaleur et ce à travers une plaque infinie limitée par deux plans parallèles et isothermes. Nous considérons que le matériau est homogène en surface. Le principe de l'essai consiste à garder une différence de température ΔT entre les deux plaques, chaude et froide, pilotées par l'intermédiaire d'un bain thermostaté permettant d'assurer un flux de chaleur unidirectionnel traversant l'échantillon. L'échantillon est placé entre les deux plaques et entouré d'un isolant (polystyrène) afin de limiter les déperditions latérales du flux de chaleur. On descend la plaque supérieure, chaude, jusqu'à être en contact avec le matériau (le contact thermique est supposé parfait grâce à l'utilisation de pâte thermique) et on débute l'acquisition. La différence de température est mesurée à l'aide de thermocouples installés sur les deux faces de l'échantillon. Un thermocouple est mis en place au niveau de l'anneau de garde afin de garantir l'unidirectionnalité du flux de chaleur. De plus, des fluxmètres sont installés sur chaque face de l'échantillon afin de mesurer le flux qui traverse l'échantillon. Les thermocouples et les fluxmètres sont reliés à un système d'acquisition permettant de déterminer et d'enregistrer les températures et flux au niveau des deux surfaces de l'échantillon. L'exploitation du régime établi permet finalement d'identifier la conductivité thermique des matériaux.

La conductivité thermique est calculée, en état d'équilibre, à partir de l'équation de la conduction thermique (Eq. 76). Ainsi, à partir des conditions initiales et limites (exprimées en l'Eq. 135), on peut exprimer une relation entre la conductivité thermique et les paramètres de l'essai :

Conditions initiales et limites de l'essai :

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla^2 T(x) = 0 \\ T(0) = T_c \\ T(e) = T_f \end{array} \right. \quad (136)$$

On en déduit l'évolution de la température au sein de l'échantillon :

$$T(x) = T_c + \frac{T_f - T_c}{e} x \quad (137)$$

Le flux de chaleur est :

$$\phi = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda \frac{\Delta T S}{e} \quad (138)$$

Et donc, la conductivité s'exprime :

$$\lambda = \frac{\phi e}{S \Delta T} = \frac{\phi e}{S(T_c - T_f)} \quad (139)$$

avec :

- ϕ le flux traversant l'échantillon ;
- e l'épaisseur de l'échantillon ;
- T_c et T_f respectivement les températures de la plaque chaude et la plaque froide ;
- S la surface d'échange.

Les essais ont été réalisés sur des échantillons de dimensions (25x25x6) cm³. Les températures de la plaque chaude et la plaque froide sont fixés de façon à avoir des températures moyennes de 10°, 20°, 30° et 40°C, représentatives des températures caractéristiques du bâtiment, afin de déterminer l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la température. La différence de température entre les deux faces de l'échantillon est maintenue à 10°C tout au long des essais. Les essais sont réalisés initialement sur des échantillons secs (garantir pas une mise à l'étuve avec suivi de l'évolution de la masse). Les échantillons sont isolés à l'aide d'un film en cellophane afin d'éviter les échanges d'humidité tout au long de l'essai. Avant et après l'essai, les échantillons sont pesés afin de s'assurer qu'aucune perte de masse n'est intervenue durant l'essai.

Les résultats des conductivités thermiques des bétons étudiés à l'état sec en fonction de la température sont présentés au tableau VI-1. Les éco-bétons à base de granulats carbonatés présentent des conductivités thermiques inférieures à celle d'un béton à base des granulats ordinaires et de l'argile expansée. Ceci s'explique par le caractère léger et poreux des granulats carbonatés et de la faible conductivité thermique des granulats en vrac. Ces granulats présentent une fraction plus importante d'air emprisonné dans les pores qui entraîne un meilleur pouvoir isolant ($\lambda_{\text{air}} = 0.026 \text{ W/m. K}$).

Tableau VI-1 : Conductivité thermique des matériaux carbonatés en fonction de la température.

Bétons étudiés		ρ_0 (kg/m ³)	λ (W/m.K)				$\lambda(T)$
			10°C	20°C	30°C	40°C	
% C8	100	1710	0.7	0.682	0.664	0.645	$\lambda = 0.7185 - 0.00183 T$
	75	2071	0.767	0.764	0.761	0.758	$\lambda = 0.77 - 0.0003 T$
	50	2486	1.078	1.117	1.156	1.194	$\lambda = 1.0395 + 0.00387 T$
	25	2579	1.173	1.224	1.276	1.328	$\lambda = 1.121 + 0.00517 T$
% PA	100	1826	0.838	0.867	0.895	0.924	$\lambda = 0.895 + 0.00286 T$
	75	1986	0.978	1.009	1.04	1.071	$\lambda = 0.947 + 0.0031 T$
	50	2133	0.972	1.018	1.064	1.111	$\lambda = 0.9255 + 0.00463 T$
	25	2243	1.114	1.164	1.214	1.263	$\lambda = 1.10645 + 0.00497 T$
% BAK	100	2066	0.968	1.006	1.044	1.082	$\lambda = 0.93 + 0.0038 T$
	75	2141	1.011	1.045	1.078	1.111	$\lambda = 0.978 + 0.00333 T$
	50	2215	1.046	1.078	1.109	1.14	$\lambda = 1.015 + 0.00313 T$
	25	2272	1.151	1.169	1.187	1.205	$\lambda = 1.133 + 0.0018 T$
% AE	100	1522	0.716	0.73	0.744	0.758	$\lambda = 0.702 + 0.0014 T$
	75	1574	0.737	0.753	0.769	0.785	$\lambda = 0.721 + 0.0016 T$
	50	1596	0.756	0.768	0.781	0.793	$\lambda = 0.7435 + 0.00124 T$
	25	1612	0.883	0.906	0.929	0.952	$\lambda = 0.86 + 0.0023 T$
% O	100	2340	1.226	1.314	1.403	1.492	$\lambda = 1.137 + 0.00887 T$

Lors de nos essais, nous avons étudiés les conductivités thermiques à différentes températures de 10°C jusqu'à 40°C. Les courbes de la figure VI-6 montrent l'influence de la quantité des granulats carbonatés sur l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la température.

Les résultats montrent que l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la température est une fonction linéaire croissante pour tous les matériaux étudiés à toutes les compositions à l'exception pour les bétons à 75% et 100% C8. Cette augmentation nous laisse prédire que la convection et le rayonnement interviennent pour des températures supérieures. Dans un matériau conducteur, les électrons contribuent au transport de la quantité de chaleur et donc au flux de chaleur en se basant sur l'équation du rayonnement (relation de Wiedemann-Franz).

Quand la température augmente, λ augmente. Cette hypothèse reste valable pour tous les matériaux à l'exception du béton à base de 100% C8 et 75% C8, où la conductivité diminue

lorsque la température augmente. Lorsque la fraction de substitution en granulats dépasse 50%, le matériau présente une structure « bien graphitée ». Ceci s'explique par la microstructure des granulats C8 produite à partir de déchet de REFIOM. En effet, au niveau des cristallites, pour les matériaux bien graphités, l'augmentation de la température provoque une diminution de taille des cristallites qui à son tour est à l'origine de la diminution de la conductivité, d'où l'aspect décroissant des courbes. Nous pouvons en déduire que les granulats carbonatés présents en importante quantité dans le mélange, provoque une augmentation du pouvoir isolant du matériau.

Pour les bétons à base de C8, la conductivité diminue de 30% environ lorsque le pourcentage des granulats C8 dépasse 50%. Quand le pourcentage de granulats PA est supérieur à 75%, la conductivité thermique des bétons diminue de 18% et de 20% lorsque le pourcentage des granulats AE est supérieur à 25%. Pour les bétons à base de granulats BAK, la conductivité est pratiquement similaire, elle diminue uniquement de 2% environ lorsque le pourcentage des granulats BAK dépasse 25%.

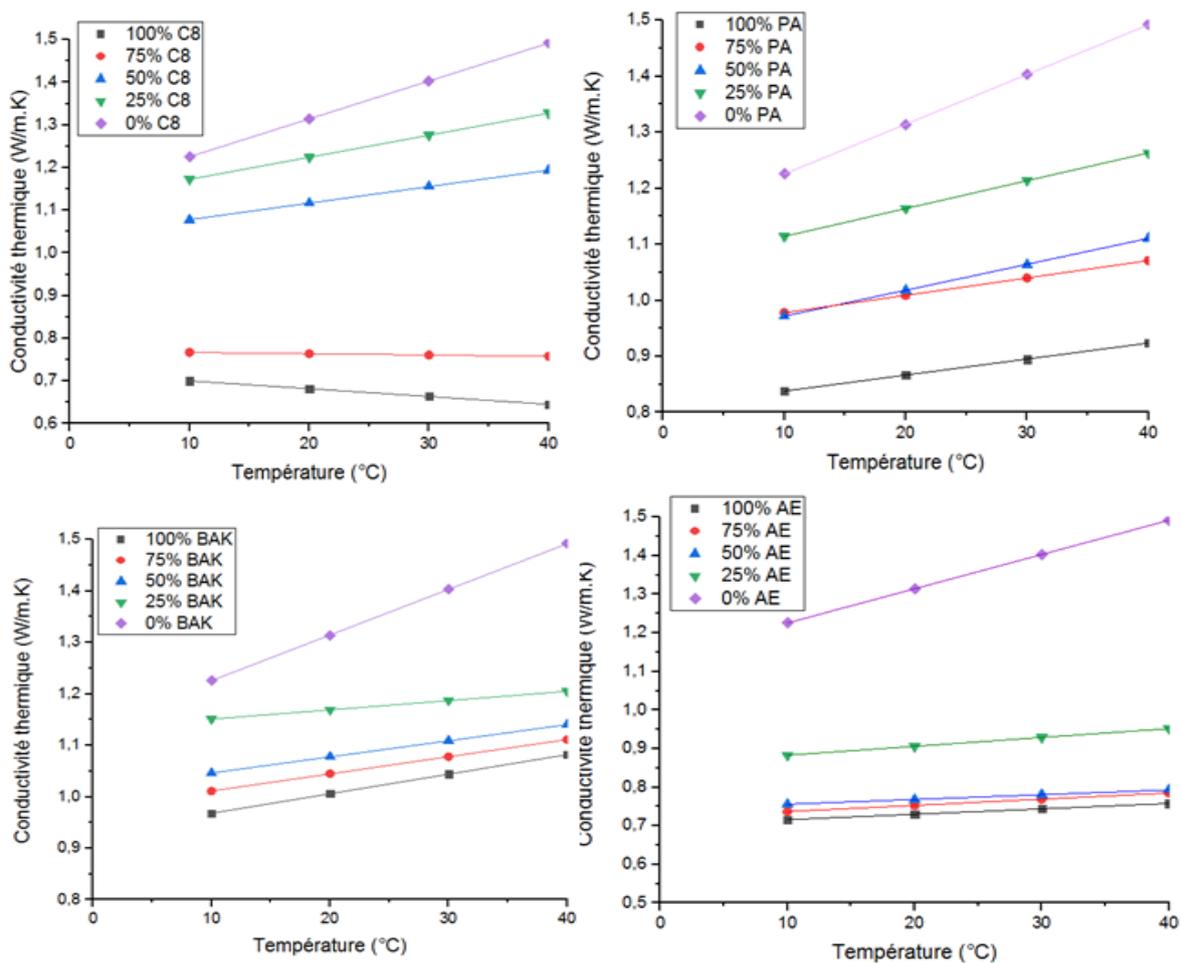


Figure VI-6 : Conductivités thermiques des bétons étudiés en fonction de la température.

La température a donc une influence sur la conductivité thermique (Neville, 2000). Les auteurs (NGUYEN, 2013)(KIM, 2003)(Merechal, 1970) s'accordent sur le fait que les conductivités thermiques augmentent jusqu'à une plage de température de 60-80°C puis connaissent une chute jusqu'à 120-140°C jusqu'à stabilisation. Ces variations sont dues à l'eau disponible dans le béton. La conductivité thermique de l'eau augmente avec la température et par conséquent celle du béton augmente. A une certaine température, à priori 80°C, l'eau adsorbée contenue dans le béton commence à s'évaporer et donc provoque une diminution de la conductivité thermique.

La conductivité thermique des bétons dépend aussi de la conductivité thermique des granulats, de la matrice liante ainsi que le pourcentage des granulats dans la composition. La porosité et l'absorption d'eau des granulats légers influent sur la conductivité thermique des granulats légers, et, par conséquence, sur celle des bétons. L'absorption d'eau élevée permet le passage d'eau dans les pores ouverts des bétons. Comme la conductivité thermique de l'eau est supérieure à celle de l'air, il y a une augmentation des transferts thermiques par conduction. Le béton le plus poreux contient plus d'air. Il est donc un meilleur isolant thermique. La valeur de conductivité thermique diminue avec la réduction de la masse volumique du matériau (tableau VI-1). Plus le matériau est léger et poreux, plus sa conductivité thermique est faible.

Afin d'optimiser la formulation de chaque type de béton à base des granulats carbonatés, l'étude thermique doit ainsi se baser sur l'influence de la quantité des granulats.

Par ailleurs, les courbes sur la figure VI-7 montrent bien l'aspect linéaire de l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la température, selon la qualité du matériau. Elles résument l'influence du type de granulats carbonatés (présent dans la même proportion dans le mélange) sur la conductivité thermique. On constate que la présence de granulats carbonatés en faibles proportions (inférieur ou égale à 50%) entraîne une faible réduction de la conductivité thermique par rapport à un béton courant. En effet, dans ce cas, la conductivité thermique des bétons ainsi formulés est supérieure à 1 W/m.K. En revanche, une proportion plus importante de granulats carbonatés aura une répercussion significativement positive, avec la baisse de la conductivité thermique pouvant être inférieure à 1 W/m.K. Le granulat C8 permet même d'obtenir une conductivité thermique proche de celle du béton à base d'argile expansée. Ces résultats s'expliquent par la répartition des pores ou des vides dans le béton. En

effet, ces derniers présentent une forte conductivité thermique, à cause de la faible fraction d'air emprisonné dans les pores du matériau. Par ailleurs, pour des forts pourcentages en granulats carbonatés, le béton aura un caractère léger à cause de la forte porosité des granulats. De ce fait, le béton devient un meilleur isolant thermique grâce à la fraction importante d'air emprisonné dans les pores et les vides du matériau.

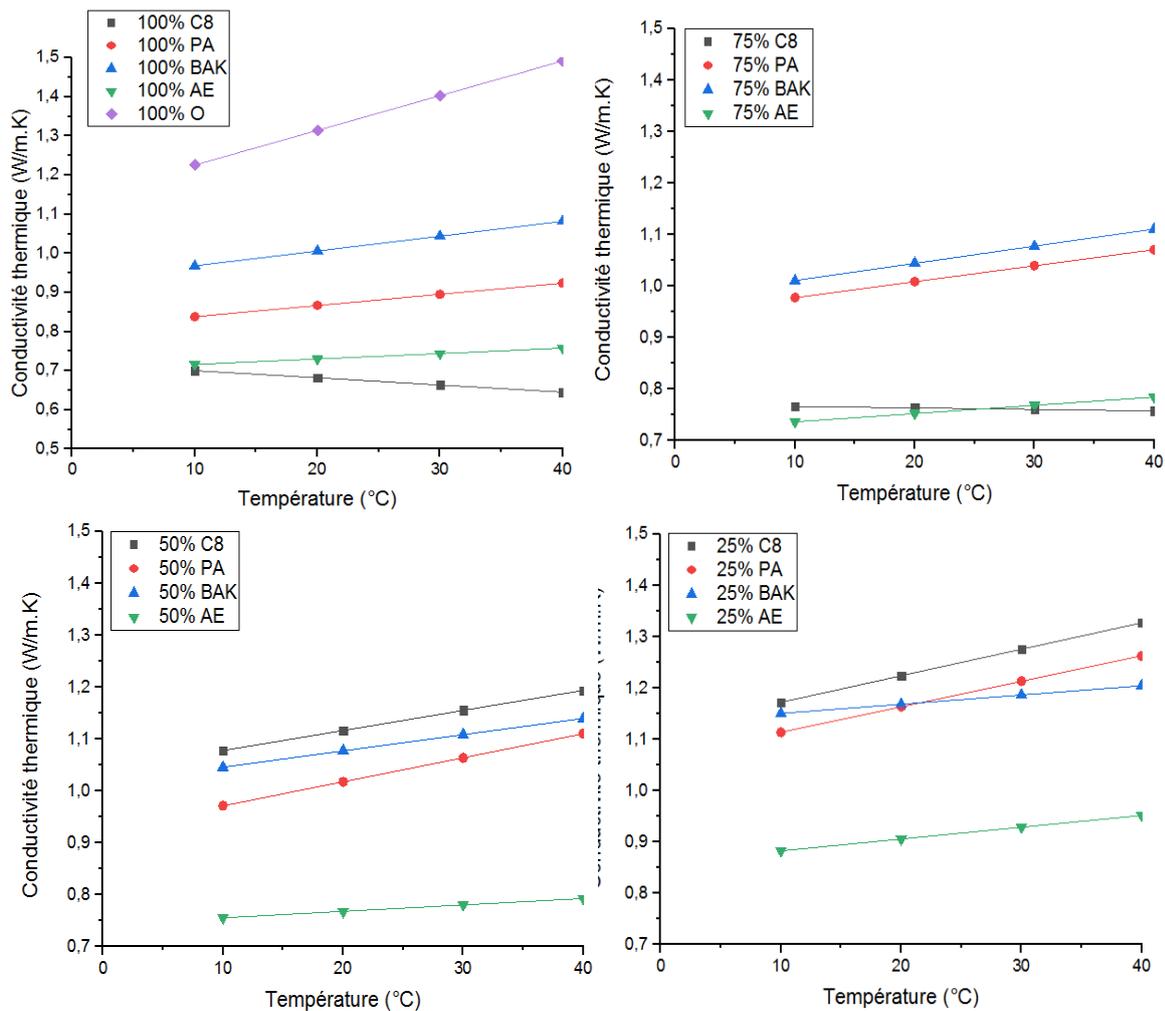


Figure VI-7 : Influence de la qualité des granulats sur la conductivité thermique.

5.2. Méthode fluxmétrique

La méthode fluxmétrique, schématisée sur la figure VI-8, est identique au principe de la méthode de la plaque chaude gardée à savoir l'établissement en régime permanent d'une densité de flux thermique unidirectionnelle et uniforme dans l'espace. L'échantillon est placé entre une plaque chaude et une plaque froide horizontales, les deux reliées à des bains thermostatés afin d'assurer la régulation de leur température par déplacement d'eau glycolée.

D'abord, pendant 12 h, l'échantillon est mis entre les deux plaques maintenues à 15°C afin d'assurer un état d'équilibre. Puis, un gradient de température est appliqué par le truchement de la plaque supérieure où la température est maintenue constante à 25°C. Les pertes thermiques latérales sont limitées par la présence d'un isolant en périphérie de l'échantillon. L'exploitation de cette méthode en régime établi conduit à l'identification de la conductivité thermique. En régime transitoire, elle nous permet de déterminer la capacité thermique massique.

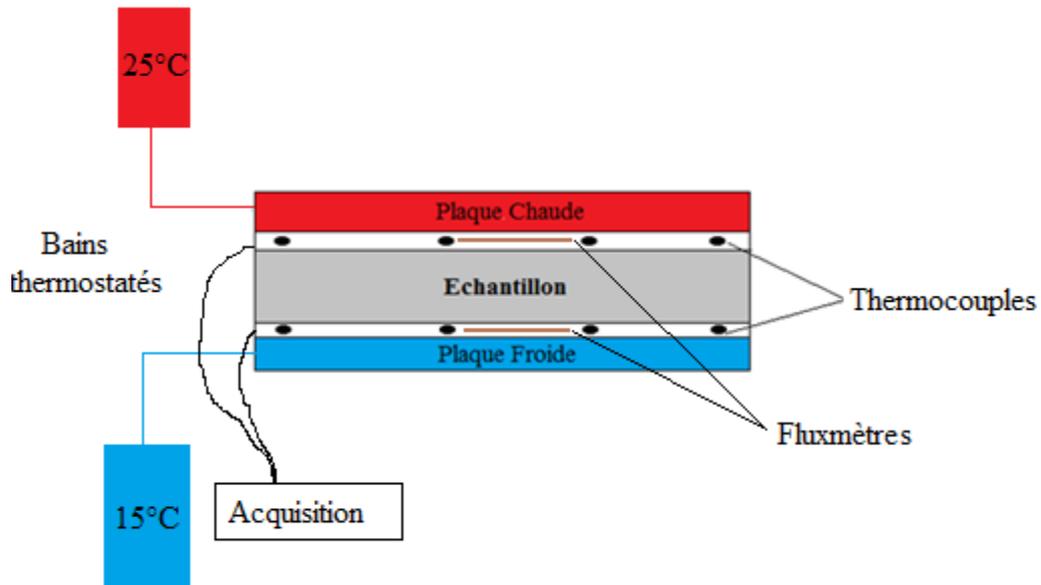


Figure VI-8 : Schéma de principe pour la méthode fluxmétrique.



Figure VI-9 : Essai fluxmétrique au sein du laboratoire de l'UPJV.

Les mêmes échantillons de dimensions (25x25x6) cm³ que précédemment ont été utilisés pour cet essai. Avant chaque essai, les échantillons sont stabilisés à 23°C et 50% d'humidité relative.

Grâce à la mesure de la capacité thermique massique et de la conductivité thermique, il est ainsi possible de calculer les diffusivité et effusivité thermiques. Le tableau VI-2 résume les différentes caractéristiques thermiques des bétons étudiés.

Tableau VI-2 : Caractéristiques thermiques des bétons étudiés.

Bétons étudiés		λ (w/m.K)	C_p (J/kg.K)	a (10^{-6} m ² /s)	E (J/m ² .K.s ^{1/2})
% C8	100	0.778	1640	0.42	1134
	75	0.874	1263	0.48	1178
	50	1.124	1200	0.53	1239
	25	1.213	1025	0.54	1310
% PA	100	0.828	1563	0.51	1133
	75	0.9633	1461	0.55	1179
	50	1.0364	1445	0.55	1207
	25	1.0652	1372	0.59	1287
% BAK	100	1.1067	1087	0.64	1018
	75	0.8723	996	0.58	1145
	50	1.068	952	0.65	1287
	25	0.9756	882	0.63	1356
% AE	100	0.7249	1757	0.54	910
	75	0.795	1564	0.57	989
	50	0.832	1489	0.61	1064
	25	0.8906	1366	0.63	1203
% O	0	1.23	815	0.72	1449

La figure VI-10 présente les évolutions de la chaleur spécifique et de la diffusivité des bétons en fonction du taux de substitution par des granulats carbonatés. Des relations linéaires semblent, à première vue, se dégager, selon la nature des granulats. Lorsque la fraction des granulats carbonatés augmente, nous pouvons constater que la chaleur spécifique augmente. En effet, la conduction de la chaleur dans un matériau poreux dépend de celle des granulats et du réseau des pores interconnectés. L'utilisation d'un pourcentage important des granulats carbonatés augmente le volume des pores dans le béton, et par conséquent entraîne l'augmentation du volume d'air, d'où des valeurs de chaleur spécifique importantes

($C_{p \text{ air}}=1005 \text{ J/kg.K}$). Globalement, la chaleur massique augmente avec la diminution de la densité des bétons. Ceci est généré par la porosité élevée des granulats carbonatés.

Les résultats ont montré que la diminution de la densité s'accompagne d'une diminution de la conductivité thermique et l'augmentation de la chaleur spécifique. Les caractéristiques λ , ρ et C_p interviennent sur la conduction de la chaleur d'où et, par voie de conséquence, sur la diffusivité thermique ($a = \frac{\lambda}{\rho C_p}$). Une augmentation de la chaleur spécifique entraîne donc une diminution de la diffusivité thermique qui est directement liée à l'évolution de la conductivité thermique.

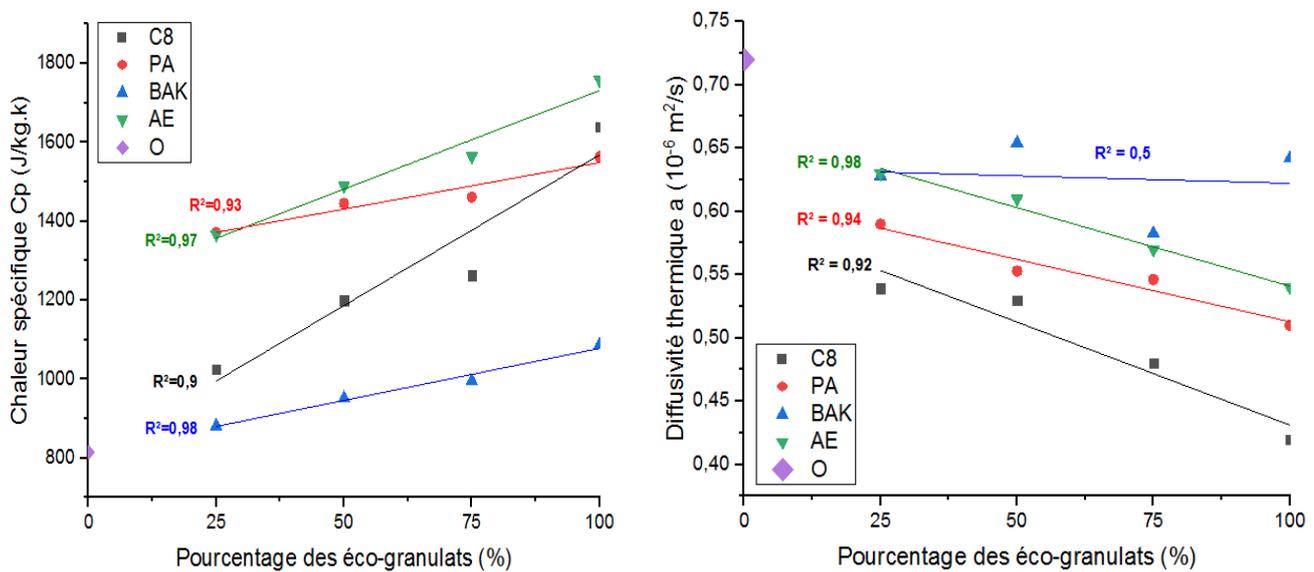


Figure VI-10 : Évolution de la chaleur spécifique et de la diffusivité thermique des bétons en fonction du taux de substitution avec des granulats carbonatés

Nous pouvons aussi remarquer l'influence du type granulat sur l'évolution des propriétés thermiques : la substitution des granulats ordinaires par des granulats carbonatés entraîne une diminution de la diffusivité et une augmentation de la chaleur spécifique.

La chaleur spécifique caractérise la capacité d'un matériau à emmagasiner la chaleur. Les valeurs trouvées sont supérieures à celle du béton ordinaire. Donc les bétons à base de granulats carbonatés peuvent stocker une quantité plus importante de chaleur avant de la restituer. La chaleur spécifique est plus élevée quand le matériau est plus léger.

Les valeurs de la diffusivité thermique des bétons étudiés sont inférieures à celle du béton ordinaire ($a = 0.72 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$). Leur faible diffusivité thermique ainsi que leur faible

conductivité thermique, comparées à celles du béton ordinaire, leurs attribuent un meilleur caractère isolant que le béton traditionnel. L'inertie thermique d'une paroi constituée à l'aide de béton de granulats carbonatés paraîtrait ainsi améliorée.

L'effusivité thermique représente la rapidité de l'échange d'énergie dans le matériau ainsi que la sensation de chaud ou de froid au touché. Les valeurs d'effusivité thermique des bétons étudiés sont de l'ordre de $1100 \text{ J.m}^{-2}.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1/2}$. Ces valeurs sont légèrement inférieures à celle du béton ordinaire ($E= 1449 \text{ J.m}^{-2}.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1/2}$). Ces bétons donnent donc une bonne sensation au touché et peuvent ainsi éviter la notion de parois froides, caractéristique du confort thermique d'un local.

Les valeurs de conductivité thermique mesurées par la méthode fluxmétrique sont assez proches de celles précédemment mesurées par la méthode plaque chaude gardée avec une précision de 0.01 W/m.K (tableau VI-3). Cette observation semble donc confirmer les résultats obtenus par ces deux méthodes.

Tableau VI-3 : Comparaison des valeurs de la conductivité thermique par les deux méthodes d'essai.

Bétons étudiés		λ fluxmétrique (w/m.K)	λ plaque chaude gardée (w/m.K)	Écart Type	Écart moyen
% C8	100	0.778	0.7	0.055	0.039
	75	0.874	0.767	0.076	0.054
	50	1.124	1.078	0.033	0.023
	25	1.213	1.173	0.029	0.02
% PA	100	0.828	0.838	0.007	0.005
	75	0.963	0.978	0.01	0.007
	50	1.036	0.972	0.046	0.032
	25	1.065	1.114	0.034	0.024
% BAK	100	1.107	1.011	0.067	0.048
	75	0.872	0.968	0.068	0.048
	50	1.068	1.151	0.059	0.041
	25	0.976	1.046	0.05	0.035
% AE	100	0.725	0.716	0.006	0.004
	75	0.795	0.737	0.041	0.029
	50	0.832	0.756	0.054	0.038
	25	0.891	0.883	0.006	0.004
% O	0	1.23	1.226	0.003	0.002

La mise en œuvre de la méthode fluxmétrique est limitée par l'aptitude de l'appareil à produire une densité de flux thermique constante et unidirectionnelle à travers des éprouvettes, et par la précision dans la mesure de la température, de l'épaisseur, de la force électromotrice produite par le fluxmètre, etc. Les sources d'erreurs sont donc très similaires à celles déjà examinées dans le cas de la méthode de la plaque chaude gardée. La condition idéale de densité de flux thermique unidirectionnelle ne peut être réalisée dans la totalité de la surface de l'éprouvette et du fluxmètre. Cela implique le fait d'accorder impérativement une attention spéciale aux problèmes des fuites thermiques par les bords de l'éprouvette et du fluxmètre ainsi que la planéité et parallélisme des éprouvettes.

L'incertitude de mesure de la méthode fluxmétrique est limitée par le procédé d'étalonnage et ne peut pas être meilleure que celle de la méthode de la plaque chaude gardée utilisée pour la définition des étalons ou matériaux de référence.

Les conductivités thermiques des bétons étant déterminées expérimentalement et théoriquement, les résistances thermiques des bétons étudiés $R_{\text{béton}}$ peuvent être calculées à partir de l'équation 128 ; les résultats sont présentés au tableau VI-4. A partir de la résistance thermique des bétons étudiés et de la conductivité thermique de ces constituants (granulat, sable et ciment), nous pouvons donc appliquer les modèles d'associations en série (équations 89 à 91) et en parallèle (équations 95 à 97) afin de calculer respectivement $R_{\text{béton},s}$ et $R_{\text{béton},p}$. Ces deux termes sont calculés comme suit :

$$R_{\text{béton},s} = R_{\text{squelette}} + R_{\text{ciment}} \quad (140)$$

$$\frac{1}{R_{\text{béton},p}} = \frac{1}{R_{\text{squelette}}} + \frac{1}{R_{\text{ciment}}} \quad (141)$$

La conductivité thermique théorique du ciment est considérée égale à 1.56 W/(m.K), déterminée à partir de l'exploitation du modèle HAC (tableau VI-6) ce qui nous permet de calculer les valeurs de résistance thermique des bétons de granulats carbonatés à l'aune des résultats obtenus dans le chapitre III. Les résultats présentés dans le tableau VI-4 montre que la résistance thermique du béton est limitée par les deux valeurs de résistances thermiques calculées à partir d'une association en série et en parallèle. Ces deux modèles « limites » permettent ainsi de borner la valeur de la résistance thermique des bétons de granulats carbonatés. La valeur moyenne des deux approches conduit à une approximation de la résistance thermique des bétons avec un écartype de l'ordre de 15%.

Tableau VI-4 : Résistances thermiques des bétons étudiés.

Bétons étudiés		λ_b (W/m.K)	R béton (m ² .K/W)	$\lambda_{\text{granulat}}$ (W/m.K)	λ_{sable} (W/m.K)	$\lambda_{\text{squelette}}$ (W/m.K)	R béton,s (m ² .K/W)	R béton,p (m ² .K/W)
% C8	100	0.778	0.461	0.540	0.950	0.800	0.679	0.152
	75	0.874	0.411	0.590	0.950	0.820	0.668	0.151
	50	1.124	0.289	0.670	0.950	0.851	0.589	0.135
	25	1.213	0.267	0.670	0.950	0.851	0.589	0.135
% PA	100	0.828	0.392	0.530	0.950	0.792	0.617	0.138
	75	0.963	0.337	0.590	0.950	0.816	0.605	0.136
	50	1.036	0.313	0.660	0.950	0.844	0.592	0.135
	25	1.065	0.304	0.660	0.950	0.844	0.592	0.135
% BAK	100	1.107	0.293	0.620	0.950	0.832	0.598	0.136
	75	0.872	0.372	0.570	0.950	0.812	0.607	0.137
	50	1.068	0.304	0.660	0.950	0.847	0.591	0.135
	25	0.976	0.332	0.730	0.950	0.873	0.579	0.133
% AE	100	0.725	0.447	0.390	0.950	0.731	0.651	0.142
	75	0.795	0.408	0.420	0.950	0.745	0.643	0.141
	50	0.832	0.390	0.620	0.950	0.829	0.599	0.136
	25	0.891	0.364	0.730	0.950	0.871	0.580	0.133
% O	0	1.230	0.264	0.810	0.950	0.894	0.571	0.132

IV. Modèle de prédiction des performances thermiques

La conductivité thermique est la caractéristique la plus étudiée puisqu'elle ne dépend que de la structure du matériau et de ses constituants. Afin de modéliser la conductivité thermique dans les milieux poreux, il existe différents modèles théoriques. Le plus utilisé, dans le cas des matériaux de construction, est le modèle par homogénéisation auto-cohérente HAC (Cerezo, 2005), (Collet, 2004), (Boutin, 1996), (Arnaud, et al., 2000), (Rahim, 2015), (Bederina, et al., 2007). Le modèle HAC a commencé à être utilisé à la modélisation mécanique (Hill, 1965) et la conduction électrique puis par analogie, il est utilisé pour la modélisation de la conductivité thermique (Kerner, 1956). C'est une méthode qui repose sur le fait d'assimiler un matériau hétérogène à un matériau homogène fictif équivalent pour lequel on doit déterminer les caractéristiques. La mise en œuvre de cette technique nécessite un volume élémentaire représentatif (VER) et le respect de la condition de séparation d'échelle.

Ainsi un passage de l'échelle microscopique à l'échelle macroscopique est effectué en exprimant la conductivité thermique globale du matériau en fonction des caractéristiques de

chaque constituant (conductivité, concentration volumique). Le milieu hétérogène est assimilé à un assemblage d'inclusions composites sphériques de taille variable. Pour un milieu bi-phasique, une sphère de rayon R_1 représentant le constituant 1 (λ_1, ρ_1) est entourée par une coquille concentrique de rayon externe R_2 (λ_2, ρ_2). Ce modèle peut également être étendu à un modèle tri-composite par un simple ajout d'une sphère de composite 3 de rayon externe R_3 (λ_3, ρ_3). Les deux approches sont détaillées dans les paragraphes suivants.

1. HAC avec des inclusions simples

Pour un milieu constitué d'inclusions simples, le problème se traite en deux étapes. Tout d'abord, le champ des températures dans le milieu constitué d'une inclusion sphérique de rayon R_1 et du milieu homogène soumis à un gradient G unitaire à l'infini est déterminé. L'équation générale de la chaleur est de la forme :

$$\lambda \Delta T + \text{grad } T \cdot \text{grad } \lambda + m = \rho C \left(\frac{\partial T}{\partial t} + U \cdot \text{grad } T \right) \quad (142)$$

Cette dernière est simplifiée en prenant en compte quelques hypothèses :

- la conductivité thermique des matériaux varie peu avec la température donc $\text{grad } \lambda = 0$;
- il n'existe pas de production interne de chaleur donc $m = 0$;
- le solide est considéré comme immobile donc $u = 0$;
- et le régime est permanent, donc $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$.

Nous aurons donc, au final, l'équation suivante (équation de Laplace) :

$$\lambda \Delta T = 0 \quad (143)$$

dont la solution est de la forme :

$$T_i = \left(A_i r + \frac{B_i}{r^2} \right) \cos \theta \quad (i = 1, \text{eq}) \quad (144)$$

Les conditions aux limites imposent que :

- $R = 0$ T_1 fini donc $B_1 = 0$
- $R = \infty$ $(\text{grad } T)_{\text{eq}}$ tend vers le gradient de température à l'infini G donc $A_{\text{eq}} = 1$
- $R = R_1$ T est continue donc $\frac{B_{\text{eq}}}{R_1^2} + R_1 = A_1 R_1$
- $R = R_1$ le flux est continue donc $\lambda_{\text{eq}} \left(1 - \frac{2B_{\text{eq}}}{R_1^3} \right) = \lambda_1 A_1$

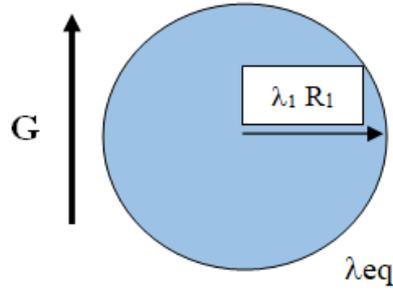


Figure VI-11 : Inclusion sphérique simple soumise à un gradient de température G unitaire.

Nous obtenons donc un système de deux équations à deux inconnues A_1 et B_1 , dont la solution est :

$$A_1 = \frac{3 \lambda_{eq}}{\lambda_1 + 2 \lambda_{eq}} \quad (145)$$

$$\frac{B_1}{R_1^3} = \frac{\lambda_{eq} - \lambda_1}{\lambda_1 + 2 \lambda_{eq}} \quad (146)$$

Le milieu est supposé formé de deux inclusions simples 1 et 2 de concentrations volumiques θ_1 et θ_2 telles que $\theta_1 + \theta_2 = 1$.

La conservation de flux s'écrit alors :

$$\lambda_{eq}(\text{grad } T)_{eq} = \theta_1 \lambda_1 (\text{grad } T)_1 + \theta_2 \lambda_2 (\text{grad } T)_2 \quad (147)$$

Si nous considérons que les deux inclusions sont soumises au même gradient de température à l'infini G on obtient :

$$(\text{grad } T)_{eq} = \theta_1 (\text{grad } T)_1 + \theta_2 (\text{grad } T)_2 \quad (148)$$

Nous pouvons donc en déduire :

$$\lambda_{eq}(\theta_1 (\text{grad } T)_1 + \theta_2 (\text{grad } T)_2) = \theta_1 \lambda_1 (\text{grad } T)_1 + \theta_2 \lambda_2 (\text{grad } T)_2 \quad (149)$$

Soit :

$$\lambda_{eq}(\theta_1 A_1 + \theta_2 A_2) = \theta_1 \lambda_1 A_1 + \theta_2 \lambda_2 A_2 \quad (150)$$

D'où :

$$\theta_1 \frac{\lambda_1 - \lambda_{eq}}{\lambda_1 + 2 \lambda_{eq}} + (1 - \theta_1) \frac{\lambda_2 - \lambda_{eq}}{\lambda_2 + 2 \lambda_{eq}} = 0 \quad (151)$$

On pose :

$$X = \frac{\lambda_{eq}}{\lambda_2}$$

$$\beta = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

On obtient l'équation de second degré suivante :

$$2 X^2 + X [3\theta_1 - 2 + \beta(1 - 3\theta_1)] - \beta = 0 \quad (152)$$

Il suffit alors de déterminer X et d'en déduire la valeur de λ_{eq} .

2. HAC avec inclusions bi-composite

Comme dans le cas d'inclusions simples, le milieu est soumis à un gradient de température infinie G.

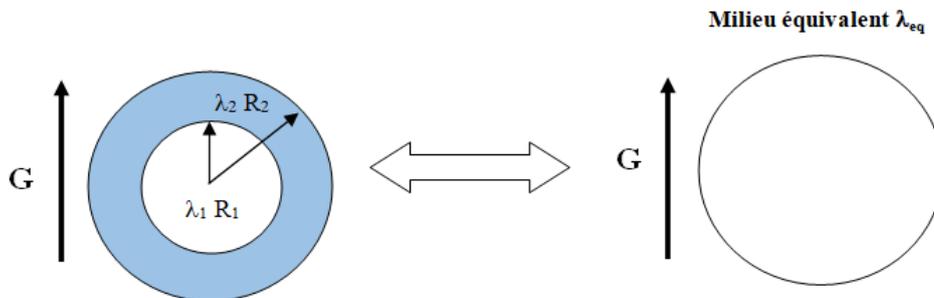


Figure VI-12 : Équivalence entre milieu homogène et un milieu bi-composite à inclusion sphérique.

Les conditions aux limites imposent que :

- $r = 0$ T_1 finie donc $B_1 = 0$
- $r = \infty$ $(\text{grad } T)_{eq}$ tend vers G donc $A_{eq} = 1$
- $r = R_1$ T est continue donc $\frac{B_2}{R_1^2} + A_2 R_1 = A_1 R_1$
- $r = R_1$ le flux est continu donc $\lambda_2 \left(A_2 - \frac{2B_2}{R_1^3} \right) = \lambda_1 A_1$
- $r = R_2$ T est continue donc $\frac{B_2}{R_2^2} + A_2 R_1 = R_2 + \frac{B_{eq}}{R_2^2}$
- $r = R_2$ le flux est continu donc $\lambda_2 \left(A_2 - \frac{2B_2}{R_2^3} \right) = \lambda_{eq} \left(1 - \frac{2 B_{eq}}{R_2^3} \right)$

La conductivité thermique équivalente dans le cas du modèle avec le motif générique double phases est :

$$\lambda_{eq} = \lambda_2 \left(1 + \frac{\theta}{\frac{1-\theta}{3} + \frac{1}{\frac{\lambda_1-1}{\lambda_2}}} \right) \quad (153)$$

avec la concentration volumique de la phase interne 1 qui s'exprime $\theta = \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^3$.

Pour le cas de modèle à inclusion tri-composite, la même méthode que précédemment peut être appliquée afin de déterminer la conductivité. L'équation devient (**Boutin, 1996**) :

$$\lambda_{eq} = \lambda_3 \left(1 + \frac{\theta}{\frac{1-\theta}{3} + \frac{3 + \left(\frac{\lambda_1-1}{\lambda_2}\right)\delta}{3\left(\frac{\lambda_1-1}{\lambda_3}\right) - \delta\left(\frac{\lambda_1-1}{\lambda_2}\right)\left(\frac{2\lambda_2+1}{\lambda_3}+1\right)}} \right) \quad (154)$$

avec les concentrations volumiques $\theta = \left(\frac{R_2}{R_3}\right)^3$ et $\delta = 1 - \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^3$

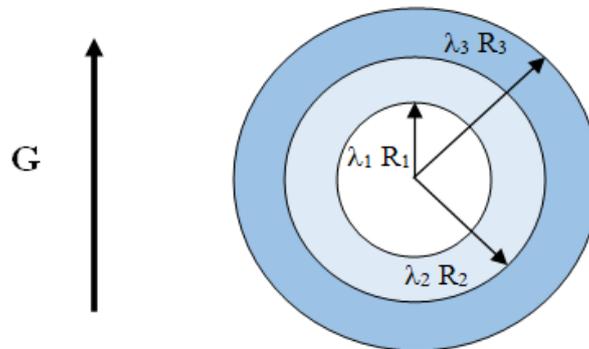


Figure VI-13 : Inclusion sphérique tri-composite.

3. Étude analytique d'un béton à base des granulats carbonatés à l'état sec

Le béton à base des granulats carbonatés est constitué de 3 phases. Nous considérons alors le modèle à inclusions tri-composite avec une bulle d'air entourée de granulats, elles-mêmes entourées de liant.

Ce type d'inclusion générique est basé sur 3 hypothèses :

- le liant est constitué de ciment en poudre et de bulle d'air microscopique (air intra-liant) ;
- les particules sont constituées des granulats carbonatés et/ou des granulats ordinaires et de l'air intra-particules ;
- la bulle d'air correspond à l'air macroscopique contenu dans le matériau (hors liant et hors granulats).

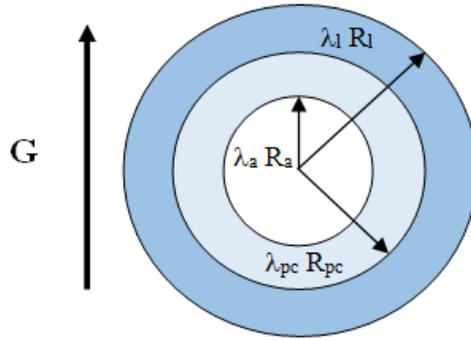


Figure VI-14 : Inclusion sphérique représentant le matériau à l'état sec.

L'équation de la conductivité thermique équivalente s'écrit alors :

$$\lambda_{eq} = \lambda_l \left(1 + \frac{\theta}{\frac{1-\theta}{3} + \frac{3 + \left(\frac{\lambda_a}{\lambda_{pc}} - 1\right)\delta}{3\left(\frac{\lambda_a}{\lambda_l} - 1\right) - \delta\left(\frac{\lambda_a}{\lambda_{pc}} - 1\right)\left(\frac{2\lambda_{pc}}{\lambda_l} + 1\right)}} \right) \quad (155)$$

avec :

- λ_{eq} la conductivité thermique équivalente à l'état sec ;
- λ_l la conductivité thermique du liant ;
- λ_a la conductivité thermique de l'air ;
- λ_{pc} la conductivité thermique de la partie composée des granulats (partie solide) ;
- θ et δ les coefficients de concentrations volumiques où :

$$\theta = \left(\frac{R_{pc}}{R_l}\right)^3$$

et

$$\delta = 1 - \left(\frac{R_a}{R_{pc}}\right)^3$$

Les coefficients de concentration de volume δ et θ peuvent être évalués comme suit :

$$\theta = n + \left(\frac{\rho_0}{\rho_{s,pc}}\right) \left(\frac{1}{1 + \frac{m_l}{m_{pc}}}\right) \quad (156)$$

et $\delta = 1 - \frac{n}{\theta}$

avec :

- m_{pc} la masse particules (granulats) dans la formulation de béton ;
- m_l la masse de liant dans la formulation de béton ;

- ρ_0 la masse volumique à l'état sec ;
- $\rho_{s,pc}$ la masse volumique réelle des particules ;
- n la porosité.

A partir de la mesure expérimentale de la conductivité macroscopique du béton, considéré comme étant un milieu équivalent, on peut déduire la valeur de la conductivité des granulats $\lambda_{s,pc}$ en inversant la formule obtenue dans le cas du modèle tri-composite.

Nous considérons alors une structure tri-composite avec une bulle d'air centrale représentant l'air intra-particule (phase 1) de rayon $R_{a, intra}$, entourée d'un granulat (particule) (phase 2 connexe) de rayon $R_{s,pc}$, elle-même entourée de l'air inter-particule.

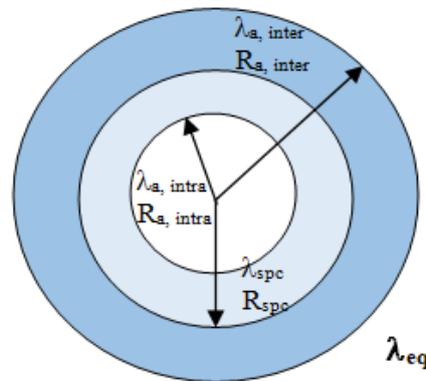


Figure VI-15 : Générique tri-composite.

La conductivité thermique du béton s'écrit alors :

$$\lambda_{pc} = \lambda_a \left(1 + \frac{\theta}{\frac{1-\theta}{3} + \frac{3 + \frac{\lambda_a - 1}{\lambda_{s,pc}} \delta}{\delta \left(1 - \frac{\lambda_a}{\lambda_{s,pc}}\right) \left(1 + \frac{2\lambda_{s,pc}}{\lambda_a}\right)}}} \right) \quad (157)$$

avec les coefficients de concentration de volume δ et θ qui peuvent être évalués comme suit :

$$\theta = \frac{\rho_{PC}}{\rho_{pc}}$$

$$\delta = \frac{\rho_{pc}}{\rho_{s,pc}}$$

où :

- ρ_{PC} la masse volumique des particules (granulats) en vrac ;
- ρ_{pc} la masse volumique du béton à base des granulats ;

- $\rho_{s,pc}$ la masse volumique réelle des particules (granulats) ;
- $\lambda_{s,pc}$ la conductivité thermique des particules (partie solide) ;
- λ_a la conductivité thermique de l'air.

Les paramètres de calcul du modèle HAC, nécessaires pour la détermination de la conductivité thermique de la fraction solide des granulats, sont présentés dans le tableau VI-5 :

Tableau VI-5 : Détermination de la conductivité thermique des particules par le modèle HAC.

Granulat	C8	PA	BAK	AE	O
$\rho_{s,pc}$ [kg/m ³]	2560	2440	2490	1860	2590
ρ_{pc} [kg/m ³]	1820	1440	1950	1200	2500
ρ_{pc} [kg/m ³]	1100	880	1086	700	1360
θ	0.289	0.410	0.217	0.355	0.035
λ_a [W/m.K]	0.026				
$\lambda_{s,pc}$ [W/m.K]	0.54	0.53	0.62	0.39	0.81
$\lambda_{pc,exp}$ [W/m.K]	0.2	0.15	0.2	0.15	0.24

Avec une démarche similaire, nous pouvons déterminer la conductivité thermique du liant (tableau VI-6). Considérons alors un échantillon constitué de deux phases : des particules de liant hydratées et de l'air. De ce fait, on considère une structure avec une bulle d'air centrale de rayon R_a entourée d'une particule de liant (phase connexe) de rayon R_l .

$$\frac{\lambda_l}{\lambda_{s,l}} = 1 + \frac{\theta}{\frac{1-\theta}{3} + \frac{1}{\frac{\lambda_a}{\lambda_{s,l}} - 1}} \quad (158)$$

avec

- λ_l la conductivité thermique du bloc de liant ;
- $\lambda_{s,l}$ la conductivité thermique du liant ;
- λ_a la conductivité thermique de l'air ambiant.

Tableau VI-6 : Propriété physique du liant Portlandite.

Propriété physique	Liant
λ_L [W/m.K]	0.5
λ_a [W/m.K]	0.0262
$\theta = n$	0.59
$\lambda_{s,L}$ [W/m.K]	1.56

Les bétons de notre projet sont composés de trois phases, nous utilisons donc le modèle HAC à inclusions tri-composite afin de déterminer la conductivité thermique équivalente du béton. Les données d'entrée du modèle HAC pour la détermination de la conductivité thermique des bétons sont résumées dans le tableau VI-7 :

Tableau VI-7 : Données d'entrée du modèle HAC.

Granulat	C8	PA	BAK	AE	O
ρ_0 [kg/m ³]	2010	2226	2141	1522	2340
$\rho_{s,pc}$ [kg/m ³]	2560	2440	2490	1860	2590
$\lambda_{s,pc}$ [W/m.K]	0.53	0.39	0.62	0.81	0.54
$\lambda_{s,L}$ [W/m.K]	1.56				
λ_a [W/m.K]	0.0262				
$k=m_1 / m_{pc}$	0.35	0.40	0.33	0.54	0.32
θ	0.32	0.28	0.27	0.55	0.19
δ	0.63	0.94	0.79	0.52	1.13

La méthode auto cohérente a permis d'évaluer la conductivité thermique des 17 bétons étudiés à l'état sec. Les résultats sont en accord avec les mesures expérimentales (tableau VI-8). L'avantage de cette méthode est, d'une part de donner une expression analytique simple, et d'autre part, de mettre clairement en évidence les paramètres (porosité, conductivité des constituants, formulation) qui gouverne la conductivité thermique d'ensemble du matériau.

Tableau VI-8 : Comparaison des conductivités thermiques expérimentales et théoriques.

Bétons étudiés		λ théorique (W/m.K)	λ expérimentale (W/m.K)	Écart type
% C8	100	0.66	0.7	0.028
	75	0.7	0.725	0.018
	50	0.94	0.98	0.028
	25	1.01	1.1	0.064
% PA	100	0.74	0.884	0.102
	75	0.64	0.978	0.239
	50	0.73	0.02	0.502
	25	0.79	1.17	0.269
% BAK	100	0.75	1.01	0.184
	75	0.7	0.968	0.19
	50	0.82	1.15	0.233
	25	0.81	1.05	0.17
% AE	100	0.44	0.676	0.167
	75	0.45	0.777	0.231
	50	0.5	0.707	0.146
	25	0.49	0.883	0.278
% O	100	0.9	1.23	0.233

4. Approche empirique simplifiée

Le modèle HAC met en exergue l'influence prépondérante de la porosité et de l'absorption d'eau des granulats carbonatés pour prédire la conductivité thermique des bétons. Ainsi, il demeure envisageable de proposer un modèle empirique, simplifié, afin de prédire la conductivité thermique d'un béton de granulats carbonatés à l'aide des caractéristiques principales des granulats. Pour ce faire, le modèle HAV se base sur la masse volumique réelle des granulats utilisés. Pour l'établissement d'un modèle empirique, nous proposons de nous baser sur une masse volumique réelle homogénéisée des granulats qui composent le squelette granulaire des bétons :

$$\rho_{s,pc}^* = P \times \rho_{car} + (1 - P) \times \rho_{ord} \quad (159)$$

avec P le pourcentage de substitution des granulats ordinaires de masse volumique ρ_{ord} par des granulats carbonatés de masse volumique ρ_{car} .

On définit ensuite le rapport entre la masse volumique du béton ρ_b et masse volumique réelle homogénéisée comme suit :

$$\delta^* = \frac{\rho_b}{\rho_{s,pc}^*} \quad (160)$$

Enfin, l'équation suivante permet de prédire la conductivité thermique du béton λ_b :

$$\lambda_b = \delta^* \times (0.18 \times \rho_b + 0.79) \quad (161)$$

La figure VI-15 présente les résultats de cette approche empirique, comparés aux valeurs de conductivité thermique mesurée par la méthode de la plaque chaude gardée. L'erreur commise est nettement inférieure à 10% (écartype de l'ordre de 5%), ce qui justifie l'utilisation de cette approche pour prédire, relativement efficacement, la performance thermique du béton de granulats carbonatés. Il reste néanmoins utile de préciser que cette approche n'est valable que pour les bétons de granulats carbonatés, en raison de la structure physico-chimique à l'échelle microscopique particulière de ces matériaux. Cette approche n'est, en revanche, pas adaptée pour les bétons de granulats ordinaires.

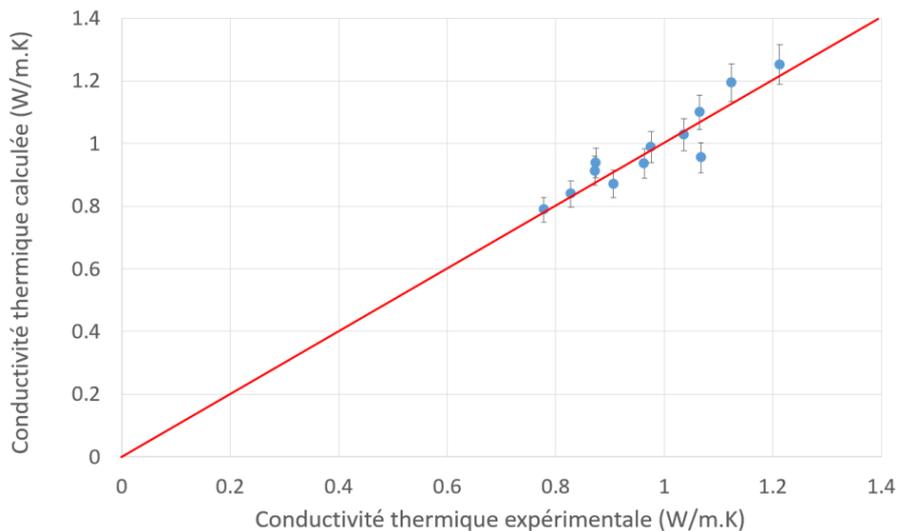


Figure VI-16 : Approche empirique de la conductivité thermique des bétons de granulats carbonatés.

En suivant une démarche similaire, une approche empirique permettrait de prédire la capacité thermique massique des bétons de granulats carbonatés. A l'aune de la prédiction de la conduction thermique et de la capacité thermique massique, il est donc possible de définir la

diffusivité thermique ainsi que l'effusivité thermique grâce aux propriétés physiques des granulats carbonatés.

Comme nous l'avons observé précédemment, la capacité thermique massique est inversement proportionnelle à la masse volumique des bétons. Nous proposons donc ici une approche basée sur l'inverse de la densité du béton d_b . Ainsi, l'expression suivante permet de déterminer, relativement précisément, la chaleur massique spécifique d'un béton de granulats carbonatés :

$$C_p = \delta^* \times \left(3500 \times \frac{1}{d_b} + 3600 \right) \quad (162)$$

Cette expression empirique se base sur le coefficient δ^* défini dans l'équation 158.

La figure VI-16 présente la comparaison entre les résultats issus de cette approche empirique et ceux issus de l'essai par la méthode fluxmétrique. L'écartype calculé entre les résultats empiriques et expérimentaux est inférieur à 10%, ce qui prouve la relative robustesse de l'approche proposée ici.

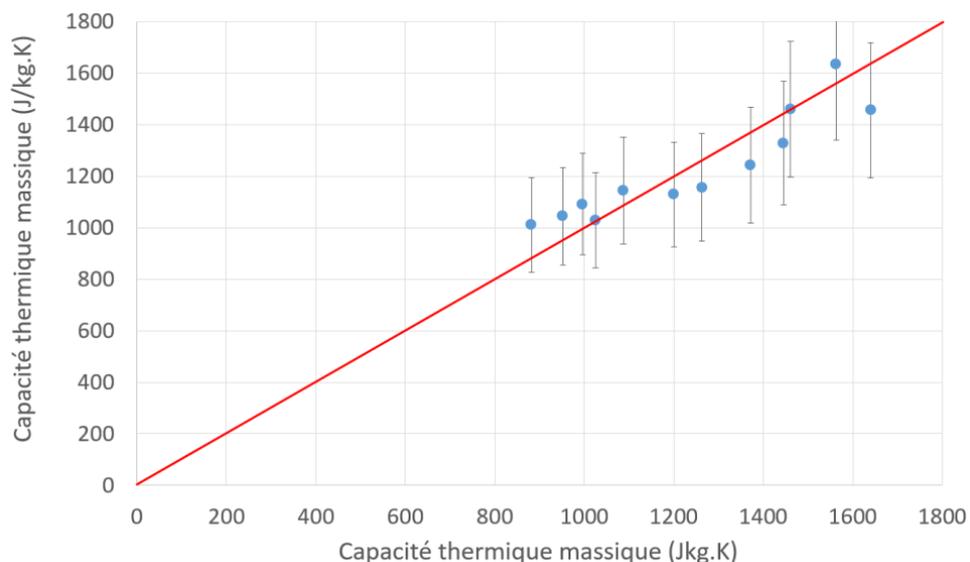


Figure VI-17 : Approche empirique de la capacité thermique massique des bétons de granulats carbonatés.

V. Conclusion

Ce chapitre est consacré à la caractérisation thermique des bétons de granulats carbonatés. A l'aide d'une recherche bibliographique permettant de comprendre les phénomènes de

transferts thermiques, des essais de caractérisation ont été mise en place (méthode de la plaque chaude gardée et méthode fluxmétrique) afin d'identifier les quatre principales caractéristiques thermiques des matériaux du Génie Civil.

Les différents essais thermiques ont bien montré que les conductivités thermiques des bétons de granulats carbonatés sont assez faibles comparées au béton ordinaire ce qui pourrait contribuer à améliorer le caractère isolant de l'enveloppe d'un bâtiment. Compte tenu de la porosité des granulats composant ces bétons, nous avons mis en évidence l'influence de la température sur les valeurs de conductivité thermique. En effet les matériaux poreux adsorbent la vapeur d'eau qui, en fonction de la température, se chauffe et conduit la chaleur. A partir des valeurs d'effusivité thermique, chaleur spécifique massique et diffusivité thermique, nos bétons ont des bonnes performances d'inertie thermique, pouvant stocker une importante quantité de chaleur avant de la restituer.

Dans un second temps, ces résultats expérimentaux ont été modélisés par un modèle d'homogénéisation auto-cohérente à trois phases. Cette modélisation a conduit à une bonne adéquation des résultats expérimentaux. Ce modèle générique de type tri-composite peut donc être utilisé afin de prédire la conductivité thermique des bétons à partir des caractéristiques de ses constituants. De plus, ce modèle auto-cohérent a permis de mettre en valeur les caractéristiques principales influençant le comportement thermique des bétons. A l'aune de ces analyses, nous avons donc proposé un modèle empirique simplifié afin de prédire la conductivité thermique et la capacité thermique massique des bétons de granulats carbonatés.

CHAPITRE VII.

APPROCHE EXPERIMENTALE DES PROPRIETES HYGRIQUES DES BETONS

I. Introduction

L'approche mécanique permet d'assurer une résistance suffisante des bétons de granulats carbonatés. La caractérisation thermique a pour objectif d'assurer une performance sensiblement supérieure à celle des bétons courant du domaine du Bâtiment. Mais la notion de confort pour les occupants ne peut se limiter uniquement aux propriétés thermiques. En effet, l'impact des transferts d'eau au sein de l'enveloppe des bâtiments est également un enjeu de premier ordre. A ces fins, l'identification des caractéristiques hygriques principales des bétons de granulats carbonatés est menée.

Dans ce chapitre, nous détaillerons donc les essais réalisés afin de déterminer la sorptivité des bétons (absorption d'eau par capillarité), absorption d'eau par immersion totale, la cinétique d'adsorption et de désorption de l'humidité et finalement, la capacité tampon hygrique

(capacité de régulation du taux d'humidité dans un local) de ces bétons. Pour chaque essai, les conditions limites et initiales sont précisées et les résultats sont exploités et comparés aux performances du béton traditionnel afin de situer les bétons de granulats carbonatés sur le marché des matériaux de construction.

II. Absorption d'eau par capillarité (sorptivité)

L'essai consiste en la mesure de la variation de masse des échantillons qui sont en contact avec l'eau. Les échantillons sont disposés sur une grille perforée, immergés sur 3 mm de profondeur. La figure VII-1 présente le dispositif expérimental conçu au sein du laboratoire. Il est constitué d'un réservoir d'eau pour contrebalancer le phénomène d'évaporation et ainsi garantir une hauteur d'eau constante au niveau du contact avec les échantillons. Pour chaque formulation de bétons, trois échantillons ont été utilisés.

Les échantillons testés sont des éprouvettes prismatiques de dimensions (4x4x16) cm³. Les échantillons sont préalablement séchés à l'étuve à 70°C jusqu'à atteindre une masse constante. Les faces latérales des éprouvettes sont isolées par du papier cellophane et du ruban adhésif afin de garantir l'unidirectionnalité du flux hydrique. L'évolution de la masse de chaque échantillon est réalisée à un intervalle de temps de 30s, 1 min, 2 min, 5 min, 10 min, 20 min et 1h. Avant chaque pesée, l'échantillon est égoutté et essuyé avec du papier absorbant afin d'enlever l'eau à la surface de l'échantillon.

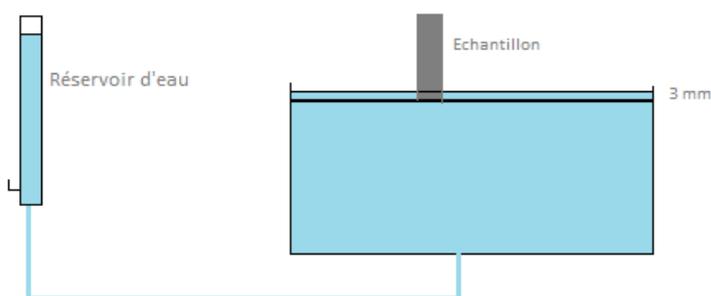


Figure VII-1 : Dispositif de détermination du coefficient d'absorption d'eau par capillarité.

Le coefficient d'absorption capillaire est calculé à partir de la formule suivante :

$$A_c = \frac{\Delta M}{S \sqrt{t}} \quad (163)$$

avec :

- ΔM la variation de la masse de l'éprouvette ;
- t le temps ;
- S la section de l'éprouvette.

Les résultats obtenus, pour les cinq formulations différentes sans mélange de granulats, sont présentés en figure VII-2, qui montre l'évolution de la masse d'eau absorbée par unité de surface en fonction de la racine carrée du temps. La cinétique d'absorption montre un comportement non linéaire, avec deux phases distinctes : dans les premières secondes, la phase d'adsorption est linéaire et relativement rapide, suivie d'une phase plus lente symbolisée par un coefficient d'adsorption plus faible. Ce comportement est identique pour toutes les formulations, y compris celle réalisées avec des mélanges entre granulats légers et granulats ordinaires. Le coefficient d'adsorption d'eau par capillarité (ou sorptivité) correspond à la tangente à l'origine de la droite identifiée lors de la première phase.

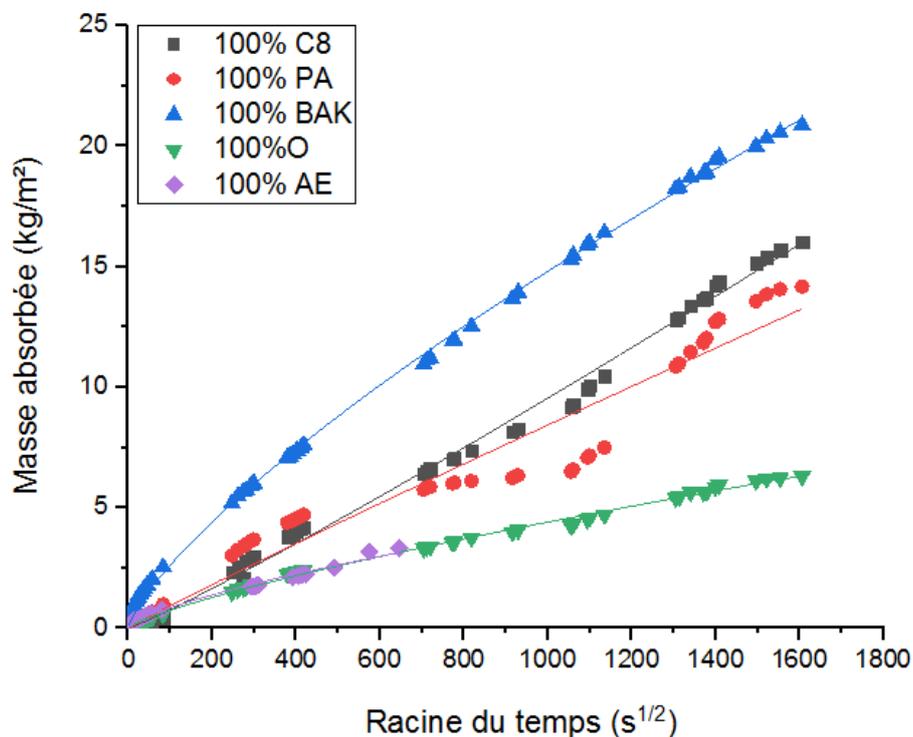


Figure VII-2 : Cinétique d'absorption d'eau par capillarité en fonction du temps.

Conformément aux résultats du chapitre 3 sur la capacité d'adsorption des grains carbonatés, les bétons de granulats carbonatés montrent également une forte différence avec les bétons de

granulats ordinaires. Les bétons de granulats carbonatés présentent une adsorption d'eau nettement plus importante que les bétons traditionnels en raison de la porosité des grains et donc, de leur capacité à absorber l'eau (coefficient W_{A24}). En revanche, il ne semble se dégager aucune relation simple entre la capacité d'un granulats à absorber l'eau et la sorptivité du béton. En effet, le granulats PA a montré le coefficient W_{A24} le plus important ($W_{A24} = 15.1\%$) et pourtant, le béton à base de ce granulats PA montre une sorptivité de l'ordre de $0.0095 \text{ kg/m}^2/\text{s}^{1/2}$, nettement inférieure à celle du béton à base de granulats BAK, par exemple (sorptivité de l'ordre de $0.061 \text{ kg/m}^2/\text{s}^{1/2}$ soit environ 6 fois supérieure). La sorptivité d'un béton n'est pas uniquement gouvernée par la capacité d'absorption d'eau de ses constituants mais il semblerait que la cinématique de séchage du mélange soit davantage prépondérante. Lors du séchage, un réseau de capillaire se forme créant ainsi les pores ouverts et fermés, accessibles et inaccessibles, et de diamètre variable. La composition chimique des grains semble donc influencer ce phénomène. Ainsi, la figure VIII-3 présente les mesures de sorptivité des différents bétons, en fonction du taux de substitution par des granulats carbonatés.

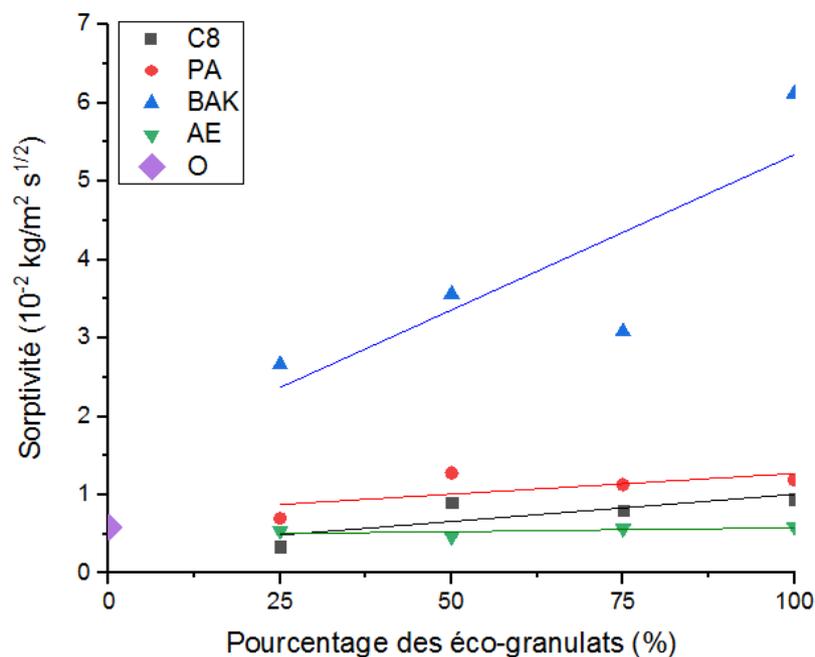


Figure VII-3 : Sorptivité des bétons étudiés en fonction du pourcentage des éco-granulats.

A nouveau, on peut se rendre compte de l'évolution de la sorptivité des bétons en fonction de la fraction massique de granulats carbonatés. Les bétons de granulats PA et C8 ne montrent pas de différences significativement marquées avec le béton de granulats ordinaires, ce qui engendre une faible augmentation de la sorption des bétons avec l'augmentation de la

proportion de grains carbonatés. En revanche, le béton de granulats BAK (réalisés à partir de biomasse) présente une augmentation très importante de la sorptivité. Il semblerait donc que ce béton conduise plus facilement le flux hydrique, malgré une densité élevée par rapport aux autres bétons d'éco-granulats, ce qui pourrait être caractéristique d'une plus grande porosité ouverte à l'échelle microscopique et/ou un réseau de capillaire plus fins, augmentant ainsi le phénomène de succion capillaire au sein du matériau (Balayssac, et al., 1993).

III. Absorption d'eau par immersion totale

L'absorption d'eau par immersion totale des échantillons de béton durci est réalisée afin de déterminer la porosité accessible à l'eau du béton. Pour obtenir la porosité, il suffit de multiplier le pourcentage d'absorption d'eau par immersion par la masse spécifique sèche de ce béton. Avant l'essai, les éprouvettes ont été conservées dans une chambre régulée en humidité relative, jusqu'à l'âge de 28 jours, puis séchées à l'étuve à 70°C jusqu'à masse constante. L'essai est réalisé par immersion totale dans l'eau d'une éprouvette prismatique de dimensions (4x4x16) cm³ jusqu'à atteindre une masse constante et en mesurant au-fur-et-à-mesure la variation de masse humide. Avant la pesée, l'éprouvette est égouttée et essuyée avec du papier absorbant afin de supprimer de l'eau superficielle.

L'absorption d'eau par immersion est exprimée en pourcentage selon la relation suivante :

$$\text{Abs} = \frac{m_{\text{humide}} - m_{\text{sèche}}}{m_{\text{sèche}}} \times 100 \quad (164)$$

avec

- m_{humide} la masse humide finale de l'éprouvette après immersion dans l'eau ;
- $m_{\text{sèche}}$ la masse sèche initiale de l'éprouvette après séchage à l'étuve.

La figure VII-4 présente les résultats obtenus pour les 17 formulations de bétons différentes. Les bétons légers montrent un coefficient d'absorption Abs nettement supérieur à celui du béton ordinaire avec une augmentation comprise entre 150% et 270%. Par ailleurs, l'absorption d'eau par immersion semble directement dépendante de la fraction massique de granulats carbonatés. En effet, une relation linéaire entre le taux de substitution et le coefficient Abs se dégage, visible en figure VII-4. Enfin, le béton de granulats PA montre un coefficient d'absorption supérieur aux autres bétons de granulats carbonatés. Le coefficient d'absorption d'eau par immersion permet d'identifier le taux de porosité ouverte et accessible.

Contrairement aux observations précédentes, issues des résultats de l'essai de sorptivité, le béton de granulats BAK ne semble pas faire montre d'une porosité fortement accessible. Il semblerait donc que cet ensemble d'analyses mette en évidence la forte différence de diamètre capillaire des pores entre les formulations de béton. En effet, la combinaison entre diamètre capillaire des pores et porosité ouverte conduit à ces deux résultats qui peuvent sembler contradictoire. La nature physico-chimique des cendres utilisées pour la production de granulats carbonatés a donc un impact majeur sur le couple (diamètre capillaire ; porosité ouverte), qui aura une répercussion forte sur les transferts d'humidité au sein des bétons.

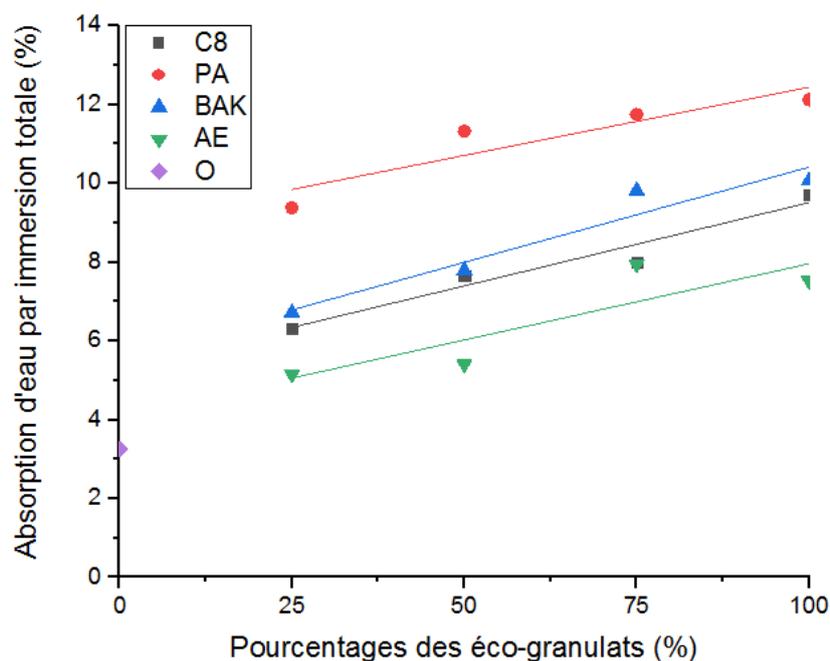


Figure VII-4 : Coefficient d'absorption d'eau par immersion en fonction du pourcentage des éco-granulats.

Par ailleurs, après 3 mois d'exposition des bétons à base de granulats de biomasse BAK à l'immersion sur 3 mm de hauteur, (essai de sorptivité), on constate l'apparition d'une fissuration importante, synonyme d'un endommagement fort et donc d'une perte de durabilité (voir figure VII-5). Ces constatations sont également valables pour l'essai en immersion totale de ces bétons à base de BAK. De telles problématiques liées à la durabilité de ces bétons ont également été soulevées lors du chapitre V, section II (page 115) avec la formation de sels minéraux sur les échantillons de béton à base de granulats C8 sous ambiance humide. Ceci attire notre attention sur l'importance d'étendre ce travail de recherche à la durabilité des bétons de granulats carbonatés, étude qui n'a malheureusement pas pu être réalisée dans le cadre de ces travaux de thèse.



Figure VII-5 : Éprouvettes de béton BAK après essai d'absorption d'eau.

IV. Comportement de sorption

Un matériau poreux et à pores ouverts, placé dans un air humide, va absorber une certaine quantité d'humidité (eau sous forme liquide et/ou de vapeur) qui dépend de l'humidité relative de l'air ambiant, notée HR. Ainsi, la masse d'un matériau sec, placé dans une atmosphère ambiante avec un taux d'humidité relative non nul, va augmenter. On arrive à un état d'équilibre après un certain temps.

Pour l'étude des transferts hygriques, on peut distinguer deux types de matériaux :

- les matériaux hygroscopiques tels que le béton ;
- les matériaux non hygroscopiques tels que le polystyrène par exemple.

En milieu poreux, le transport d'humidité provient d'un arrangement de plusieurs phénomènes à l'origine du mouvement des phases liquide et vapeur. Les propriétés du matériau, des conditions climatiques dans lequel il est placé ainsi que la nature de la phase liquide ou vapeur régissent la quantité d'eau fixée lors de ces mécanismes. Nous aborderons successivement les transferts dans la phase gazeuse puis les transferts induits par la présence de pores remplis d'eau.

1. Transfert d'humidité sous forme vapeur

Le transfert de vapeur d'eau est décrit par une équation de diffusion qui obéit à la loi de Fick. Le phénomène de diffusion est un phénomène de transport de particules sans mouvement

macroscopique de l'air. La loi de Fick permet de décrire ce phénomène mais l'écriture de cette loi diffère suivant les auteurs :

$$g_v = - D_v \nabla \rho_v \quad (165)$$

avec D_v est le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau et $\nabla \rho_v$ le gradient de pression de vapeur.

Le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau peut être expérimentalement identifié par différentes méthodes telle que la méthode de la coupelle, en phase sèche ou humide qui permet de déterminer la perméabilité du matériau à la vapeur d'eau. Cette perméabilité peut ensuite être utilisée afin de remonter jusqu'au coefficient de diffusion.

2. Transfert d'humidité sous forme liquide

Macroscopiquement, le flux massique de liquide est donné par la loi de Darcy :

$$\vec{J}_l = - \rho_l k_l \overrightarrow{\text{grad}} h_l \quad (166)$$

avec :

- k_l le coefficient de perméabilité à l'eau liquide ;
- ρ_l la masse volumique de l'eau liquide ;
- h_l la charge hydraulique de l'eau qui s'écrit sous la forme :

$$h_l = \frac{P_l}{\rho_l g} + z \quad (167)$$

où :

- P_l est la pression d'eau liquide ;
- g représente l'accélération de la pesanteur ;
- z est la cote verticale supposée positive vers le bas.

Nous pouvons réécrire la loi de Darcy sous la forme la plus utilisée dans la littérature :

$$\vec{J}_l = - \rho_l \frac{K_l}{\mu_e} \overrightarrow{\text{grad}} P_l \quad (168)$$

avec la perméabilité K_l qui s'exprime par l'équation suivante, en fonction de la viscosité dynamique du fluide μ_e et de la masse volumique du fluide ρ_l :

$$K_l = \frac{k_l \mu_e}{\rho_l g} \quad (169)$$

3. Adsorption et désorption

Les matériaux ont la capacité d'échanger de l'humidité avec l'air ambiant. En effet, une hausse de l'humidité relative de l'air à la surface du matériau engendre une augmentation de la masse apparente de celui-ci. Cette prise de masse est due au phénomène d'absorption physique permettant la fixation de molécules d'eau à la surface des pores. Réciproquement, une diminution de l'humidité de l'air environnant entraîne une perte de masse apparente due au phénomène de désorption.

La capacité d'un matériau à stocker une quantité d'humidité se traduit par la courbe de sorption du matériau. Pour un matériau hygroscopique, cette courbe est appelée isotherme d'adsorption-désorption, car le comportement de sorption est fortement influencé par la température. Cette isotherme décrit les différents états d'équilibre du matériau avec le milieu ambiant dans des conditions de température uniforme. Elle a été divisée en 3 branches selon Kunzel (Künzel, 1995), visible sur la figure VII-6 :

- Région hygroscopique : Elle commence initialement d'un état sec jusqu'à 95% d'humidité relative ;
- Région super-hygroscopique : qui correspond à la sorption d'humidité jusqu'à saturation capillaire en eau libre. Dans ce domaine la teneur en eau est appelée teneur en eau libre ;
- Région de sursaturation : Elle se localise au-dessus de la saturation en eau libre et atteint la saturation maximale. Après atteinte de la saturation, le matériau ne peut plus absorber de vapeur d'eau.

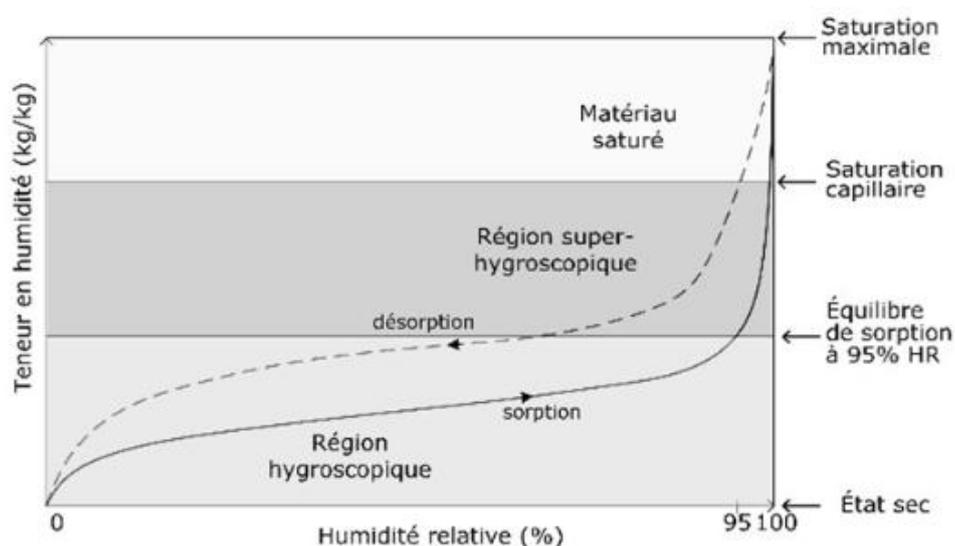


Figure VII-6 : Isotherme de sorption-désorption d'un matériau hygroscopique (Piot, 2009).

L'adsorption physique résulte d'une réaction en surface des pores du matériau. Elle est composée de trois phases, schématisée en figure VII-7 :

- Adsorption monocouche (ou monomoléculaire) : les molécules d'eau recouvrent en une seule couche la surface des pores où elles sont maintenues sous l'effet des forces de liaison de type de Van der Waals ;
- Adsorption multicouche (ou polymoléculaire) : l'humidité devient plus importante et d'autres molécules d'eau se fixent sur la première couche. La chaleur latente de condensation de l'eau entre alors en jeu ;
- Condensation capillaire : pour des niveaux d'humidité relative plus importants, les couches polymoléculaires se rejoignent et forment un pont liquide séparé de la phase gazeuse par un ménisque. Par l'intermédiaire de forces capillaires, l'eau est retenue à la surface des pores, ce qui entraîne le remplissage des pores les plus fins puis, progressivement, les plus importants.

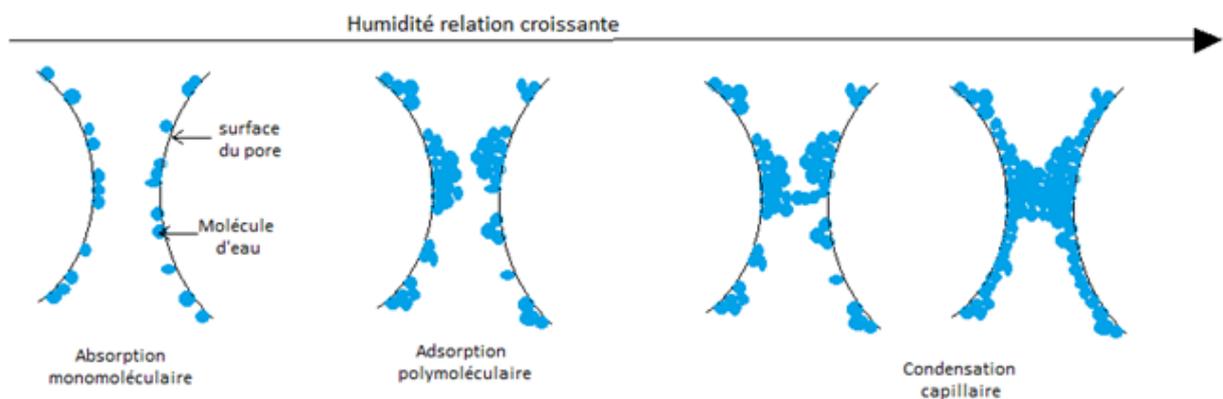


Figure VII-7 : Fixation de l'humidité dans un pore.

L'isotherme de sorption sert à caractériser le comportement des matériaux dont le transport d'eau joue un rôle important. Comme pour les caractéristiques capillaires, l'isotherme de sorption est sujette au phénomène d'hystérésis : le comportement de désorption ne se superpose pas avec celui d'adsorption, en raison des différences de forces et de liaisons physico-chimiques lors de ces deux phases. En effet, les chaleurs isostériques ne sont pas identiques en adsorption et en désorption.

Selon Brunauer et al. (**Brunauer, et al., 1938**), il existe cinq types d'isothermes d'adsorption, qui ont par la suite été complétées par un sixième type défini par l'I.U.P.A.C (**International Union of Pure and Applied Chemistry, 1985**). La figure VII-8 présente les six cinématiques d'adsorption possibles d'un matériau hygroscopique.

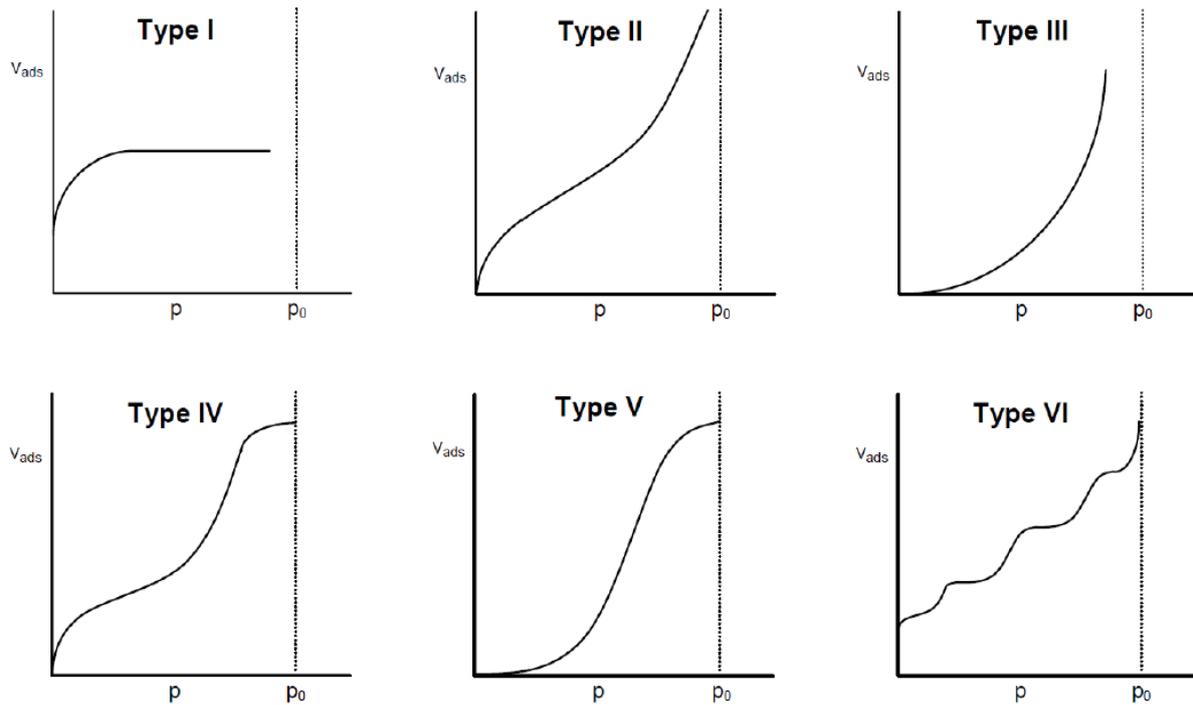


Figure VII-8 : Classification des isothermes de sorption selon IUPAC.

- Type I : ce type d'isotherme est caractérisé par le remplissage de micropores à faibles pressions relatives. De fortes interactions surtout chimiques peuvent avoir lieu. Nous sommes dans le cas d'une adsorption mono-moléculaire. Ce type représente les milieux microporeux ;
- Type II : il correspond à des solides non poreux ou macroporeux. L'augmentation de la quantité d'humidité adsorbée traduit une faible interaction adsorbat/adsorbant. Nous sommes en présence de l'adsorption mono et multicouche ;
- Type III : comme pour le type II, il représente les solides non poreux ou macroporeux. L'adsorption se produit facilement sur la première couche que sur la surface ;
- Type IV : les mésopores sont remplis et nous pouvons remarquer la condensation capillaire au niveau des pores. Nous sommes en présence d'hystérésis de différents types :
 - ✓ H1 : les courbes d'adsorption et de désorption sont presque parallèles. C'est le cas d'adsorbants ayant des pores de distribution cylindriques ;
 - ✓ H2 : la courbe de désorption a une pente plus importante que celle de la courbe d'adsorption. Les courbes ne sont pas parallèles.

- Type V : Ce type est similaire au type IV mais les interactions entre adsorbat/adsorbant sont plus faibles ;
- Type VI : Ce type est très rarissime. Il correspond à un milieu poreux où les couches adsorbées se forment les unes après les autres. C'est le cas des surfaces très homogènes.

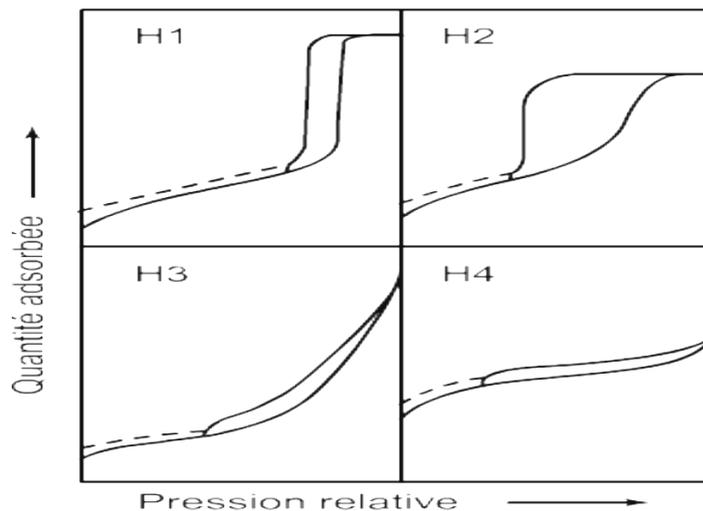


Figure VII-9 : Classification des hystérésis d'adsorption.

Le type H3 se caractérise par l'absence de palier à la fin d'adsorption. Les hystérésis dépendent donc des conditions expérimentales surtout la saturation ou bien de la porosité du matériau. Le type H4 de même ne présente pas de palier. Il y a coexistence d'une forte microporosité.

Lors de l'essai de sorption, la mesure se fait de façon à suivre la variation de la masse de vapeur d'eau adsorbée par l'échantillon se trouvant dans une atmosphère où l'humidité relative est constante. L'échantillon est placé dans un dessiccateur contenant une solution saline qui fixe le taux d'humidité relative. Les dessiccateurs sont placés dans une atmosphère maintenue à une température de 10°C lors de nos essais. L'essai peut s'effectuer de deux manières, soit par palier successifs d'humidité relative croissante puis décroissante ou inversement comme indiqué dans la norme NF EN 12571 (**AFNOR NF EN12571, 2013**), soit palier par palier en commençant par l'état sec pour l'adsorption ou de l'état initial saturé pour la désorption. Les courbes d'isotherme d'adsorption/désorption sont obtenues grâce à la mesure de la teneur en eau pour chaque niveau d'humidité relative, en commençant d'un état initial sec pour l'adsorption et d'un état initial saturé pour la désorption. Dans la méthode des

solutions salines, on place une solution saturée d'un sel dans un bocal hermétique (dessiccateur). Cette méthode a été standardisée par la procédure COST 90 (Jowitt, et al., 1989). L'humidité relative de l'atmosphère au-dessus de la solution va s'équilibrer à une valeur qui est fonction de la solution saline utilisée. L'échantillon est alors placé dans le dessiccateur et des pesées seront faites à intervalles de temps réguliers, jusqu'à ce que la variation de masse soit considérée comme négligeable. On estimera alors avoir atteint la masse d'échantillon en équilibre avec l'atmosphère environnante.

Dans le cadre ce travail de thèse, nous obtenons les courbes d'adsorption et de désorption par la mesure de la teneur en eau palier par palier, pour différents niveaux d'humidité relative. La température de la pièce est maintenue constante, à 10°C, à l'aide d'un climatiseur. La régulation de différents niveaux d'humidité relative est obtenue par des solutions salines saturées en faisant sorte d'avoir 5 points d'humidités relatives allant de 0% à 97% (figure VII-10). Les solutions salines sont relativement sensibles à la température et des mesures ont été effectuées afin de connaître précisément les taux d'humidité relative atteints par les sels.



Figure VII-10 : Essai d'adsorption/désorption.

Les solutions salines utilisées lors de cet essai pour fixer les niveaux d'humidité relative sont présentées dans le tableau VII-1.

Tableau VII-1 : Solutions salines utilisées pour fixer les humidités relatives.

Solution saline	Nomination	HR% à 10°C
Magnésium Chlorure	$MgCl_2, 6H_2O$	33
Magnésium Nitrate	MgN_2O_6, H_2O	55
Chlorure de Sodium	NaCl	75

Ammonium Sulfate	$(\text{NH}_4)_2 \text{SO}_4$	81
Potassium Sulfate	K_2SO_4	97

Les mesures ont commencées à l'état sec pour l'adsorption, après avoir été séchés dans une étuve à 70°C jusqu'à stabilisation de la masse. Pour le processus de désorption sous humidité relative et après le processus d'adsorption, les échantillons préalablement saturés en eau sont placés dans une enceinte où l'humidité relative et la température restent constantes (HR=97 % et T=10°C). Ils sont régulièrement pesés et la variation de la saturation est obtenue grâce au suivi de l'évolution de la masse. Dès que la stabilisation de masse des différents échantillons est mesurée, nous effectuons le passage à une humidité relative inférieure. La teneur en eau est déterminée par pesée à l'aide d'une balance de précision de 0.1 mg. La stabilité est atteinte lorsque la variation de masse entre deux pesées consécutives à un intervalle de 48 heures est inférieure à 0.01%. Lorsque l'humidité relative augmente, il existe un gain de poids et la courbe obtenue est appelée isotherme d'adsorption, tandis que lorsque l'humidité relative diminue, nous rencontrons une perte de poids et la courbe obtenue est appelée isotherme de désorption.

Les mesures de masse sont effectuées à des intervalles commençant par un jour, 4 jours et 7 jours après le changement de palier d'humidité relative, puis la fréquence est réduite à une mesure par semaine.

Le phénomène de sorption présente une cinétique très lente surtout pour des humidités relatives importantes, les bétons étudiés ont mis de 2 à 5 mois pour se stabiliser à une humidité relative de 97%. Les échantillons de bétons composés de 100% et 75 % des granulats carbonatés ont mis plus de 70 jours pour atteindre l'équilibre dans l'ambiance à 97%, en revanche les bétons à composition 50% et 25% des granulats carbonatés se distinguent par une cinétique relativement plus rapide (53 jours). Ceci diffère d'un béton à l'autre en raison de la distribution des pores et de l'inter-connectivité entre eux, ce qui permet une absorption plus au moins rapide. Pour une humidité relative inférieure ou égale à 97%, les cinétiques d'adsorption présentent, d'une manière générale, une allure classique : une première phase pendant laquelle la teneur en eau augmente rapidement et une deuxième phase durant laquelle elle se stabilise plus lentement. L'ensemble des courbes d'adsorption des différents matériaux données dans figure VII-11 qui illustre l'allure des cinétiques obtenues. Ces courbes représentent l'évolution de la teneur en eau des bétons à différents humidité relative 33 %, 55%, 75%, 81% et 97%.

Les échantillons exposés à 75% d'humidité relative atteignent l'équilibre au bout de 13 jours. Ceci s'explique par le fait que les échantillons ont été précédemment conservés à 60% d'humidité relative dans la chambre de conservation. Au contraire des autres échantillons qui ont été préalablement séchés dans l'étuve à 70°C jusqu'à stabilisation de la masse.

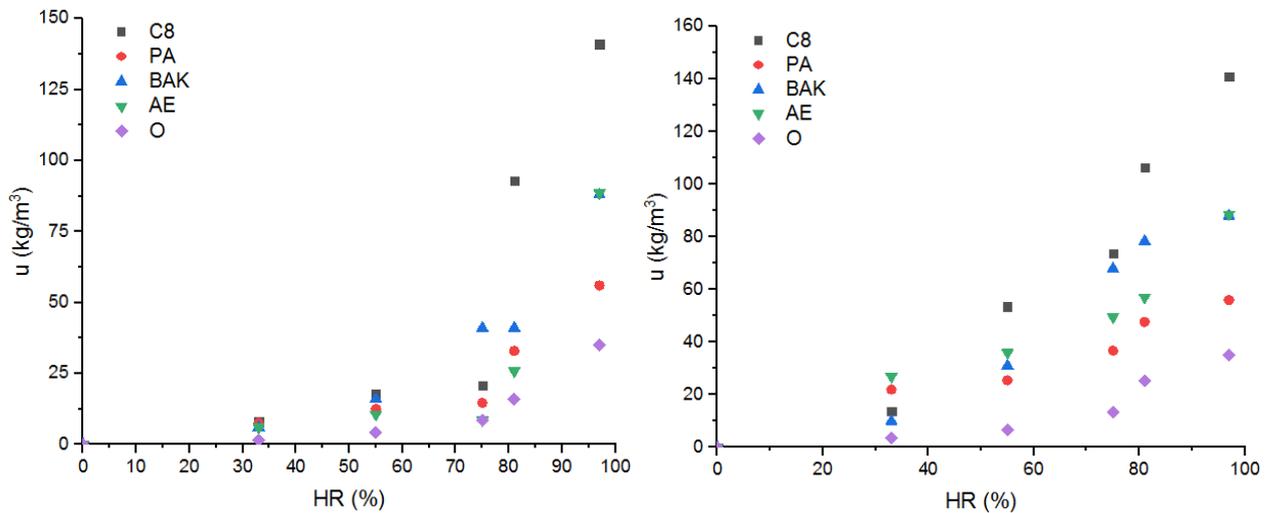


Figure VII-11 : Courbes d'adsorption (à gauche) et de désorption (à droite) des différents bétons étudiés.

Pour décrire le comportement hygrothermique des matériaux, il existe différents modèles de lissages mathématiques des isothermes de sorption. Ces modèles sont regroupés dans le tableau VII-2. Ils se basent sur différents paramètres, qui doivent être déterminés expérimentalement. Dans le cas des modèles GAB et BET, les paramètres W, C et K ont une définition physique. En effet, W correspond à la teneur en eau moléculaire et C et K représentent des coefficients en fonction de la chaleur molaire d'absorption et de la chaleur molaire latente de vaporisation respectivement.

Tableau VII-2 : Modèles de lissages mathématiques des isothermes de sorption.

Modèles	Équations	Paramètres
GAB (Guggenheim, Andersen, de Boer) (Van den Berg, 1985)	$U = \frac{W \times C \times K \times HR}{(1 - K \times HR)(1 - K \times HR + C \times K \times HR)}$	W, C, K
BET (Brunauer, Emmett, Teller) (Brunauer, et al., 1938)	$U = \frac{W \times C \times HR}{(1 - HR)(1 - HR + C \times HR)}$	W, C

Halsey (Halsey, 1948)	$U = \left(\frac{A}{\ln \left(\frac{1}{HR} \right)} \right)^{1/B}$	A, B
Henderson (Henderson, 1952)	$U = \left(\frac{-\ln(1 - HR)}{A} \right)^{1/B}$	A, B
Peleg (Peleg, 1930)	$U = A (HR)^C + B (HR)^D$	A, B, C, D
Caurie (Caurie, 1970)	$U = \exp(a + b HR)$	a, b
Smith (Smith, 1947)	$U = C_1 - C_2 \ln(1 - HR)$	C ₁ , C ₂

Le modèle GAB est celui le plus utilisé pour sa large application, sur l'intégralité de la plage d'humidité relative de 0 à 100%. Il est valide pour les matériaux poreux à différentes humidités relatives, comparé au modèle de BET qui n'est valable que pour des humidités relatives inférieures à 40%.

Nous avons donc choisi d'utiliser le modèle GAB afin de modéliser les isothermes d'adsorption et de désorption sur le domaine d'humidité relative étudié. Toutes les branches d'adsorption ont été lissées en deux temps à partir des valeurs moyennes obtenues avec les différents échantillons (**Lelièvre, et al., 2015**) grâce à l'équation suivante :

$$U = \frac{W C K \varphi}{(1 - K \varphi)(1 - K \varphi + C K \varphi)} \quad (170)$$

avec U la teneur en eau et φ : l'humidité relative.

La figure VII-12 présente les résultats du modèle GAB sur les mesures du comportement d'adsorption et de désorption des bétons étudiés. Les courbes obtenues sont caractéristiques du type II selon la classification de l'IUPAC, avec une hétérogénéité énergétique. La cinétique de sorption met en lumière la présence de méso-pores de différents diamètres car la sorption est plutôt régulière dans les domaines monocouche et multicouche. La condensation capillaire apparaît pour une humidité relative proche de 80%. Le comportement est plutôt représentatif des matériaux de construction, notamment du béton, qui est un matériau relativement peu poreux. On peut néanmoins distinguer une faculté plus importante des bétons de granulats carbonatés à stocker l'eau par rapport au béton traditionnel. Le béton de granulats C8 montre la cinétique de sorption la plus marquée, avec une teneur en eau à 97% d'humidité relative proche de 140 kg/m³, quand le béton de granulats ordinaire présente une

teneur en eau de 35 kg/m^3 pour une humidité relative de 97%. Les autres bétons (de granulats AE, BAK et PA) ont une teneur en eau inférieure à 100 kg/m^3 . Cette différence est liée à la microstructure et plus précisément à la répartition des diamètres des pores. Ces exploitations font également apparaître une forte différence entre l'adsorption et la désorption, synonyme du caractère fortement marqué des hystérésis de sorption.

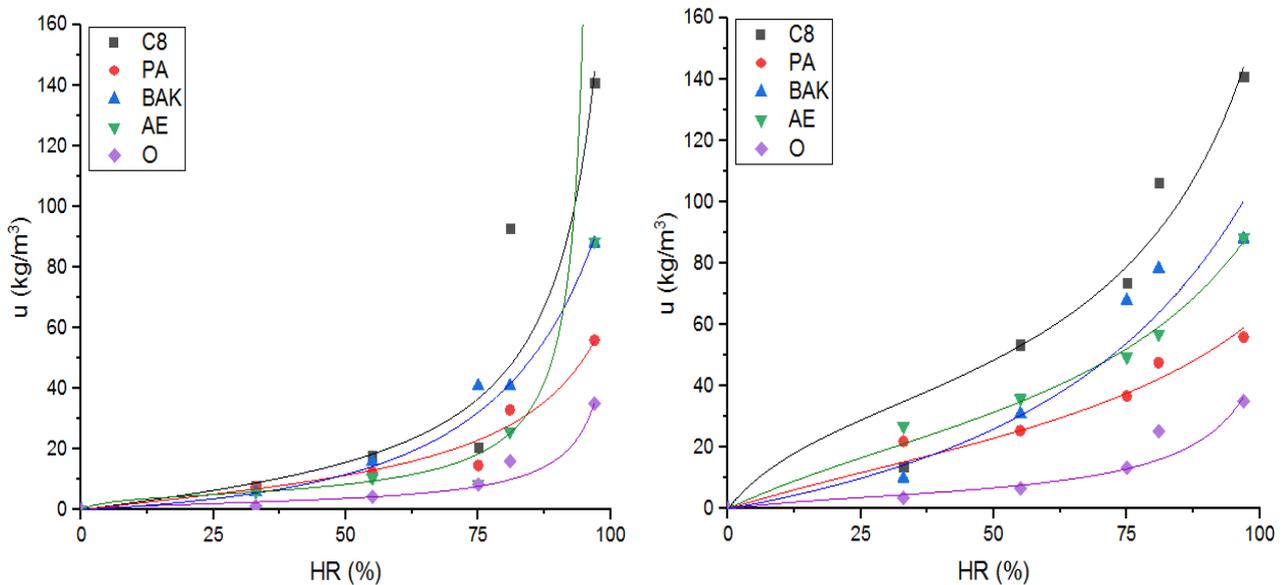


Figure VII-12 : Application du modèle GAB pour le lissage des mesures d'adsorption (à gauche) et de désorption (à droite) des bétons étudiés.

Le tableau VII-3, ci-dessous, présente les constantes du modèle GAB qui permettent le lissage mathématique en appliquant le modèle GAB aux résultats expérimentaux des isothermes d'adsorption et de désorption.

Tableau VII-3 : Les constantes du modèle de GAB.

Béton	Adsorption			Désorption		
	W	C	K	W	C	K
C8	13	2	0.00941	35	8	0.0079
PA	10	2.5	0.0086	25	3.3	0.0064
BAK	58	0.23	0.0077	78	0.65	0.006
AE	4.3	21.5	0.01	30	4	0.0071
O	2.25	8	0.0097	4.5	6	0.0091

Les figures VII-13 à VII-17 présentent le comportement de sorption (adsorption et désorption) de chaque béton étudié. La superposition des isothermes d'adsorption et de désorption met clairement en évidence le phénomène d'hystérésis : pour une même humidité relative, la teneur en eau en désorption est supérieure à celle en adsorption. Les courbes d'hystérésis dans notre cas ont des formes similaires pour tous les matériaux et peuvent être classées de type H2, selon la classification de l'IUPAC.

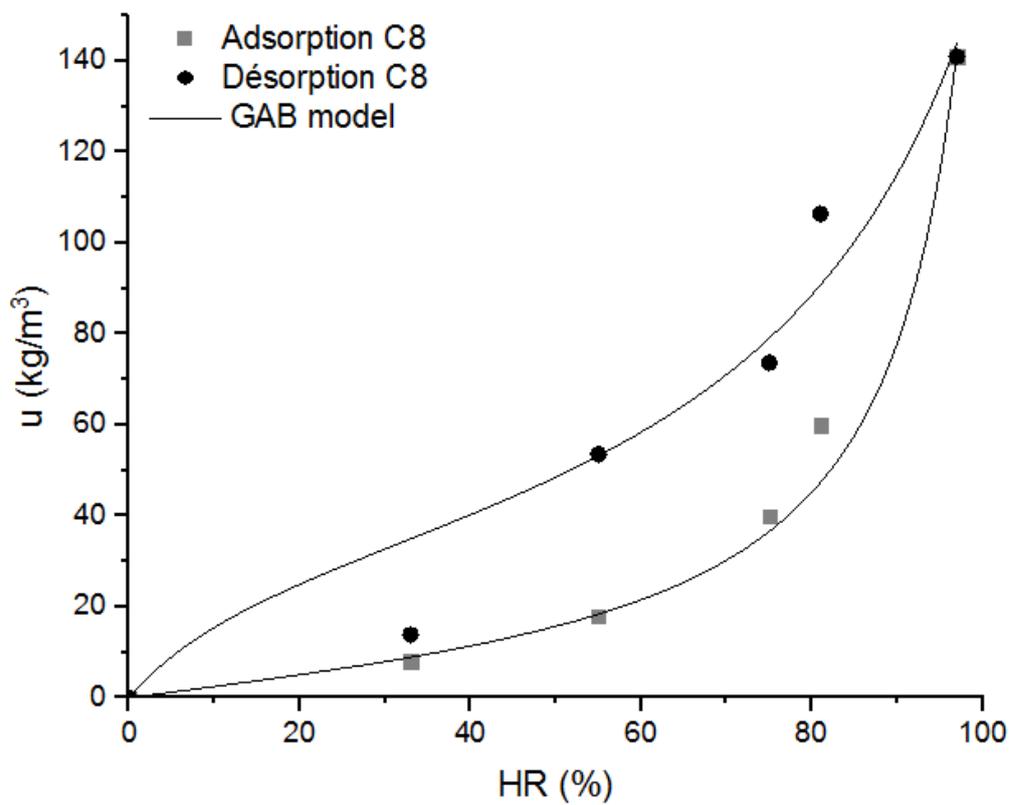


Figure VII-13 : Isotherme de sorption des bétons C8.

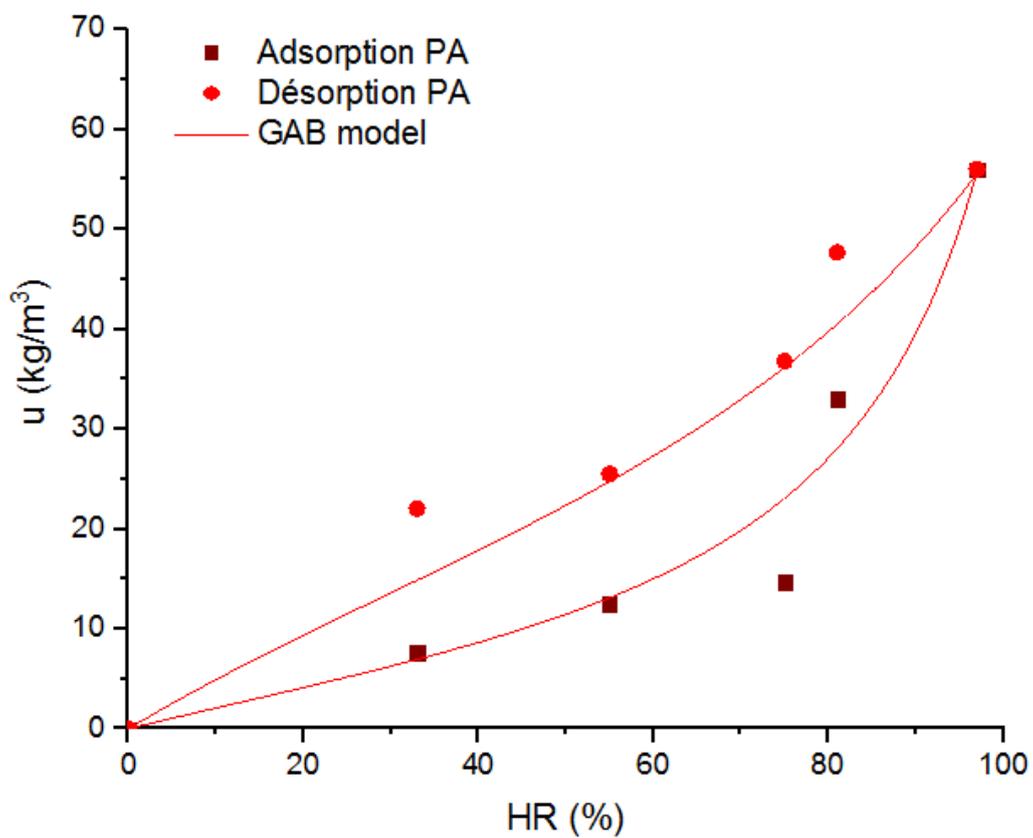


Figure VII-14 : Isotherme de sorption des bétons PA.

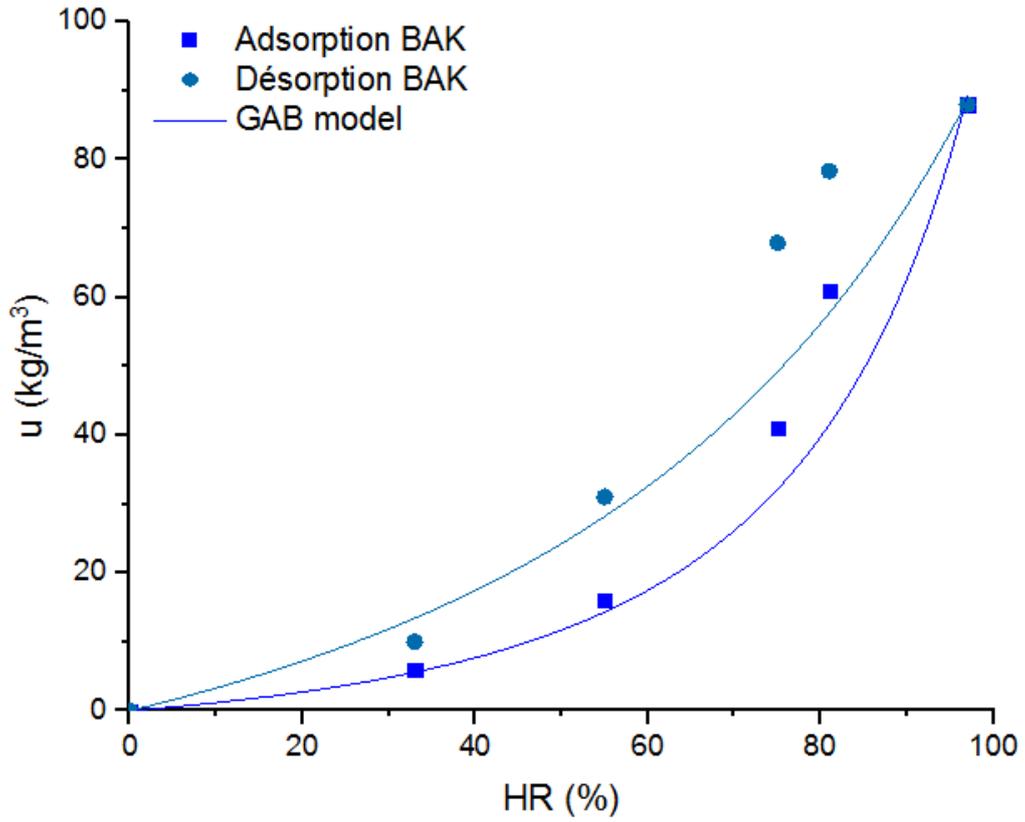


Figure VII-15 : Isotherme de sorption des bétons BAK.

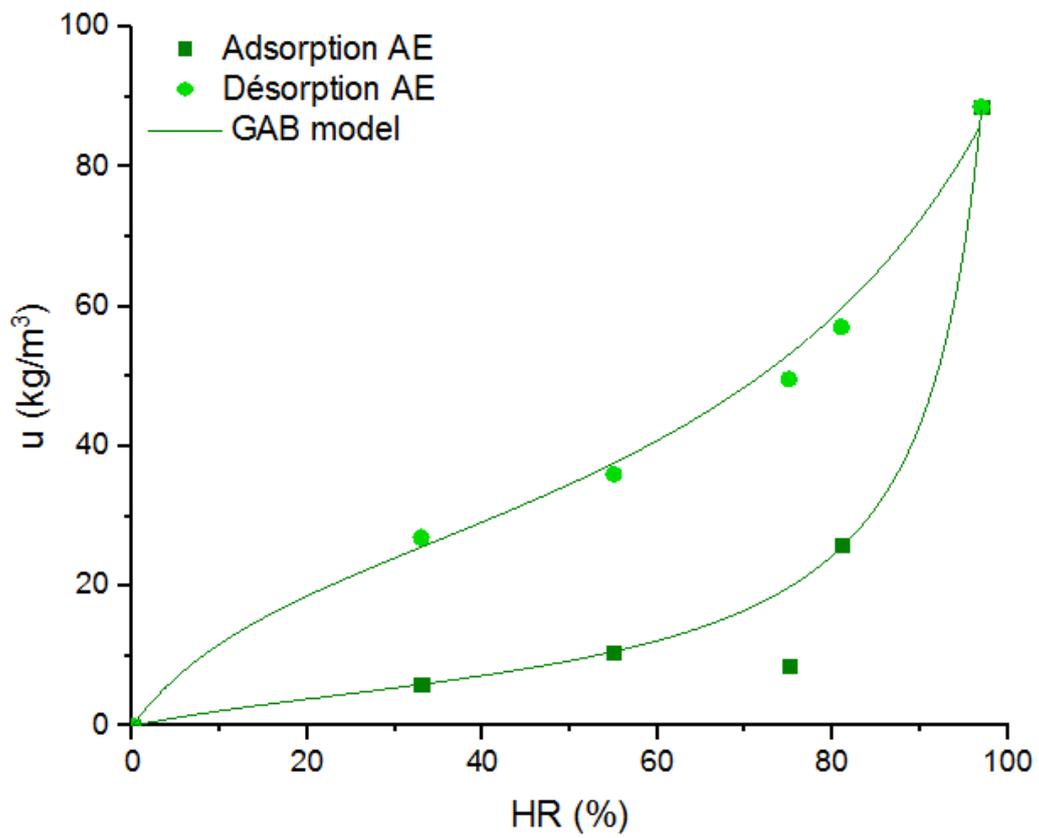


Figure VII-16 : Isotherme de sorption des bétons AE.

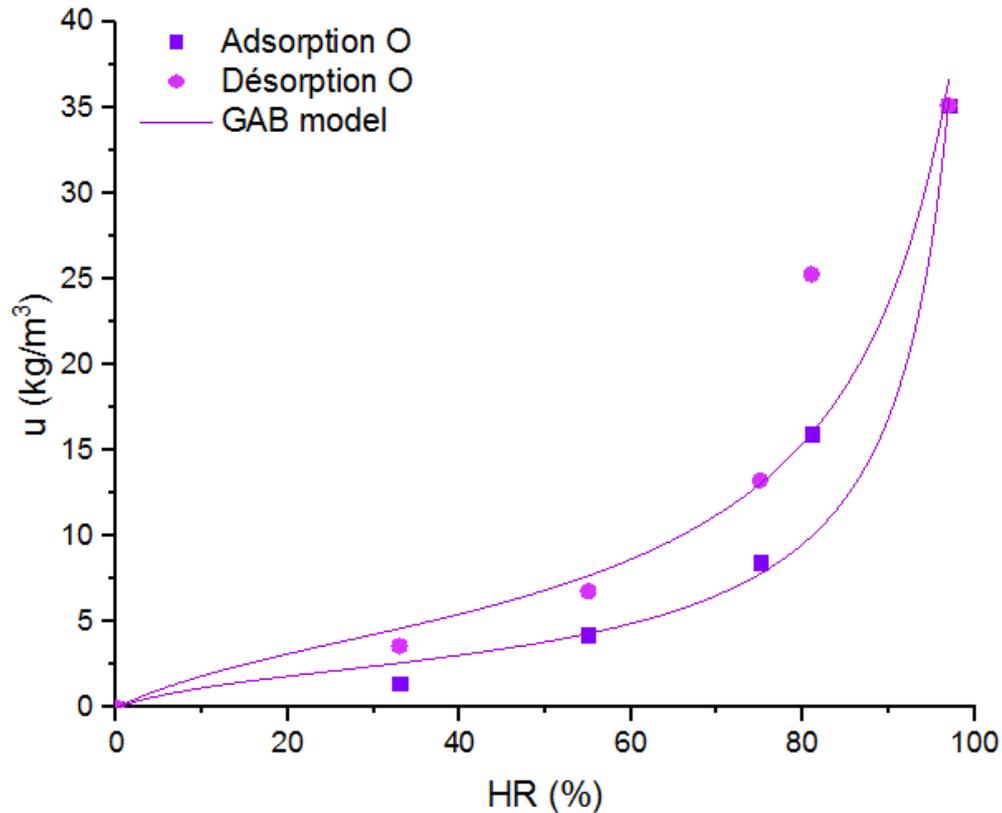


Figure VII-17 : Isotherme de sorption des bétons ordinaires O.

Ces exploitations confirment les résultats précédents quant à la faculté des bétons de granulats carbonatés à conduire et stocker l'humidité en leur sein, par rapport au béton de granulats ordinaires. Les transferts d'eau, sous forme liquide ou vapeur, se trouvent plus importants avec ces matériaux en raison de leur structure microporale (quantité et diamètre des capillaires), mis en exergue par les essais de sorptivité et d'adsorption d'eau par immersion, et ils constituent une réserve d'humidité non négligeable, identifiée grâce aux essais de sorption. Ceci nous permettrait d'envisager une meilleure faculté de ces matériaux à réguler le taux d'humidité relative au sein d'un local afin d'améliorer le confort hygrique des occupants. A ce titre, la capacité tampon hygrique est une approche envisageable afin d'identifier les performances des matériaux de construction et leur impact sur la sensation de confort hygrique des occupants.

V. Capacité tampon hydrique

Afin d'assurer le confort hygrothermique dans le bâtiment, il faut s'intéresser à l'humidité relative qui présente un élément important et a un impact non négligeable sur le confort. Une hausse de l'humidité relative dans le bâtiment peut déclencher des pathologies comme les

moisissures par exemple. Les matériaux contiennent une humidité qu'ils vont certainement dégager dans le cas de séchage du béton par exemple. En effet, il est intéressant d'étudier le comportement du béton face à une variation d'humidité relative. Afin de limiter les phénomènes de condensation et d'apparition des moisissures et de salpêtres, il faut jouer sur l'effet tampon hygrique des matériaux.

Pour ce fait, nous avons effectué un essai hygrique sur les bétons étudiés qui consiste à mesurer la capacité tampon hygrique. Le protocole d'essai a été proposé par le Nordtest Project (**RODE, 2005**) afin d'estimer l'inertie hygrique d'un matériau. La valeur tampon hygrique déterminée caractérise la capacité d'un matériau à réguler l'humidité relative de l'air dans le bâtiment. Elle est donc définie par la formule suivante :

$$MBV = \frac{\Delta m}{A (HR_{max} - HR_{min})} \quad (171)$$

avec :

- Δm la variation de masse au cours d'un cycle de sollicitation hygrique ;
- HR_{max} , HR_{min} les niveaux d'humidité relative haute et basse au cours du cycle ;
 - > $HR_{max} = 75\%$ étant l'humidité relative la plus élevée
 - > $HR_{min} = 33\%$ étant l'humidité relative la plus basse
- A la surface d'échange. Cette surface représente la surface en contact avec l'air ambiant, elle varie selon l'échantillon. Elle est déterminée en recouvrant les différentes surfaces de l'échantillon, à l'exception de la surface supérieure, par un papier aluminium imperméable à l'humidité.

Le résultat de l'essai permet donc de déterminer la valeur MBV d'un matériau. Cette valeur est ensuite à comparer avec la classification des valeurs tampons hygriques définies lors du programme Nordtest. La classification, est présentée en figure VII-18, fait apparaître cinq classes différentes pour les matériaux présentant une excellente capacité à réguler l'humidité, jusqu'à une capacité négligeable de régulation de l'humidité dans un local.

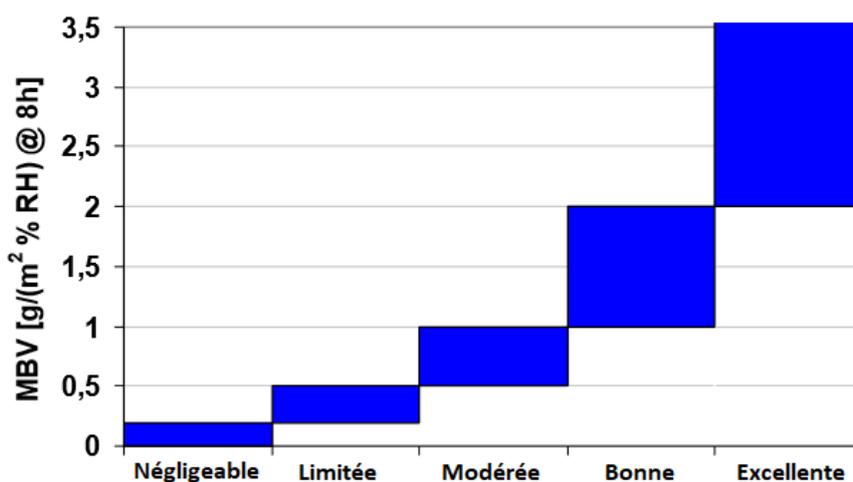


Figure VII-18 : Classification des valeurs tampon hydrique MBV selon le Nordtest Project (RODE, 2005).

Pour le test MBV, nous avons utilisé une chambre climatique (Biaclimatic type CL2-25) contrôlable sur des plages de température de 8 à 65 °C et d'humidité relative de 10 à 98% avec une précision de $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ et $\pm 2\%$ d'humidité relative. Tout le long de l'essai, la température est maintenue constante à 23°C. La régulation de l'humidité relative (succession de cycles à 75% et 33% d'humidité relative) dans l'enceinte climatique a été programmée selon des créneaux de 8h et 16 h, respectivement. La température et l'humidité relative sont enregistrées constamment dans la chambre climatique (**Rahim, 2015**).

L'ambiance est enregistrée en continu avec des sondes Sensirion SHT 75. La vitesse d'air est mesurée au voisinage des échantillons : les composantes verticales sont de 0.07 à 0.14 m/s alors que les composantes horizontales sont de 0.1 à 0.4 m/s. Les échantillons sont préalablement stabilisés à 23°C et 50%. Le protocole stipule que le suivi massique des échantillons s'appuie sur 5 pesées durant les phases d'absorption et 8 pesées durant les phases de désorption. Les cycles sont répétés jusqu'à ce que l'écart entre les variations de masse mesurées pour les cycles soit inférieur à 5% sur les trois derniers cycles (**COLLET, et al., 2013**). Les échantillons sont préalablement séchés dans une étuve à 60°C jusqu'à stabilisation de la masse, puis placés dans l'enceinte climatique. Le suivi de la masse des échantillons est assuré par une balance de capacité de 4 kg, dont la précision est de 0.01g. La pesée se fait à l'extérieur de l'enceinte climatique. Afin de minimiser les perturbations dues à l'ouverture de la porte, le nombre de mesures est réduit à trois pesées au cours de la période d'absorption et deux pendant la désorption. D'autre part, lors des changements de consignes, le passage de 33% à 75% s'effectue en environ 10 minutes, quand une demi-heure est nécessaire pour passer de 75 à 33%.

Selon la méthode du Nordtest Project, le changement de consigne devrait idéalement s'opérer en moins de trente minutes, néanmoins il a été démontré que la durée de montée ou descente en humidité relative a un effet limité sur la valeur de capacité tampon hydrique (inférieur à 5%) même lorsque cette durée atteignait une heure et demi (**RODE, 2005**).

Il est important de présenter la notion de profondeur de pénétration (PP) qui nous informe sur la valeur approximative théorique de l'épaisseur des échantillons qui est nécessaire pour la détermination de la valeur tampon hydrique MBV. Elle se définit comme étant la distance entre la surface exposée et le point où l'amplitude de variation de la concentration de la vapeur ne dépasse pas 1% de celle à sa surface. Elle est donnée par la formule suivante :

$$PP = 4.61 \sqrt{\frac{D_w t_p}{\pi}} \quad (172)$$

avec :

- D_w la diffusivité hydrique de matériau ;
- t_p la période.

La diffusivité hygrique D_w s'exprime par :

$$D_w = \frac{\delta_p \cdot P_{vs}}{\rho_0 \cdot \frac{\partial u}{\partial \varphi}} \quad (173)$$

où :

- δ_p la perméabilité à la vapeur d'eau ;
- P_{vs} est la pression de vapeur saturante ;
- ρ_0 la masse volumique sèche ;
- $\frac{\partial u}{\partial \varphi}$ est la tangente à l'isotherme de sorption.

Cette formule est obtenue à partir du modèle d'une paroi homogène semi-infinie, soumise à une variation sinusoïdale d'humidité en surface (**ARFVIDSSON, 1999**).

Le projet Nordtest définit la valeur tampon hydrique théorique et développe un outil de simulation qui permet de déterminer une valeur $MBV_{idéal}$, qui néglige la résistance de la lame d'air à la surface de l'échantillon, en utilisant les propriétés hydriques du matériau. Elle est donnée par la relation suivante :

$$MBV_{idéal} \approx 0.00568 P_{vs} b_m \sqrt{t_p} \quad (174)$$

où :

- P_{vs} est la pression de vapeur saturante ;
- b_m est l'effusivité hygrique ;
- t_p est la période.

La valeur $MBV_{idéal}$ est la limite de la valeur MBV lorsque le coefficient de convection massique est infini (Tran le, 2010). Peuhkuri et al. (Peuhkuri, et al., 2008) a montré que la valeur $MBV_{idéal}$ peut devenir une propriété intrinsèque d'un matériau et être utilisée pour classer les matériaux selon la classification précédente.

Abadie et al. (Abadie, et al., 2009) propose une approche analytique pour déterminer la valeur MBV. Les auteurs précisent que le rapport entre la valeur MBV et la valeur $MBV_{idéal}$ est dépendante du nombre de Biot massique $B_{i,m}$:

$$\frac{MBV}{MBV_{idéal}} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{1}{B_{i,m}}\right)^2 + \left(\frac{1}{B_{i,m}}\right)^2}} \quad (175)$$

Tran Le et al. stipule que lorsque le nombre de Biot massique tend vers 100, la valeur MBV est identique à celle de $MBV_{idéal}$. Pour un très faible nombre de Biot, la valeur MBV tend vers 0. En réalité, le nombre de Biot est généralement compris entre 0.01 et 100. Dans le cadre de ce travail de thèse, nous considérerons un nombre de Biot relativement éloigné de 0 car les essais MBV montrent une prise de masse des échantillons sous sollicitations hygriques. L'évaluation du nombre de Biot, qui traduit de la résistance du matériau à la diffusion de la vapeur d'eau devrait faire partie des perspectives à ce travail de recherche. Par conséquent, dans une première approche, nous considérerons un nombre de Biot compris entre 10 et 100, ce qui génère un rapport entre la valeur MBV et la valeur $MBV_{idéal}$ de l'ordre de 90%.

Par suite, l'effusivité hygrique b_m s'exprime par :

$$b_m = \sqrt{\frac{\rho_0 \cdot \delta_p \frac{\partial u}{\partial \varphi}}{P_{vs}}} \quad (176)$$

avec :

- δ_p la perméabilité à la vapeur d'eau ;

- ρ_0 la masse volumique sèche ;
- u la teneur en eau massique ;
- φ l'humidité relative.

Ainsi, à l'aune de la mesure de la valeur MBV, nous pouvons en déduire une valeur approchée de $MBV_{idéal}$, grâce à l'approximation du nombre de Biot massique qui nous conduit à l'estimation de l'effusivité hygrique à l'aide de la mesure des isothermes de sorption à 10°C (nous considérerons ici que la tangente de l'isotherme à 10°C est similaire à celle de l'isotherme à 23°C, température utilisée lors du protocole Nordtest pour trouver la valeur MBV). Puis, en inversant l'équation 173, on peut déterminer la perméabilité à la vapeur d'eau du matériau et donc, identifier la diffusivité hygrique D_w .

Les valeurs de la capacité tampon hygrique ont été mesurées pour les différents échantillons selon le Nordtest Project. En utilisant des valeurs de profondeurs de pénétration trouvées dans la littérature ((**Rahim, 2015**), (**Collet, 2004**)). Les épaisseurs des échantillons ont été fixées à 7 cm afin de garantir une profondeur de pénétration suffisante. La surface d'échange avec l'ambiance de l'enceinte climatique est de 100 cm². Les échantillons utilisés pour l'essai sont présentés sur la figure VII-19, dans l'enceinte climatique utilisée, régulée en température et en humidité relative.



Figure VII-19 : Enceinte climatique pour essai MBV.

La figure VII-20 montre la variation de l'humidité relative dans l'enceinte et la cinétique de prise et de perte de masse d'un échantillon lors de l'essai MBV. Cette cinétique est valable pour l'intégralité des formulations testées, quels que soit les granulats utilisés pour la confection des bétons. Une première phase transitoire est visible avant d'atteindre un régime stationnaire où les cycles de variation de masse des échantillons sont répétables (au bout de 200 h sur la figure VII-20).

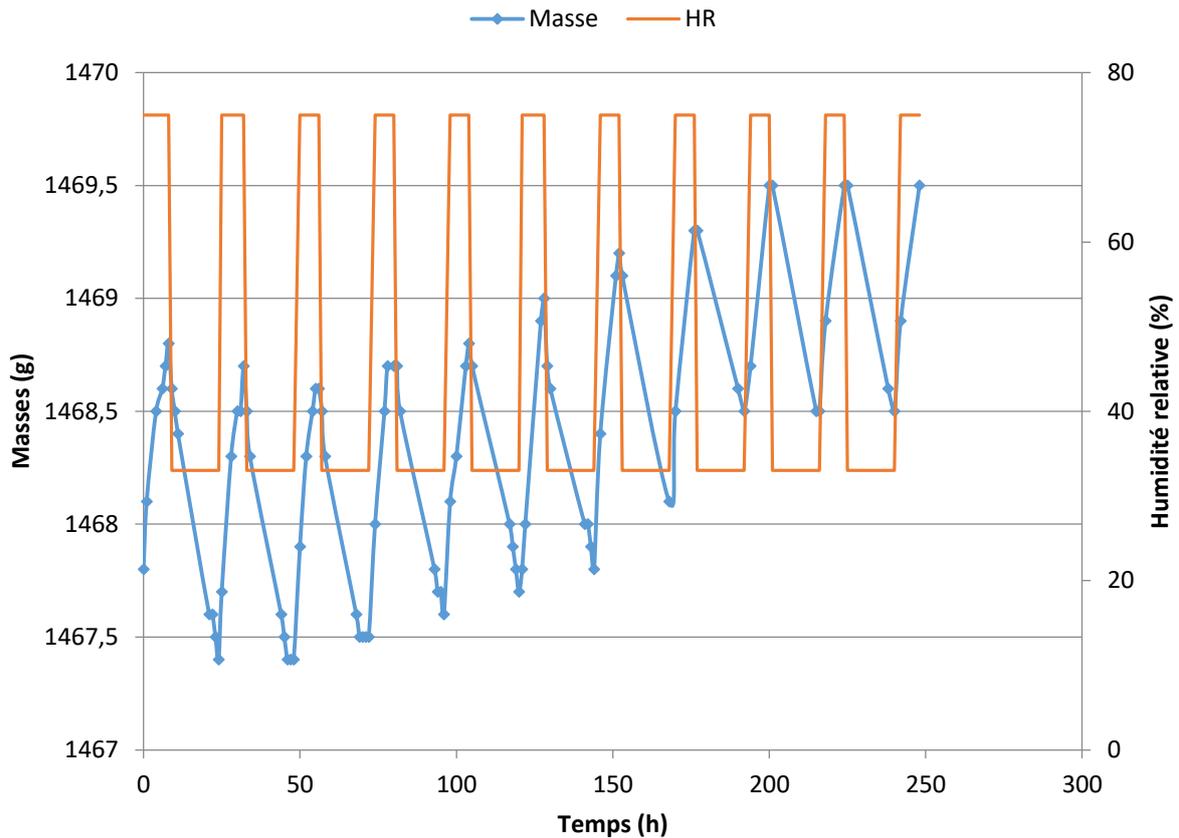


Figure VII-20. Cinétique de prise et de perte de masse d'un échantillon lors de l'essai MBV.

Le tableau VII-4 présente les valeurs MBV calculées en adsorption et désorption et les valeurs moyennes en état d'équilibre. Ces dernières valeurs sont ensuite utilisées afin de classer les différentes formulations selon la classification proposée par le projet Nordtest (voir figure VII-19).

Tableau VII-4 : Valeur tampon hygrique (MBV) des différents bétons étudiés.

Formulations		Masse volumique (kg/m ³)	MBV			Classification selon Nordtest project
			MBV ads (g/m ² .%HR)	MBV des (g/m ² .%HR)	MBV moy (g/m ² .%HR)	
% BAK	100	1963	1.9	2.62	2.26	Excellent
	75	2037	1.9	2.62	2.26	Excellent
	50	2094	1.43	2.39	1.90	Bon
	25	2203	1.43	1.9	1.67	Bon
% AE	100	1529	0.71	0.95	0.83	Modéré
	75	1497	0.48	0.95	0.71	Modéré
	50	1606	0.48	0.95	0.71	Modéré
	25	1869	0.48	0.95	0.71	Modéré
% PA	100	1751	0.95	1.43	1.19	Bon
	75	1889	1.19	1.9	1.55	Bon
	50	1923	1.19	1.67	1.43	Bon
	25	2014	0.71	1.43	1.07	Bon
% C8	100	2029	2.14	2.62	2.38	Excellent
	75	2060	1.43	2.38	1.91	Excellent
	50	2169	0.8	1.1	0.95	Modéré
	25	2226	1.43	2.14	1.79	Bon
% O	100	2300	0.71	1.19	0.95	Modéré

Ainsi, selon le tableau VII-4, nous pouvons remarquer que les bétons de granulats carbonatés sont classifiés comme de bon à excellent régulateur d'humidité, comparativement au béton de granulats ordinaires qui est classé comme régulateur modéré de l'humidité relative. Cette exploitation confirme la capacité des bétons à base de granulats carbonatés à réguler le taux d'humidité relative dans un local, et ainsi favoriser le confort, notamment hygrique, des occupants.

A titre d'exemple, supposons un local non ventilé de dimensions $5 \times 4 \times 2.5 = 50 \text{ m}^3$, chauffé à la température de 23°C . Une personne va générer dans ce local 100g de vapeur d'eau par heure. Les parois de ce local sont réalisées à l'aide d'un béton ordinaire ($\text{MBV}=0.95 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \Delta\text{RH})$). En une journée, l'augmentation de l'humidité relative sera donc de 31.6%, ce qui peut conduire à un état d'inconfort hygrothermique. En revanche, si les parois sont réalisées avec un béton de granulats carbonatés ($\text{MBV}=2.0 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \Delta\text{RH})$), l'augmentation de l'humidité relative sera deux fois inférieure, atteignant seulement 15%. Cet exemple simple met en

lumière l'intérêt de choisir des matériaux capable de réguler le taux d'humidité relative pour atteindre la sensation de confort hygrique.

Par ailleurs, l'essai MBV peut également être exploité de manière à identifier l'effusivité et la diffusivité hygrique des matériaux de construction, à l'aune des mesures du comportement de sorption. Les essais de sorption sur les bétons à base de 100% de granulats carbonatés ont été réalisés et nous permettons donc de déterminer ces deux grandeurs physiques. Malheureusement, les essais de sorption sur les formulations mélangeant granulats carbonatés et granulats ordinaires sont toujours en cours, eu égard au temps relativement long de ces essais. Le tableau VII-5 présente donc les effusivités et diffusivités hygrique des cinq bétons étudiés.

Tableau VII-5 : Effusivité et diffusivité hygriques des bétons étudiés

Bétons	Effusivité hygrique b_m(kg/(m².Pa.s^{1/2}))	$\frac{\partial u}{\partial \varphi}$	Perméabilité hygrique δ_p (kg/(m.s.Pa))	Diffusivité hygrique D_w (m².s)
BAK	$5.9 \cdot 10^{-7}$	0.07	$5.3 \cdot 10^{-12}$	$8.0 \cdot 10^{-11}$
AE	$2.2 \cdot 10^{-7}$	0.04	$1.5 \cdot 10^{-12}$	$4.4 \cdot 10^{-11}$
PA	$3.1 \cdot 10^{-7}$	0.04	$2.9 \cdot 10^{-12}$	$8.8 \cdot 10^{-11}$
C8	$6.2 \cdot 10^{-7}$	0.08	$5.1 \cdot 10^{-12}$	$6.8 \cdot 10^{-11}$
O	$2.3 \cdot 10^{-7}$	0.01	$4.5 \cdot 10^{-12}$	$3.7 \cdot 10^{-10}$

Ces résultats sont obtenus par l'exploitation des essais MBV, d'une manière indirecte. Cette méthodologie doit encore être éprouvée par confrontation avec des résultats obtenus à partir d'essais normalisés. Une autre manière de confirmer ces données serait de mettre en place un modèle numérique de transferts de chaleur et de masse couplés au sein de ces bétons afin de déterminer la perméabilité hygrique par confrontation avec les résultats expérimentaux issus des tests MBV. Néanmoins, cette approche semble conduire à des résultats satisfaisants (car proches des données utilisées dans la littérature) et constituerait donc une méthodologie simple et relativement rapide afin d'identifier les principales caractéristiques hygriques des matériaux. En effet, dans ce cas, seuls deux essais sont nécessaires (MBV et isothermes de sorption) afin de retrouver les propriétés hygriques des matériaux, de manière similaire aux

essais de caractérisation thermiques où deux essais (conductivité et chaleur spécifique) permettent d'identifier les quatre principales caractéristiques thermique des matériaux.

VI. Conclusion

Ce chapitre est consacré à la caractérisation expérimentale des propriétés hygriques des formulations de béton à base de granulats carbonatés. L'exploitation des essais de sorptivité et d'immersion a mis en évidence l'influence de la composition chimique des granulats sur la formation du réseau poral du béton. En effet, les pores ouverts et accessibles, ainsi que les diamètres de ces pores ne semblent pas être dépendant des propriétés physiques des bétons tels que leur masse volumique, leur porosité ou encore le coefficient d'absorption d'eau des granulats. L'identification des isothermes de sorption et l'utilisation du lissage mathématique selon le modèle GAB ont montré que les pores macroscopiques présentent des diamètres de toutes dimensions, sans favoriser des capillaires fins ou plus important (isothermes de type II).

L'essai MBV a néanmoins permis de déterminer que ces matériaux présentent une bonne capacité à réguler le niveau d'humidité relative d'une ambiance, selon la classification Nordtest. Ces matériaux sont donc à favoriser dans le domaine de la construction afin d'améliorer la sensation de confort hygrique des occupants. Ces résultats sont en accord avec les observations précédentes qui montrent que les bétons à base de granulats carbonatés favorisent les phénomènes de migration de l'eau, sous forme de vapeur ou liquide, par rapport à un béton ordinaire.

Enfin, une exploitation indirecte des résultats des essais MBV, couplés avec l'identification des isothermes de sorption, nous ont permis d'estimer les effusivités et diffusivités hygriques. Cette méthodologie d'exploitation doit être éprouvée afin de confirmer sa solidité mais constitue une piste intéressante dans la caractérisation expérimentale des performances hygriques des matériaux de construction.

Dans cette partie, nous avons pu caractériser mécaniquement, thermiquement et hygroscopiquement les bétons formulés. Dans un premier temps, les essais mécaniques ont montré que la nature des granulats a une influence sur les propriétés des bétons à savoir la résistance en compression, en traction et les modules d'élasticité. Des modèles de prédiction des caractéristiques mécaniques ont été proposés à partir des essais réalisés. L'identification de la zone d'interphase entre la matrice et granulat a été réalisée au microscope électronique à balayage et a montré l'influence de l'absorption d'eau sur l'adhérence mécanique entre la matrice cimentaire et le granulat. Dans un second temps, les différents essais thermiques ont montré que les conductivités thermiques des bétons de granulats carbonatés sont assez faibles comparées au béton ordinaire, d'où une amélioration du caractère isolant de ces matériaux. A partir des valeurs d'effusivité thermique, chaleur spécifique massique et diffusivité thermique, nos bétons ont des bonnes performances d'inertie thermique, pouvant stocker une importante quantité de chaleur avant de la restituer. Ces résultats expérimentaux ont été modélisés par un modèle d'homogénéisation auto-cohérente à trois phases. Cette modélisation a conduit à une bonne adéquation des résultats expérimentaux. A l'aune de ces analyses, nous avons donc proposé un modèle empirique simplifié afin de prédire la conductivité thermique et la capacité thermique massique des bétons de granulats carbonatés. Enfin, l'exploitation des essais de sorptivité et d'immersion a mis en évidence l'influence de la composition chimique des granulats sur la formation du réseau poral du béton. L'identification des isothermes de sorption et l'utilisation du lissage mathématique selon le modèle GAB ont montré que les pores macroscopiques présentent des diamètres de toutes dimensions, sans favoriser des capillaires fins ou plus importants. L'essai MBV a néanmoins permis de déterminer que ces matériaux présentent une bonne capacité à réguler le niveau d'humidité relative d'une ambiance, selon la classification Nordtest. Ces résultats sont en accord avec les observations précédentes qui montrent que les bétons à base de granulats carbonatés favorisent les phénomènes de migration de l'eau, sous forme de vapeur ou liquide, par rapport à un béton ordinaire. Enfin, une exploitation indirecte des résultats des essais MBV, couplés avec l'identification des isothermes de sorption, nous ont permis d'estimer les effusivité et diffusivité hygroscopiques.

CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans ce manuscrit s'inscrit dans le cadre d'une cotutelle de thèse entre le Laboratoire des Technologies Innovantes (LTI) de l'Université de Picardie Jules Verne (UPJV-Amiens) et le Laboratoire de Génie Civil (LGC) de l'École Nationale d'Ingénieurs de Tunis à l'Université Tunis El-Manar (UTM-Tunisie). Il se concentre sur une étude d'optimisation de la formulation de bétons d'éco-granulats produits par carbonatation accélérée des déchets d'incinérateurs. Ce travail de recherche s'intéresse aux matériaux écologiques présentant une solution viable pour développement durable du domaine de la construction. De nos jours, l'élimination des déchets et la réduction des émissions du CO₂ et leurs réutilisations représentent un enjeu important. De plus, les granulats naturels sont limités en quantité comme toute matière première naturelle. De ce fait, la recherche de matériaux de qualité en substitution des granulats naturels est à l'origine du grand intérêt porté aux granulats recyclés, qui peuvent satisfaire nos besoins. Afin de réduire notre impact environnemental, des granulats issus de la valorisation des cendres d'incinérateurs, produits par carbonatation accélérée de déchets et de sous-produits industriels et du CO₂, peuvent être considérés comme granulats à utiliser dans la confection des bétons. En effet, l'emploi de ces granulats permettrait de réduire également les quantités de déchets ultimes produits dans les centres d'incinérations et envoyés dans les centres d'enfouissement, voire de valoriser nos émissions de CO₂ pour limiter les rejets dans l'atmosphère.

Ce manuscrit de thèse a pour objectif d'étudier les comportements mécaniques, thermiques et hygriques des bétons de granulats carbonatés obtenus par carbonatation accélérée des cendres d'incinérateurs. Ces matériaux possèdent des porosités importantes ce qui leurs donnent l'aspect léger et leurs offrent des propriétés thermiques et hygriques intéressantes. Ils peuvent offrir une réponse aux problèmes environnementaux actuels, à savoir l'augmentation des quantités des déchets et des sous-produits industriels, l'appauvrissement des ressources naturelles et le dégagement de CO₂ qui participe au réchauffement climatique.

Dans une première partie, une synthèse bibliographique sur les matériaux de construction légers offrant des performances en confort thermo-hygrique a été présentée. Différents travaux orientés sur les propriétés des bétons légers ont été synthétisés. Un chapitre s'oriente plus particulièrement sur la gestion et la valorisation des déchets dans les matériaux de construction. L'analyse de la littérature a mis en évidence l'influence de ces granulats légers

sur le comportement des bétons légers comparativement aux granulats ordinaires. Il demeure donc intéressant de produire des bétons à base de déchets et de sous-produits industriels afin de réduire les quantités énormes de déchets produits par notre société et de préserver les ressources naturelles en granulats. De ce fait, des matériaux légers sont produits à partir de déchets et de sous-produits industriels grâce à un procédé de carbonatation accélérée.

Dans une deuxième partie, les matériaux utilisés lors de notre projet ont été présentés, en mettant en exergue leurs processus de fabrication. Les travaux présentés dans ce manuscrit portent sur l'utilisation de 3 types de granulats carbonatés (produits à partir de déchets de REFIOM, de papier et de biomasse) ainsi que 2 types de granulats couramment utilisés (de l'argile expansée et un gravier ordinaire utilisés comme granulats de référence). Une large campagne expérimentale a été réalisée sur les granulats étudiés du point de vue physique, mécanique, hygrique et thermique. Les essais mettent en évidence des porosités importantes des granulats carbonatés. Les granulats C8, à base de REFIOM, et ceux à base de cendres de biomasse BAK ont montré des performances mécaniques et thermiques acceptables. Les granulats à base de cendres de papiers PA présentent des performances mécaniques moyennes et de très bonnes propriétés thermiques, comparables aux granulats d'argile expansée AE. Les relations entre les propriétés physiques (porosité, masses volumiques) et les performances mécaniques des granulats ont été établis avec des coefficients de corrélation élevés. Nous pouvons souligner que la masse volumique d'un granulats, sa résistance à l'écrasement et sa conductivité thermique ont une relation linéaire avec leurs porosités. L'augmentation de la porosité ainsi que l'absorption d'eau entraîne une diminution de la densité et de la résistance des granulats.

Dans un second temps, des bétons ont été confectionnés en substituant partiellement ou totalement les granulats ordinaires par des granulats éco-responsables (carbonatés et argile expansée) dans les proportions suivantes : 25%, 50%, 75% et 100%. Les méthodes traditionnelles de formulation ne sont pas adaptées à ces matériaux et nous avons donc proposé une approche combinant les principes de Dreux-Gorisse et de Baron-Olivier pour prendre en considération l'importante absorption d'eau des granulats poreux. Ces bétons ainsi confectionnés ont été par la suite comparés au béton de référence, réalisé avec des granulats ordinaires de manière à assurer une ouvrabilité et des propriétés à l'état frais suffisantes pour intégrer le marché des matériaux de construction porteurs.

Dans une dernière partie, nous nous sommes intéressés aux propriétés à l'état durci de ces bétons de granulats carbonatés, orientant particulièrement notre démarche sur la capacité à

prédire des caractéristiques mécaniques, thermiques et hygriques au regard de la formulation et des propriétés des constituants. L'étude expérimentale s'est consacrée aux propriétés physiques, mécaniques, hygriques et thermiques des bétons légers et de référence. Ces essais ont été élaborés dans le but de caractériser ces matériaux afin d'envisager une possibilité de valorisation dans la filière de Génie civil. Ces données nous aident à étudier l'influence des différents paramètres tels que la nature de granulats (porosité, absorption d'eau...) et leurs taux de substitution dans la matrice sur le comportement des bétons de granulats carbonatés.

D'un point de vue mécanique, le module d'Young des bétons de granulats carbonatés ainsi que leurs résistances en compression sont fortement liés au pourcentage des granulats carbonatés présents dans la composition et leurs caractéristiques (absorption d'eau, porosité, masse volumique). Bien que moins résistant qu'un béton traditionnel, les bétons de granulats carbonatés présentent des performances suffisantes pour être considérés comme porteur. L'observation par microscope électronique à balayage a montré que la largeur de la zone d'interphase entre la matrice et le granulat varie selon l'absorption d'eau des granulats, ce qui entraîne de fortes variations d'adhérence mécanique et d'adhésion physico-chimique entre la matrice cimentaire et le squelette granulaire.

Les différents essais thermiques mettent en lumière des conductivités thermiques des bétons de granulats carbonatés assez faibles comparés au béton ordinaire, ce qui leur confère un avantage en terme de caractère isolant. Compte tenu de la porosité des granulats composant ces bétons, nous avons mis en exergue l'influence de la température sur l'évolution de la conductivité thermique. En effet, les matériaux poreux adsorbent la vapeur d'eau qui, en fonction de la température, se chauffe et conduit le flux de chaleur. A partir des valeurs d'effusivité thermique, chaleur spécifique et diffusivité thermique, nos bétons semblent présenter des bonnes inerties thermiques, pouvant stocker une importante quantité de chaleur avant de la restituer, avec un déphasage plus intéressant que celui du béton traditionnel.

Enfin, le comportement hygrique des bétons étudiés a porté sur la mesure du coefficient d'absorption d'eau par capillarité et par immersion, sur l'identification des isothermes de sorption et sur la capacité tampon hygrique. Les résultats d'absorption d'eau permettent de définir la porosité ouverte et accessible des bétons étudiés. Les matériaux étudiés ont des isothermes de sorption similaires, de Type 2, et ils présentent tous une hystérésis. Selon le projet Nordtest, les bétons à base de granulats carbonatés sont de bons à excellent régulateur d'humidité dans le bâtiment. L'exploitation de ces essais nous a permis de proposer une méthode simple d'évaluation des diffusivité et effusivité hygriques, d'une manière analogue aux calculs des diffusivité et effusivité thermiques.

L'analyse des différents résultats expérimentaux montre l'importance de l'optimisation de la formulation des bétons en prenant en compte le type des granulats ainsi que leurs fractions dans le béton. Une méthode de formulation efficace est indispensable afin de composer des bétons de granulats carbonatés pouvant atteindre les exigences du marché de la construction. A ces fins, les résultats expérimentaux ont été confrontés aux résultats théoriques déterminés par diverses modélisations analytiques et/ou empiriques afin de déterminer les modules d'élasticité, résistances mécaniques et performances thermiques des bétons étudiés. Les prédictions des propriétés des bétons sont en bon accord avec les résultats expérimentaux et ont donc permis de valider la méthodologie de formulation proposée en Annexe C.

PERSPECTIVES

Cependant, et afin de mieux valoriser ces types de déchets, il est indispensable d'apporter des améliorations aux performances des bétons. De nombreuses perspectives de recherche sont également envisagées pour prolonger cette étude. Ces perspectives peuvent porter :

- Sur le plan expérimental
 - En élaborant des essais de perméabilité à la vapeur à différentes humidités relatives et différentes températures et ainsi confirmer l'approche de caractérisation hygrique indirecte proposée ;
 - En réalisant des essais de sorption à différentes températures pour évaluer l'influence de la température sur le comportement hygrique des matériaux ;
 - En mesurant les conductivités thermiques à différentes teneurs en eau ;
 - En approfondissant notre étude expérimentale microscopique afin de mesurer la taille et la tortuosité des pores et d'identifier leur cinématique de formation ;
 - En étendant les essais à l'échelle de la paroi (local) afin d'étudier l'intégralité du système ;
 - En étudiant le couplage entre le béton de granulats carbonatés et les renforts en acier, par exemple ;
 - En évaluant l'impact d'additifs sur le comportement du béton ;
 - En étudiant la durabilité des bétons ; fluage, vieillissement accéléré avec des cycles d'humidités relatives et températures.
- Sur le plan numérique
 - Les résultats trouvés peuvent être utilisés afin d'établir des modèles numériques étudiant les transferts thermohygriques couplés des matériaux ;
 - Une étude numérique des caractéristiques mécaniques sera aussi intéressante afin d'identifier la propagation de la fissuration à l'interface entre la matrice cimentaire et le squelette granulaire.

BIBLIOGRAPHIE

Abadie M.O and Mendonça K.C. Moisture performance of building materials: From material characterization to building simulation using the Moisture Buffer Value concept [Journal] // Building and Environment. - 2009. - Vol. 44. - pp. 388-401.

ACI committee 213 Guide for structural lightweight-aggregate concrete [Book]. - [s.l.] : American concrete institute, 2003.

ACI Manual of Concrete Practice Guide for structural lightweight aggregate concrete, Part I: Materials and General Properties of Concrete [Book]. - 1994.

ACI-318-08 Building Code Requirements for Structural Concrete [Journal] // American Concrete Institute, Farmington Hills MI. - 2008.

Actu-environnement <http://www.actu-environnement.com/ae/news/carl-enckell-sortie-statut-dechet-16256.php4> [Online]. - 2016.

ADEGOLOYE O.G. F. Valorisation des laitiers issus de l'élaboration d'aciers inoxydables comme granulats dans le béton [Book]. - [s.l.] : Université de Cergy Pontoise, 2014.

AFNOR NF EN 1097-2 Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques de granulats - Partie 2 : méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation. - 2010.

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. - 2014.

AFNOR NF EN 12664 Performance thermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination de la résistance thermique par la méthode de la plaque chaude gardée et la méthode fluxmétrique - Produits secs et humides de moyenne et basse résistance thermique. - 2001.

AFNOR NF EN 13055-1 A Granulats légers pour béton et mortier. - 2002.

AFNOR NF EN 933 Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats [Revue]. - 1997.

AFNOR NF EN ISO 12572 : Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination des propriétés de transmission de la vapeur d'eau. - 2001.

AFNOR NF EN1097-3 Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 3 : méthode pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité intergranulaire. - 1998.

AFNOR NF EN12571 Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination des propriétés de sorption hygroscopique. - 2013.

AFNOR NF P 14-306 Blocs en béton cellulaire autoclavé pour murs. - 1986.

AFNOR NF P18-557 Granulats - Éléments pour l'identification des granulats. - 1990.

AFNOR NF EN13055-1 Granulats légers pour béton et mortier. - 2002.

Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie ADEME
<http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=10139> [Online]. - 2015.

Agence Nationale de Gestion des Déchets ANGED
http://www.anged.nat.tn/index.php?option=com_content&view=article&id=153&Itemid=203 [Online]. - 2016.

Akkaoui Abdessamad Bétons de granulats de bois : étude expérimentale et théorique des propriétés thermo-hydro-mécaniques par des approches multi-échelles [Report] / Université Paris-Est. - 2014.

AL-SIBAHY A. and EDWARDS R. Mechanical and thermal properties of novel lightweight concrete mixtures containing recycled glass and metakaolin [Journal] // Construction and Building Materials. - 2012. - 31. - pp. 157-167.

Anh Cuong M.HO Optimisation de la composition et caractérisation d'un béton incorporant des granulats issus du broyage de pneus usagés: Application aux éléments de grande surface [Report]. - [s.l.] : Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse Génie Civil, 2010.

Antemir A. [et al.] Secondary aggregate from waste treated with carbon dioxide [Journal] // Construction materials. - [s.l.] : ICE Proc, 2011. - Vol. 164. - pp. 231-239.

Antit S., Hassis H. and Fiorio B. Flexural Strength of Laminated Waste Concrete—Normal Concrete Beams [Journal] // Journal of Solid Waste Technology and Management. - 2012. - 2 : Vol. 38. - pp. 103-116.

ARFVIDSSON J. Moisture penetration for periodically varying relative humidity at boundary [Journal] // acta physica aedificiorum. - 1999. - Vol. 2.

Arnaud L. [et al.] Modélisation par homogénéisation autocohérente de la conductivité thermique de bétons et laines de chanvre [Report]. - Lyon : [s.n.], 2000.

Arnould M. and Virlogeux M. Granulats et bétons légers [Book]. - [s.l.] : Presse de l'ENPC, 1986.

Aubert J.E Utilisation de déchets dans les bétons: exemple des cendres volantes d'incinérateurs d'ordures ménagères [Conference] // XXI emes Rencontres Universitaires de Genie Civil 2003- Prix "RENE HOUPERT". - 2003.

B. Gonzalez-Corrochano, J. Alonso-Azcarate and M. Rodas Production of lightweight aggregates from mining and industrial wastes [Journal] // Journal of Environmental Management . - 2009. - 90. - pp. 2801–2812.

BAJARE D., BUMANIS G. and KORJAKINS A. New Porous Material Made from Industrial and Municipal Waste for Building Application [Journal] // MATERIALS SCIENCE. - 2014. - 3 : Vol. 20. - pp. 1392–1320.

Balayssac J.P., Detriche Ch.H. and Grandet J. INTERET DE L'ESSAI D'ABSORPTION D'EAU POUR LA CARACTERISATION DU BETON D'ENROBAGE [Journal] // Materials and Structures. - May 1993. - Vol. 26. - p. 226.

Baley C. Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites [Journal] // Techniques de l'Ingénieur. - 2004.

Bastian G. Détermination de la conductivité thermique de matériaux de construction par une méthode transitoire type “ sonde cylindrique ” [Journal] // Revue de Physique Appliquée. - 1982. - 4 : Vol. 17. - pp. 217-225.

Bederina M. [et al.] Effect of the addition of wood shavings on thermal conductivity of sand concretes: Experimental study and modeling [Journal] // Construction and Building Materials. - 2007. - Vol. 21. - pp. 662-668.

Bello Latifou Mise au point d'une méthodologie pour formuler de nouveaux bétons auto-plaçants légers et durables [Report] / Génie Civil ; Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc. - 2014. - p. 230.

BEN YOUSSEF Marwa [et al.] Caractérisation mécanique d'une gamme de béton mousse ayant des densités comprises entre 0,6 et 1,4 [Conference] // JSFM-CMC. - 2016.

Bernhardt M. [et al.] Mechanical properties of lightweight aggregates [Journal] // Journal of the European Ceramic Society. - 2013. - 33. - pp. 2731–2743.

Berredjem L. and Arabi N. Les matériaux de démolition une source de granulats pour beton : formulation et caractérisation d'un béton à base de ces recyclés [Conference] // SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries. - 2009.

Berredjem L., Arabi N. and Molez L. Contribution à l'étude des indicateurs de durabilité des bétons à base des granulats recyclés [Conference] // 33 èmes Rencontres de l'AUGC, ISABTP/UPPA. - 2015.

Bertil P. Seven-Year Study on the Effect of Silica Fume in Concrete [Journal] // Advanced Cement Based Materials. - 1998. - pp. 139-155.

Bertos M.F. [et al.] A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO₂ [Journal] // Journal of Hazardous Materials. - 2004. - 3 : Vol. 112. - pp. 193-205.

Bertos M.F. [et al.] Investigation of accelerated carbonation for the stabilisation of MSW incinerator ashes and the sequestration of CO₂ [Journal] // Green chemistry. - 2004. - Vol. 8. - pp. 428-436.

BESSENOUCI Mohammed Zakaria. Caractérisation, Modélisation et Analyse du Comportement Thermo-Mécanique des Matériaux de Construction à Base Pouzzolanique [Report]. - 2018.

Bing C. and Ning L. A novel lightweight concrete-fabrication and its thermal and mechanical properties [Journal] // Construction and Building Materials. - 2013. - 44. - pp. 691-698.

Bleszki A.K and Gassen G. Composites reinforced with cellulose based fibres. - [s.l.] : Progress in polymer science, 1999. - pp. 221-274.

Bodet R. Substitution des granulats alluvionnaires dans l'industrie du béton par les granulats marins, concassés ou recyclés [Book] / ed. 27. EA286/Matériau. Réf.DDE. - [s.l.] : CERIB, RB/JRO, 2003.

Bogas J.A., de Brito J. and Figueiredo J.M. Mechanical characterization of concrete produced with recycled lightweight expanded clay aggregate concrete [Journal] // Journal of Cleaner Production. - 2014. - pp. 1-9.

Boutin C. Conductivité thermique du béton cellulaire autoclavé : modélisation par méthode auto-cohérente [Journal] // Matériaux et Constructions. - 1996. - Vol. 29. - pp. 609-615.

Braymand S. [et al.] Les granulats recyclés de bétons : un matériau à fort potentiel de valorisation dans les bétons [Conference]. - Montpellier, France : Conférence Matériaux 2014 - Colloque Ecomatériau, 2014.

Braymand S. and Grandgeorge J.D. Mise au point d'une méthode expérimentale de mesure de la conductivité thermique : application aux bétons de granulats recyclés [Conference]. - Nantes, France : [s.n.], 2010.

Brudieux V. Extraction, modification enzymatique et caractérisation chimique de nouvelles structures pectiques. Application de la relation structure/activité à la dermocosmétique.. - [s.l.] : Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2007. - pp. pp1-220.

Brunauer S., Emmett P.H. and Teller E. Adsorption of Gases in Multimolecular Layer [Journal] // Journal of American Chemical Society. - 1938. - 60 : Vol. 2. - pp. 309 – 319.

Butler L., West J.S. and Tighe S.L. Effect of recycled concrete coarse aggregate from multiple sources on the hardened properties of concrete with equivalent compressive strength [Journal] // Construction and Building Materials. - 2013. - 47. - pp. 1292–1301.

Calais T. Propriétés mécaniques et durabilité d'un béton léger : Application en régions froides [Report] : MEMOIRE / Faculté des sciences et de génie, Université Laval, Québec. - 2013.

Carmichaeli J. Pumice concrete panels [Journal] // Concrete International. - 1986. - 8. - pp. 31-32.

Caurie M. A New Model Equation for Predicting Safe Storage Moisture Levels for Optimum Stability of Dehydrated Foods [Journal] // Journal of Food Technology. - 1970. - 3 : Vol. 5. - pp. 301 - 307.

Cerezo V. Propriétés mécanique, thermique et acoustique d'un matériau à base de particules végétales: Approche expérimentale et modélisation théorique [Report] / ENTPE.INSA Lyon. - France : [s.n.], 2005.

Chang T.P. [et al.] Engineering properties of lightweight aggregate concrete assessed by stress wave propagation methods [Journal] // Cement and Concrete Composites. - [s.l.] : Cement and concrete composite, 2006. - 28. - pp. 57- 68.

Chi J.M [et al.] Effect of aggregate properties on the strength and stiffness of lightweight concrete [Journal] // Cement & Concrete Composites. - 2003. - pp. 197-205.

Cho J.S. [et al.] Carbon Dioxide Capture with Accelerated Carbonation of Industrial Combustion Waste [Journal] // International Journal of Chemical Engineering and Applications. - 2011. - 1 : Vol. 2. - pp. 60-65.

Chung Sang-Yeop, Abd Elrahman Mohamed and Stephan Dietmar Effect of Different Gradings of Lightweight Aggregates on the Properties of Concrete [Journal] // Applied sciences. - 2017. - 585 : Vol. 7.

Chung-Chia Y. and Ran H. Approximate Strength of Lightweight Aggregate Using Micromechanics Method [Journal] // Advanced Cement Based Materials. - 1998. - Vol. 7. - pp. 133-138.

Collet F. Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faible impacts environnementaux [Report] / INSA Rennes. - 2004.

COLLET Florence, PRETOT Sylvie and LANOS Christophe Performance hydrique de bétons de chanvre : effet de l'enduit sur leur capacité de régulateurs hydriques [Article] // 31èmes Rencontres de l'AUGC, E.N.S. Cachan, 29 au 31 mai 2013. - 2013.

construction Architectes et professionnels du secteur de la L'utilisation des granulats issus du recyclage [Report]. - [s.l.] : Rapport technique-Bâtiments exemplaires, 2010.

construction UNICEM: Union Nationale des Industries de Carrières et Matériaux de L'industrie française des granulats Edition 2017/2018 [Report]. - 2017.

Coquillat G. Béton léger de structure. - [s.l.] : Le bâtiment, bâtir, 1976.

De Boom A. and Degrez M. Belgian MSWI fly ashes and APC residues: A characterisation study [Journal] // Waste Management. - 2012. - 32. - pp. 1163-1170.

De Juan M.S. and Gutiérrez P.A. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate [Journal] // Construction and Building Materials. - 2009. - 23. - pp. 872-877.

Debieb F. [et al.] Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates [Journal] // Cement and Concrete Composites. - 2010. - 32. - pp. 421-426.

Demirdag S. and Gunduz. L. Strength properties of volcanic slag aggregate lightweight concrete for high performance masonry units [Journal] // Construction and building materials. - 2008. - Vol. 22. - pp. 135-142.

Derbal A. [et al.] A simple method for building materials thermophysical properties estimation [Journal] // Construction and Building Materials. - 2014. - pp. 197-205.

Derbal Radhouan Développement d'une méthode inverse de caractérisation thermique application à l'estimation des propriétés thermophysiques et hydriques des matériaux de construction [Report] / Université d'Artois Faculté des Sciences Appliquées de Béthune. - 2014.

DJERBI TEGGUER A. Determining the water absorption of recycled aggregates utilizing hydrostatic weighing approach [Journal] // Construction and Building Materials. - 2012. - 27. - pp. 112-116.

Douara T.H. Caractérisation physiques et chimiques des granulats recyclés et granulats naturels [Conference]. - Oran-Algeria : 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries, 2009. - pp. 289-294.

Dreux G. and Festa J. Nouveau guide du béton et de ses constituants [Book]. - [s.l.] : Huitième édition Eyrolles, 1995.

Duan Z.H. and Poon C.S. Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars [Journal] // Materials and Design. - 2014. - Vol. 58. - pp. 19-29.

Dulsang N. [et al.] Characterization of an environment friendly lightweight concrete containing ethyl vinyl acetate waste [Journal] // *Materials and Design*. - 2016. - Vol. 96. - pp. 350-356.

EN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of concrete structures part 1-1: General rules and rules for buildings [Journal] // *Nederlands Normalisatie institute*. - 2007.

Erdogan Y., Yasar E. and Gammage Ranjith P. Obtaining lightweight concrete using colemanite waste and acidic pumice [Journal] // *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. - 2016. - 1 : Vol. 52. - pp. 35-43.

Etxeberria M. [et al.] Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete [Journal] // *Cement and Concrete Research*. - 2007. - 37. - pp. 735–742.

Etxeberria M. [et al.] Properties of concrete using metallurgical industrial by-products as aggregates [Journal] // *Construction and Building Materials*. - 2010. - 9 : Vol. 24. - pp. 1594–1600.

Evangelista L. and de Brito J. Mechanical behavior of concrete made with fine recycled concrete aggregates [Journal] // *Cement & Concrete Composites*. - 2007. - 29. - pp. 397–401.

Franck C. Produits préfabriqués en béton file : Vers l'amélioration des performances du matériau pour mieux gérer le procédé de production [Report] : DOCTORAT / Université de Toulouse III. - 2007. - p. 287.

G., Dreux J. and Festa. Guide pratique du béton [Book]. - [s.l.] : Collection de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, 1970.

GaneshBabu K. and SaradhiBabu D. Behaviour of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume, [Journal] // *Cement concrete*. - 2003. - Vol. 33. - pp. 755-762.

Gjorv O.E. and Zhang M.H. Characteristics of lightweight aggregate of high-strength concrete [Journal] // *ACI Materials Journal*. - 1991. - Vol. 88. - pp. 150-158.

Gjorv O.E. and Zhang M.H. Pozzolanic reactivity of lightweight aggregates [Journal] // *Cement and Concrete Research*. - 1990. - 20 : Vol. 6. - pp. 884-890.

Gómez-Soberón J.M.V. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study [Journal] // Cement and concrete research. - 2002. - 32 : Vol. 8. - pp. 1301-1311.

Gonzalez-Corrochano B., Alonso-Azcaate J. and Rodas M. Production of lightweight aggregates from mining and industrial wastes [Journal] // Journal of Environmental Management. - 2009. - 90. - pp. 2801-2812.

Gottfredsen F.R. and Thogersen F. Recycling of concrete in aggressive environment [Journal] // Proceedings of the Third International RILEM Symposium ,Demolition and Reuse of Concrete and Masonry. - Denmark : [s.n.], 1993.

Gündüz L. The effects of pumice aggregate/cement ratios on the low-strength concrete properties [Journal] // Construction and Building Materials. - 2008. - 5 : Vol. 22. - p. 721.

Gunning P. [et al.] Novel approaches to the valorization of ashes using aggregation by carbonation [Conference] // in: 2nd International. Slag Valorisation Symposium. - Leuven, Belgium : [s.n.], 2011. - pp. 103-116.

Gunning P.J., Hills C.D. and Carey P.J. Production of lightweight aggregate from industrial waste and carbon dioxide [Journal] // waste management . - 2009. - Vol. 29. - pp. 2722–2728.

Gunning P.J., Hills C.D. and Carey P.J. Accelerated carbonation treatment of industrial wastes [Journal] // Waste Management. - 2010. - 6 : Vol. 30. - pp. 1081-1090.

Hafidh Hamid Influence des paramètres morphologiques des granulats sur le comportement rhéologique des bétons frais : étude sur systèmes modèles [Report] / Université Paris-Est. - 2012.

Halsey G. Physical Adsorption on Non-uniform Surfaces [Journal] // Journal of Chemistry Physics. - 1948. - 6 : Vol. 10. - pp. 931–93.

Hamri A. Influence des fibres sur la résistance et la rupture à l'effort tranchant des éléments de structure [Book]. - [s.l.] : Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Faculté de Génie de la construction, Département de Génie civil, 2015.

Hebhoub H. and Belachia M. Introduction de sable de déchet de marbre dans le béton hydraulique [Journal] // Nature & Technologie. - 2011. - 4. - pp. 41-46.

Henderson S.M A Basic Concept of Equilibrium Moisture [Journal] // Agricultural Engineering. - 1952. - 1 : Vol. 33. - pp. 29 – 32.

Hepworth D.G. [et al.] The manufacture and mechanical testing of thermosetting natural fibre composites [Journal] // Journal of Materials science. - 2000. - Vol. 35. - pp. 293–298.

Herrmann A.S., Nickel J. and Riedel U. Construction materials based upon biologically renewable resources—from components to finished parts [Journal] // Polymer Degradation and Stability. - 1998. - Vol. 59. - pp. 251-261.

HILAL A.A, THOM N.H. and DAWSON A. R. Failure mechanism of foamed concrete made with/without additives and lightweight aggregates [Journal] // Journal of advanced concrete technology. - 2016. - Vol. 14. - pp. 511-520.

Hill R. A self consistent mechanics of composite materials [Journal] // Mech. Phys. Solids. - 1965. - Vol. 13. - p. 189.

Hills C.D. and Carey P.J. Production of Secondary Aggregates [Journal] // United States Patent Application Publication,. - 2009.

Holm T.A. [et al.] Moisture dynamics in lightweight aggregate and concrete [Article] // Expanded Shale Clay & Slate Institute ESCSI. - [s.l.] : ESCSI publication, 2004.

Huang X. [et al.] Mechanical and thermal properties of green lightweight engineered cementitious composites [Journal] // Construction and Building Materials. - 2013. - Vol. 48. - pp. 954-960.

Indicateurs de développement durable en Champagne-Ardenne : La production des granulats [Article] // Insee dossier n°34 . - Octobre 2011. - p. 21/22.

International Union of Pure and Applied Chemistry Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity [Journal] // Pure and Applied Chemistry. - 1985. - Vol. 57. - pp. 603-619.

Jaspard E., Macherel D. and Hunault G. Computational and Statistical Analyses of Amino Acid Usage and Physico-Chemical Properties of the Twelve Late Embryogenesis Abundant Protein Classes [Journal]. - 2012.

Jiangying L.I.U. [et al.] Comparison of properties of traditional and accelerated carbonated solidified/stabilized contaminated soils [Journal] // Journal of Environmental Sciences. - 2008. - 5 : Vol. 20. - pp. 593-598.

Jianzhuang X. [et al.] An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996–2011) [Journal] // Construction and Building Materials. - 2012. - 31. - pp. 364-383.

Jowitt R. and Wagstaffe P.J. The certification of the water content of microcrystalline cellulose at 10 water activities [Journal] // Commission of the European Communities, Community Bureau of Reference. - brussels : [s.n.], 1989.

Kabay Nihat and Aköz Fevziye Effect of prewetting methods on some fresh and hardened properties of concrete with pumice aggregate [Journal] // Cement & Concrete Composites. - 2012. - Vol. 34. - pp. 503-507.

Karakurt Cenk and Özen Uğur Influence of natural lightweight aggregates on the properties of concrete [Journal] // Journal of the turkish chemical society section B. - 2017. - 2 : Vol. 1. - pp. 9-16.

Katz A. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete [Journal] // Cement and concrete research. - 2003. - 33 : Vol. 5. - pp. 703-711.

Ke Y. [et al.] Comportement Mécanique des Bétons de Granulats Légers: Etude Expérimentale et Modélisation [Conference] // XXIVème Rencontres du Génie Civil et Urbain, Construire : les nouveaux défis. - 2006.

Ke Y. [et al.] Influence of volume fraction and characteristics of lightweight aggregates on the mechanical properties of concrete [Journal] // Construction and Building Materials. - 2009. - Vol. 23. - pp. 2821–2828.

KE Yang Caractérisation du comportement mécanique des bétons de granulats légers : expérience et modélisation [Report] : Manuscrit de thèse de doctorat / Université de Cergy Pontoise. - 2008. - p. 316.

Kerner E. The elastic and thermoelastic properties of composite media [Journal] // Proc. Phys. Soc (B). - 1956. - Vol. 69. - p. 189.

Khaouadjia Mohamed Lyes Kamel Etude des propriétés physico-mécaniques et rhéologiques des bétons à base des sables de carrières : expérimentation et modélisation

[Report] : Manuscrit de thèse de doctorat / Université Mohamed Khider-Biskra. - 2016. - p. 224.

KIM H.K. An experimental study on thermal conductivity of concrete [Journal] // Cement and concrete research. - 2003. - Vol. 33. - pp. 363-371.

Kockal N.U. and Ozturan T. Effects of lightweight fly ash aggregate properties on the behavior of lightweight concretes [Journal] // Journal of Hazardous Materials. - 2010. - Vol. 179. - pp. 954-965.

Kockal N.U. and Ozturan T. Strength and elastic properties of structural lightweight concretes [Journal] // Materials and Design. - 2011. - 4 : Vol. 32. - pp. 2396-2403.

Künzel H.M. Simultaneous heat and moisture transport in building components [Journal] // Fraunhofer Institute of Building Physics. - 1995.

Kurek B. Les fibres naturelles: originalités, propriétés, qualité et défauts [Conference] // Journée technique "matériaux renforcés fibres naturelles et matériaux issus de ressources renouvelables appliqués en plasturgie". - Pôle Européen de plasturgie : Bellignat (France) : [s.n.], 2006.

LAOUD Brahim Mechanical and physical characterization of lightweight concrete based on limestone sand and cork granules [Journal] // International Journal of Innovation and Applied Studies. - 2013. - 3 : Vol. 3. - pp. 739-748.

Lelièvre and D. Simulation numérique des transferts de chaleur et d'humidité dans une paroi multicouche de bâtiment en matériaux biosourcés [Book]. - 2015.

Li X. [et al.] Accelerated carbonation of municipal solid waste incineration fly ashes [Journal] // Waste Management. - 2007. - 9 : Vol. 27. - pp. 1200-1206.

Liu N. and Chen B. Experimental study of the influence of EPS particle size on the mechanical properties of EPS lightweight concrete [Journal] // Construction and Building Materials. - 2014. - Vol. 68. - pp. 227-232.

Lo T. Y. and Cui H.Z. Spectrum analysis of the interfacial zone of lightweight aggregate concrete [Journal] // Materials letters. - 2004. - Vol. 58. - pp. 3089-3095.

Lu C.H. [et al.] The different properties of lightweight aggregates with the fly ashes of fluidized-bed and mechanical incinerators [Journal] // Construction and Building Materials. - 2015. - 1 : Vol. 101. - pp. 380-388.

Maier P.L. and Durham S.A. Beneficial use of recycled materials in concrete mixtures [Journal] // Construction and Building Materials. - 2012. - 29. - pp. 428-437.

Malhotra V.M. Matériaux complémentaires en cimentation pour le béton. - Ottawa : Centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie (CANMET), 1989.

Meftah H. and Arabi N. Les granulats recyclés humidifiés : comportements des bétons frais et durcis [Conference] // Rencontres Universitaires de Génie Civil. - Tlemcen : [s.n.], 2011. - pp. 401-410.

Méhu J., Bazin C. and Grelier-Volatie L. Classification réglementaire et écocompatibilité des déchets [Book]. - [s.l.] : Techniques de l'ingénieur, 2004.

Merechal J.C. Contribution à l'étude des propriétés thermiques et mécaniques du béton en fonction de la température [Journal] // Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics. - 1970. - Vol. 274. - pp. 122-146.

Ministère de l'écologie du développement durable et de l'énergie <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Reglementation-applicable.html> [Online]. - 2015.

Moletta R. Le traitement des déchets [Book]. - [s.l.] : Editions Tec et Doc / Lavoisier, 2009.

Morin D. Sur les betons légers et leur comportement mécanique sous des sollicitations biaxiales [Book Section] // Mémoire de thèse, Université Paul Sabatier de Toulouse. - 1976.

Motz H. and Geiseler J. Products of steel slags an opportunity to save natural resources [Journal] // waste management. - 2001. - Vol. 21. - pp. 285-293..

Müller-Rochholz J. Determination of the elastic properties of lightweight aggregate by ultrasonic pulse velocity measurement [Journal] // International journal of cement composites and lightweight concrete. - 1979. - 2 : Vol. 1. - pp. 87-90.

Mussig J. Caractérisation des fibres de chanvre [Conference] // Journée scientifique du chanvre. - Montjean sur Loire (France) : [s.n.], 1999.

NADAH Jaouad Valorisation d'une craie du nord de la France en assise de chaussée routière [Report]. - 2010. - p. 213.

Nael-Redolfi Jennifer Absorption d'eau des granulats poreux : mesure et conséquences sur la formulation des mortiers et des bétons [Report] : Mécanique des matériaux / Université Paris-Est. - 2016. - p. 138.

Nenonene A.Y. Elaboration et caractérisation mécanique de panneaux de particules de tiges de Kénaf et de bioadhésifs à base de colle d'os, de tannin ou de mucilage. - [s.l.] : Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2009. - p. 203.

Neville A. Propriétés des bétons. - [s.l.] : Eyrolles, 2000.

NF EN 12664: Performance thermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination de la résistance thermique par la méthode de la plaque chaude gardée et la méthode fluxmétrique [Rapport]. - 2001.

NF EN 933: Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats [Revue]. - [s.l.] : AFNOR, 1997.

Nguyen L.H. [et al.] Influence of the volume fraction and the nature of fine lightweight aggregates on the thermal and mechanical properties of structural concrete [Journal] // Construction and Building Materials. - 2014. - 51. - pp. 121-132.

NGUYEN Le Hung Bétons de structure à propriétés d'isolation thermique améliorées: approche expérimentale et modélisation numérique [Report] : Manuscrit de thèse de doctorat / Université de Cergy Pontoise. - 2013.

Niang F., Coulibaly A. and Cisse I.K. Modélisation numérique du comportement mécanique du béton léger de plastiques recyclés [Journal] // Journal des Sciences. - 2002. - 1. - pp. 16-24.

Oikonomou N.D. Recycled concrete aggregates [Journal] // Cement and Concrete Composites. - 2005. - 27 : Vol. 2. - pp. 315-318.

Outal Souhaïl Quantification par analyse d'images de la granulométrie des roches fragmentées : amélioration de l'extraction morphologique des surfaces, amélioration de la reconstruction stéréologique [Report] : Manuscrit de thèse de doctorat en géologie appliquée / École Nationale Supérieure des Mines de Paris. - 2006. - p. 234.

Padmini A.K., Ramamurthy K. and Mathews M.S. Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete [Journal] // Construction and Building Materials. - 2009. - 23 : Vol. 2. - pp. 829-836.

Peleg M. Assessment of a Semi-Empirical Four Parameter General Model for Sigmoid Moisture Sorption Isotherms [Journal] // Journal of Food Process Engineering . - 1930. - 1 : Vol. 16. - pp. 21 - 27.

Petkovic G. [et al.] Environmental impact from the use of recycled materials in road construction: method for decision-making in Norway [Journal] // Resources, Conservation and Recycling. - 2004. - Vol. 42. - pp. 249–264.

Peuhkuri R and Rode C. Using dynamic moisture loading tests for determination of moisture buffer value [Conference] / ed. Meeting Annex 41. - Montreal 16-18 : [s.n.], 2005.

Peuhkuri R., Rode C. and Hansen K.K. Non-isothermal moisture transport through insulation materials [Journal] // Building and Environment . - 2008. - Vol. 43 (5). - pp. 811-822.

Piot A. Thèse: Hygrothermique du bâtiment: expérimentation sur une maison à ossatures bois en conditions climatiques naturelles et modélisation numérique [Report] / INSA Lyon. - 2009. - p. 174.

Planétoscope <http://www.planetoscope.com/dechets/363-production-de-dechets-dans-le-monde.html> [Online]. - 2016.

POYET Stéphane Experimental investigation of the effect of temperature on the first desorption isotherm of concrete [Journal] // Cement and Concrete Research. - 2009. - 11 : Vol. 39. - pp. 1052-1059.

Quina M.J., Bordado J.M. and Quinta-Ferreira R.M. Recycling of air pollution control residues from municipal solid waste incineration into lightweight aggregates [Journal] // Waste Management. - 2014. - 2 : Vol. 34.

R. and Hill A self consistent mechanics of composite materials [Journal] // Journal of mechanics physics solids. - 1965. - Vol. 13. - p. 189.

Radonjanin V. [et al.] Green recycled aggregate concrete [Journal] // Construction and Building Materials. - 2013. - Vol. 47. - pp. 1503-1511.

Rahim M. [et al.] Characterization of flax lime and hemp lime concretes: Hygric properties and moisture buffer capacity [Journal] // Energy and Buildings. - 2015. - Vol. 88. - pp. 91-99.

Rahim M. Analyse et caractérisation du comportement hygrothermique de parois agrosourcées à l'échelle 1 : expérimentation et modélisation [Report] : Rapport de thèse de doctorat spécialité Génie Civil. - Amiens : Université Picardie Jules Verne , 2015. - p. 214.

Rahmouni I. [et al.] Effect of carbonated aggregates on the mechanical properties and thermal conductivity of eco-concrete [Journal] // Construction and Building Materials. - 2019. - Vol. 197. - pp. 241-250.

Reddy N. and Yang Y. Biofibers from agricultural Byproducts for industrial applications [Journal] // Trends in biotechnology. - 2005. - 1 : Vol. 23. - pp. 22-27.

RODE C. Moisture buffering of building materials [Journal] // Nordic Innovation CentreReport: BYG-DTU R-126. - [s.l.] : Report BYG•DTU R-126, 2005. - pp. 1601–2917.

Rowell R.M., Han J.S. and Rowell J.S. Characterization and Factors effecting fiber properties [Journal] // Natural polymers and agrofibers composites. - 2000. - pp. 115-134.

Ruste Jacky http://www.gn-meba.org/tutorial/tutorial_meb.htm [Online].

Sales A. [et al.] Lightweight composite concrete produced with water treatment sludge and sawdust: Thermal properties and potential application [Journal] // Construction and Building Materials. - 2010. - 24. - pp. 2446-2453.

Salmon D. Thermal conductivity of insulations using guarded hot plates, including recent developements and sources of reference materials [Journal] // Measurement Science and Technology. - 2001. - Vol. 12. - pp. 89-98.

Sarı D. and Paşamehmetoğlu A. G. The effects of gradation and admixture on the pumice lightweight aggregate concrete [Journal] // Cement and Concrete Research. - 2005. - 5 : Vol. 35. - p. 936.

Sarkar S. L., Satich C. and Leif B. Interdependence of microstructure and strength of structural lightweight aggregate concrete [Journal] // Cement and Concrete composites. - 1992. - 4 : Vol. 14. - pp. 239-248.

SHINK M. Comptabilité élastique, comportement mécanique et optimisation de bétons de granulats légers [Book]. - [s.l.] : Département de Génie Civil Faculté de sciences et de Génie Université Laval Québec, 2003.

Silva R.V., De Brito J. and Dhir R.K. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production [Journal] // Construction and Building Materials. - 2014. - pp. 201-217.

Slate F.O., Nilson A.H. and Martínez S. Mechanical properties of high strength lightweight concrete [Journal] // ACI journal. - 1986. - Vol. 88. - pp. 606-613.

Smith M. R. and Collis L. Aggregates: Sand, Gravel and rock aggregates for construction purposes [Journal] // Geological society engineering geology. - 1993. - Vol. 9. - p. 339.

Smith S.E. The Sorption of Water Vapour by High Polymers [Journal] // Journal of the American Chemical Society. - 1947. - 3 : Vol. 69. - pp. 646 - 651.

Sousa L.C. [et al.] A new lightweight masonry block : Thermal and mechanical performance [Journal] // Archives of Civil and Mechanical Engineering. - 2014. - 14. - pp. 160-169.

Swamy A.N. and Lambert G.H. The microstructure of Lytag aggregate [Journal] // International journal of cement composites and lightweight concrete. - 1981. - pp. 273-282.

Tam V.W.Y., Wang K. and Tam C.M. Assessing relationships among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis [Journal] // Journal of Hazardous Materials. - 2008. - 152. - pp. 703-714.

Tennich M., Ben Ouezdou M. and Kallel Abderrazek Effet des déchets de marbre et de carrelage sur les propriétés à l'état durci du béton autoplaçant [Conference] // Journées Nationales des Bétons JNB'15. - Hammamet Tunisia : [s.n.], 2015.

Tlijani Mohamed Contribution à la caractérisation thermo physique de matériaux bio isolants : Valorisation des déchets de bois de palmier [Report] / Université Paris-Est. - 2016.

Tossavainen M. [et al.] Characteristics of steel slag under different cooling conditions [Journal] // Waste Management. - 2007. - pp. 1335-1344.

Tran le A.D Etude des transferts hygrothermiques dans le beton de chanvre et leur application au batiment [Report] / UNIVERSITE DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE. - 2010.

Tu T. Y., Chen Y. Y. and Hwang C.L. Properties of HPC with recycled aggregates [Journal] // Cement and Concrete Research. - 2006. - Vol. 36. - pp. 943-950.

Ünal O., Uygunoğlu T. and Yildiz A. Investigation of properties of low-strength lightweight concrete for thermal insulation [Journal] // Building and Environment. - 2007. - 2 : Vol. 42. - pp. 584-590.

Van den Berg C. Development of B.E.T. Like Models for Sorption of Water of Foods; Theory and Relevance [Journal] // Properties of Water in Foods. - [s.l.] : Martinus Nijhoff Publishers, 1985. - pp. 119-135.

Vaquier A. Influence de la cinétique de remplissage et de vidange des pores des granulats légers sur les propriétés des bétons [Book]. - [s.l.] : Mémoire de thèse, Université Paul Sabatier de Toulouse, 1976.

Vimane Phoummavong M. Cours en béton armé-essais de laboratoire [Report]. - 2000. - pp. 1-146.

Vivian W.Y. Tam [et al.] New approach in measuring water absorption of recycled aggregates [Journal] // Construction and Building Materials. - 2008. - 22. - pp. 364-369.

Wilson H.S. and Malhotra V.M. Development of high strength lightweight concrete for structural applications [Journal] // International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete. - 1988. - 2 : Vol. 10. - pp. 79-90.

Wirquin E., Zaharieva R H. and Buyle-Bodin F. Utilisation de l'absorption d'eau des bétons comme critères de leur durabilité - Application aux bétons de granulats recyclés [Journal] // Materials and Structures. - 2000. - Vol. 33. - pp. 403-408.

Wongsa A. [et al.] Properties of lightweight fly ash geopolymer concrete containing bottom ash as aggregates [Journal] // Construction and Building Materials. - 2016. - Vol. 111. - pp. 637-643.

Woodside W. Analysis of errors due to edge heat loss in guarded hot plates. [Journal] // Symposium on Thermal Conductivity Measurements and Applications of Thermal Insulations

special Technical Publication published by the American Society for Testing Materials. - 1957. - 217.

Zhang MH. and Gjvorv O.E. Mechanical properties of high-strength lightweight concrete [Journal] // Materials Journal. - 1991. - 3 : Vol. 88. - pp. 240-247.

Zhu C. [et al.] Effect of Aggregate Saturation Degree on the Freeze–Thaw Resistance of High Performance Polypropylene Fiber Lightweight Aggregate concrete [Journal] // Construction and Building Materials,. - 2017. - Vol. 145. - p. 367.

Zhutovsky S., Kovler K. and Bentur A. Influence of cement paste matrix properties on the autogenous curing of high-performance concrete [Journal] // Cement and Concrete Composites. - 2004. - 5 : Vol. 26. - pp. Pages 499–507. - Pages 499–507.

Zingg Ludovic Influence de la porosité et du degré d’humidité interne sur le comportement triaxial du béton [Report] / Université de Grenoble. - 2013.

ANNEXE A

Méthode de formulation

Baron-Olivier

Cette méthode est dérivée de la méthode de Dreux-Gorisse avec des modifications pour une adaptation aux bétons actuels. Elle englobe un grand nombre de paramètres ainsi que les adjuvants et les additions minérales.

Le principe de la méthode

✓ ***Résistance ciblée***

Il existe une relation entre la résistance cible et f_{ck} : on se placera dans la démarche des essais initiaux (nouvelle formulation). Celle-ci doit au moins comporter $n=3$ séries de 3 éprouvettes. On appelle f_{ci} la moyenne arithmétique des résistances obtenues sur 3 au moins éprouvettes d'un prélèvement i .

On appelle donc f_{cm} la moyenne des f_{ci} pour n prélèvements tel que $f_{cm} = \frac{f_{c1}+f_{c2}+\dots+f_{cn}}{n}$.

Dans le cas d'un BPS, la résistance cible doit vérifier les conditions suivantes :

Tableau A-1: Conditions sur la résistance cible selon le type du béton.

BPS-BCP	BCPN
$f_c = f_{cm} \geq f_{ck} + 4$	$f_c = f_{cm} \geq f_{ck} + 12$

avec :

- BPS qui signifie Béton à Propriétés Spécifiées ;
- BCP représente Béton à Composition Prescrite ;
- BCPN pour Béton à Composition Prescrite dans une Norme.

✓ **Dosage en eau et teneur prévisible en air**

Grace au tableau A-2 on détermine la teneur en eau E et la teneur en air V et puis on effectue une correction. Si D est différent de 20 mm, Il faut corriger la valeur de E et de a par le coefficient multiplicateur du tableau A-3.

Tableau A-2 : Relation entre consistance cible, demande en eau, teneur en air selon affaissement pour D=20 mm et T=20°C.

Consistance	A (cm)		Eau E (l/m ³)	Air (a) (l/m ³)
ferme (f)	0	4	160	25
plastique (p)	5	9	190	20
Très plastique (tp)	10	15	210	15
S4	16	21	210 +adj	15
S5	< 21		210+adj	15

Tableau A-3 : Valeur du coefficient multiplicateur de correction sur E et a selon le diamètre di D est différent de 20 mm.

D(mm)	Coefficient multiplicateur
4	1.35
8	1.18
16	1.05
20	1
25	0.95
40	0.87
80	0.78

Si T est différente de 20°C, Il faut corriger les valeurs de E et de a par le coefficient multiplicateur du tableau A-4.

Tableau A-4 : Valeur du coefficient multiplicateur de correction sur E et a si T est différente de 20°C.

T (°c)	Coefficient
5	0.94
10	0.96
15	0.98
20	1
25	1.04
30	1.08
35	1.12

Si on emploie des granulats concassés, les valeurs (E et Va) sont à majorer par 10%. Si on emploie un adjuvant : plastifiant, haut réducteur d'eau :

- un réducteur d'eau plastifiant réduit la teneur d'eau moins

5	%
---	---
- un haut réducteur d'eau réduit la teneur d'eau moins

12	%
----	---

✓ **Valeurs rapports E/C pour atteindre une résistance cible**

La relation de Bolomey est utilisée pour le calcul approché de la résistance du béton à une échéance quelconque j (en jours). Elle s'écrit :

$$f_{cj} = K_b f_{mj} \left(K_v \left(\frac{C}{E} \right) - 0.5 \right) \quad (A.1)$$

avec :

- f_{cj} la résistance cible du béton à j jours (béton non adjuvanté) ;
- f_{mj} la résistance du ciment à j jours (classe vraie du ciment) ;
- K_b le coefficient dépendant des granulats et de leur arrangement granulaire ;
- K_v le coefficient dépendant de la consistance du béton ;
- C et E les masses de ciment et d'eau par mètre cube de béton.

Tableau A-5 : Valeur de K_b .

Nature pétrographique des granulats	D (mm)		
	10 16	20 25	30 40
siliceux, légèrement altérés	0.45	0.5	0.55
Siliceux, roulés	0.5	0.55	0.6
Calcaires, durs	0.55	0.6	0.65

Tableau A-6: Valeur f_{mc} du ciment.

Classe ciment	f_{mc} (MPa)
32.5	45
42.5	55
52.5	65

Tableau A-7 : Valeur de K_v .

consistance	ferme (f)	plastique (p)	T. plastique (tp)
K_v	0.87	0.9	0.93

Si nous avons un ajout minéral alors C devient L avec $L = C+kA$

et k = coefficient d'équivalence

A = masse de l'ajout minéral

✓ **Dosage en granulats**

On trace la courbe granulaire de référence tel que :

Tableau A-8: Coordonnées des point O, A et B de la courbe granulaire de référence.

	X	Y
O	63 μm	0%
A	Tamis D	100%
B	$D/2$	$50 - \sqrt{D}$ +termes correctifs

Termes constructifs de YA:

- majoration de 3% pour les granulats concassés ;
- majoration de 5% pour les bétons armés où le ferrailage $\leq 80 \text{ kg/m}^3$;
- majoration de 10% pour les bétons destinés à être pompé où les bétons armés avec un taux de ferrailage $> 80 \text{ kg/m}^3$.

Par la suite on détermine donc les proportions des granulats comme il a été expliqué dans la partie méthode de Dreux.

✓ **Volume absolue de granulats**

$$V_{\text{granulats}} = 1000 - (V_{\text{ciment}} + V_{\text{eau}} + V_{\text{air}})$$

Et donc $V_{\text{absolu, sable}} = V_{\text{granulats}} * S\%$ et $V_{\text{absolu, gravillon}} = V_{\text{granulats}} * G\%$

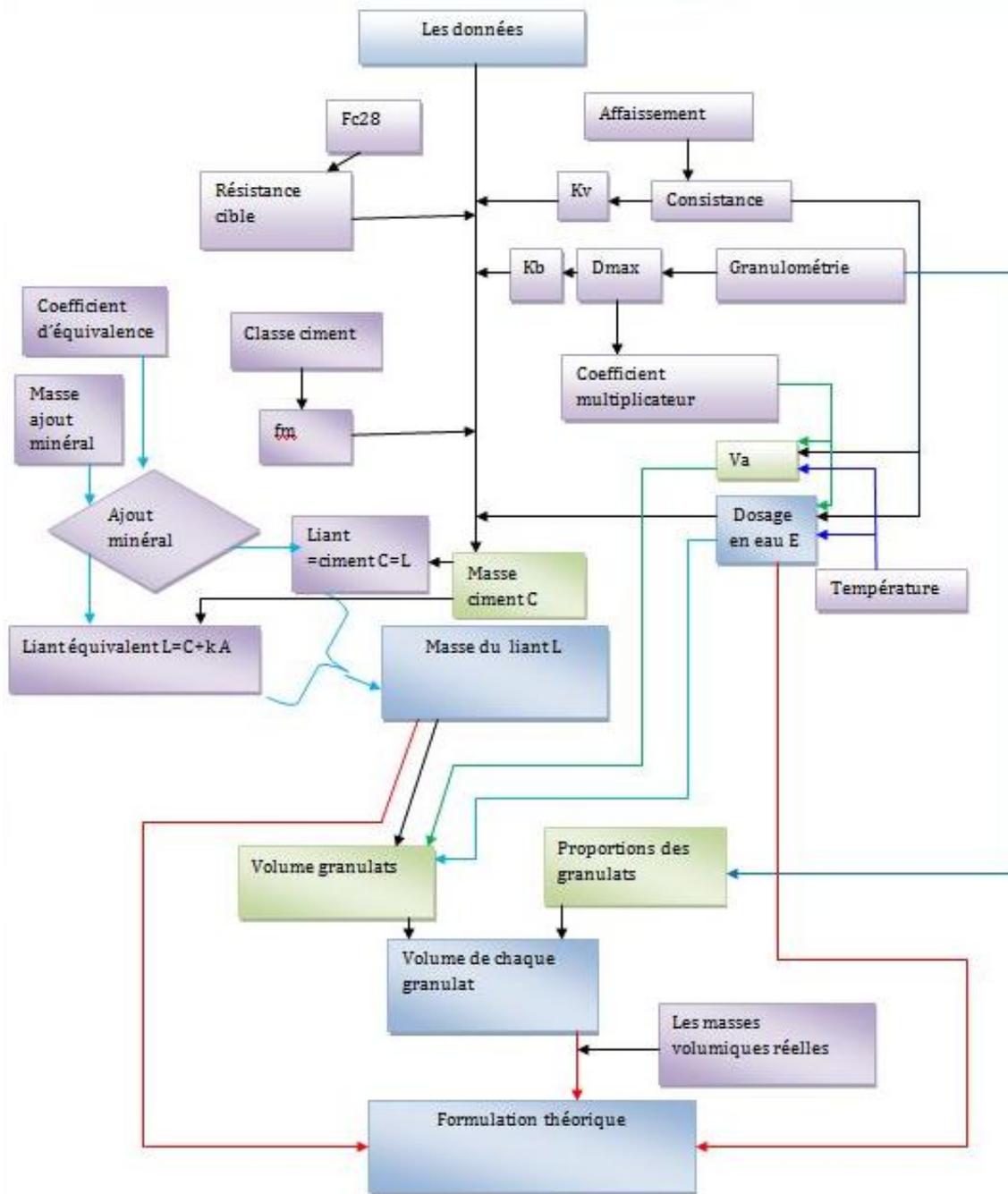


Figure A-1: Organigramme de la méthode de formulation de Baron-Olivier.

ANNEXE B

Méthode de formulation

Dreux-Gorisse

La méthode de Dreux-Gorisse, mise en œuvre en 1970, est basée sur l'optimum granulaire. Elle est couramment utilisée pour les bétons ordinaires. C'est une approche empirique selon la courbe granulométrique de référence. Selon Dreux la connaissance de la nature de l'ouvrage (le ferrailage et disposition des armatures), la résistance désirée (la résistance à la compression au bout de 28 jours) et la consistance (définie à partir de l'affaissement au cône d'Abrams) conduisent à déterminer le dosage en eau et le dosage en ciment du béton à utiliser.

Le principe de la méthode

Le dosage en ciment est basé sur la détermination du rapport $\frac{C}{E}$ en fonction de la résistance moyenne désiré f_c , on utilise pour cela une formule inspirée des études de Bolomey et qui donne :

$$f_{cm} = G f_{c28} \left(\frac{C}{E} - 0.5 \right) \quad (\text{B.1})$$

avec :

- f_{cm} la résistance moyenne en compression désirée (à 28 jours) en MPa et $f_{cm} = 1.15 f_{c28}$;
- σ_{c28} la classe vraie du ciment (à 28 jours) en MPa ;
- C le dosage en ciment (en kg/m^3) ;
- E le dosage en eau totale sur matériaux secs en litre pour 1 m^3 ;
- G le coefficient granulaire.

Tableau B-1 : Valeurs approximatives du coefficient granulaire G.

Qualité des granulats	Dimensions D des granulats		
	Fins D ≤ 16 mm	Moyens 25 ≤ D ≤ 40 mm	Gros D ≥ 63 mm
Excellente	0.55	0.60	0.65
Bonne, courante	0.45	0.50	0.55
Passable	0.35	0.40	0.45

Donc le principe consiste à déterminer la valeur de G selon le tableau B-1 pour pouvoir par la suite déterminer le rapport $\frac{C}{E} = \frac{f_{cm}}{G \sigma_{C28}} + 0.5$. Une fois la valeur trouvée, on a recours à l'abaque illustré dans la figure B-1, pour déterminer le dosage en ciment en fonction de E/C et de l'affaissement.

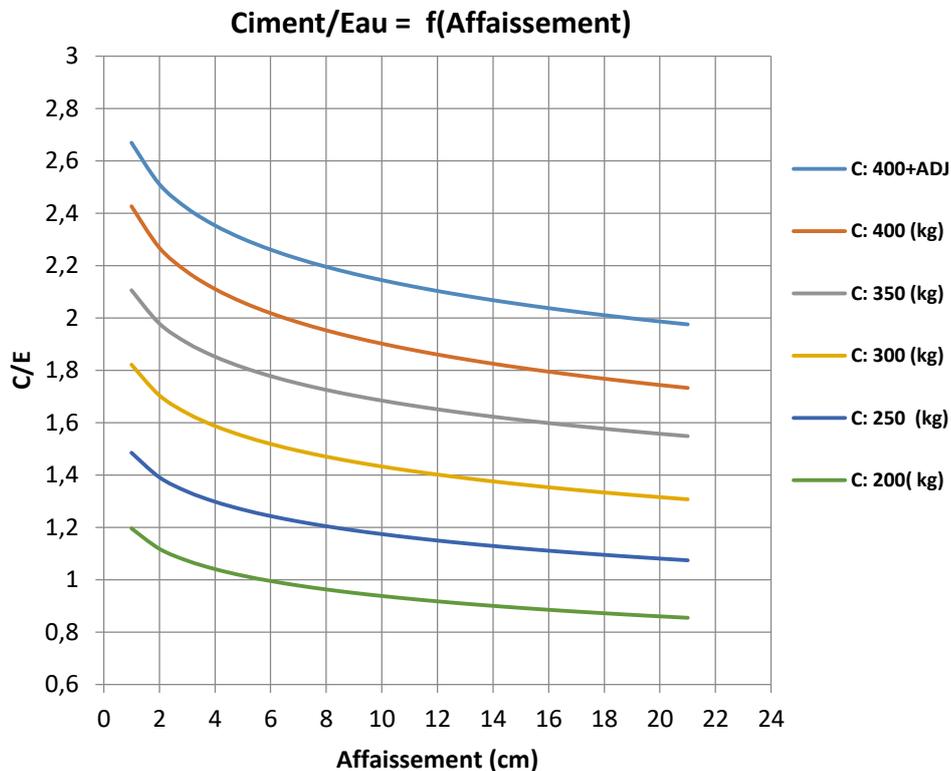


Figure B-1 : Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée.

La valeur de C doit respecter le dosage minimal qui dépend de l'agressivité du milieu et du diamètre des granulats : pour D variant de 16 à 50 mm le dosage minimal prescrit par le fascicule 65 A (cahier des clauses techniques générales) est résumé dans le tableau B-2.

Tableau B-2: Dosage minimal en ciment selon la nature du milieu pour D variant de 16 à 50 mm.

Nature du milieu	Dosage minimal	Dosage de ciment/m ³
Milieu sans agressivité particulière	$C \geq \frac{550}{\sqrt[5]{D}}$	De 315 à 250 kg/m ³
Milieu sans agressivité particulière mais comporte un parement fin	$C \geq \frac{600}{\sqrt[5]{D}}$	De 345 à 275 kg/m ³
Béton armé exposé à des conditions agressives sévères ou coulé sous l'eau ainsi qu'en béton précontraint	$C \geq \frac{700}{\sqrt[5]{D}}$	De 400 à 320 kg/m ³

La connaissance du rapport $\frac{C}{E}$ et après avoir déterminé C nous permet d'estimer le dosage en eau E. Cette valeur sera ultérieurement corrigée expérimentalement pour obtenir la plasticité désirée (affaissement A au cône d'Abrams). Toutefois, pour une appréciation un peu moins aléatoire, on fera une première correction en fonction de la dimension des granulats, pour tenir compte de leur surface spécifique, en appliquant la correction indiquée au tableau B-3 ou la figure B-2. En effet, les données précédentes sont plus particulièrement applicables aux bétons pour lesquels la dimension maximale des granulats est environ $D = 25$ mm (dimension la plus courante).

Si l'on a $D < 25$ mm la surface spécifique des granulats augmente et, à plasticité équivalente, il faudra légèrement majorer le dosage en eau, et *vice versa*.

Tableau B-3: Correction en eau en (%) selon la valeur du diamètre maximal D (mm).

D (mm)	Correction (%)
5	15
10	9
16	4
25	0
40	-4
63	-8
100	-12

correction eau (%)

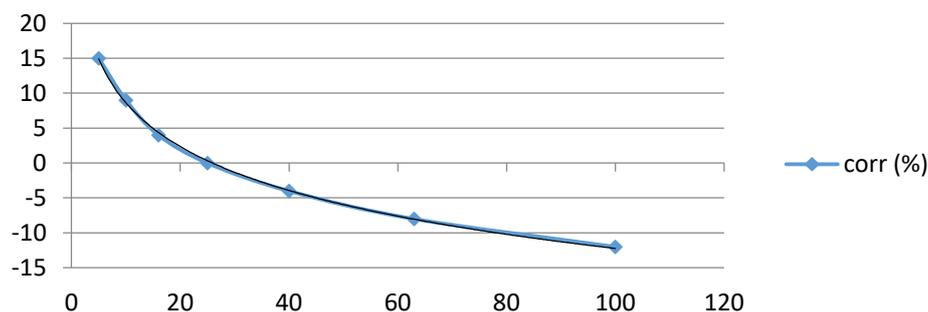
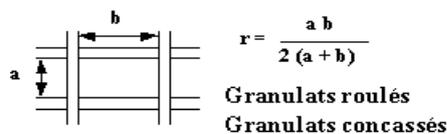


Figure B-2: Variation de la valeur de correction en eau en% en fonction du diamètre D (mm).

La quantité d'eau totale (sur matériaux supposés secs) étant ainsi approximativement déterminée, on obtiendra la quantité d'eau à ajouter sur les granulats humides en déduisant l'eau d'apport (contenue dans les granulats) ; cette appréciation est une difficulté sur le chantier et la meilleure façon de respecter le dosage en eau totale est de réaliser la plasticité prévue par l'affaissement au cône. Avant toute chose il faut vérifier que la valeur de D_{max} est bien définie comme l'indique le tableau B-4 suivant :

Tableau B-4: Condition sur D_{max} selon la caractéristique de la pièce à bétonner.

Caractéristiques de la pièce à bétonner		D_{max}
e_h	Espacement horizontal entre armatures horizontales	$\leq e_h / 1.5$
e_v	Espacement vertical entre lits d'armatures horizontales	$\leq e_v$
d	Enrobages des armatures : Ambiance très agressive ≥ 5 cm Ambiance moyennement agressive ≥ 3 cm Ambiance peu agressive ≥ 3 cm Ambiance non agressive ≥ 1 cm	$< d$
r	Rayon de ferrailage moyen :  $r = \frac{a \cdot b}{2(a + b)}$ Granulats roulés Granulats concassés	$\leq 1.4 r$ $\leq 1.2 r$
h_m	Hauteur ou épaisseur minimale	$\leq h_m / 5$

La méthode consiste tout d'abord à déterminer la courbe granulométrique de référence, c'est-à-dire qu'une courbe qui sera représentée par 3 points :

- ✓ Le point O (0.08 ; 0) ;
- ✓ Le point B (D ; 100) ;
- ✓ Le point A (X ; Y).

Tel que :

$$X = \begin{cases} D/2 & \text{si } D \leq 20 ; \\ \text{Au milieu du segment } \textit{graviers} & \text{(se trouve sur l'abscisse, de 5 mm à } D \text{) sinon.} \end{cases}$$

$$Y = 50 - \sqrt{D} + K + K_s + K_p \text{ avec :}$$

- K coefficient à choisir dans le tableau ;
- $K_s = 6 M_f - 15$ avec M_f représente le module de finesse du sable ;
- K_p coefficient de pompabilité pour le cas où le béton doit être de qualité *pompable*; on peut prendre en général $K_p = +5$ à $+10\%$.

Dans le cas de gros bétons, lorsque, le risque de ségrégation augmente et il est donc conseillé de charger un peu plus en sable pour diminuer cet inconvénient. Cela peut se faire en remontant un peu le point de brisure, en ajoutant à la valeur de Y la correction $(D - 25)/5$ en pour-cent, D étant exprimé en millimètres.

Tableau B-5 : Valeur du coefficient K selon la valeur de C, du type de vibration et la nature des granulats.

Vibration	faible		normale		Puissante	
	Roulés	Concassés	Roulés	concassés	Roulés	concassés
Dosage 400+supp	-2	0	-4	-2	-6	-4
Dosage 400	0	2	-2	0	-4	-2
Dosage 350	2	4	0	2	-2	0
Dosage 300	4	6	2	4	0	2
Dosage 250	6	8	4	6	2	4
Dosage 200	8	10	6	8	4	6

Le pourcentage du sable dans la composition résulte de l'intersection entre la courbe granulométrique de référence et la droite dite ligne de partage qui relie les deux points suivant :

- Point d'intersection entre la droite $Y=95\%$ et la courbe granulométrique du sable
- Point d'intersection entre la droite $Y=5\%$ et la courbe granulométrique du gravier I

Pour déterminer le pourcentage du gravier :

- ✓ Cas 1 : formulation contenant un sable et un gravier

% gravier I = 100 - % sable

- ✓ Cas 2 : formulation qui contient un sable, un gravier I et un gravier II

Le pourcentage du gravier I dans la composition résulte de l'intersection entre la courbe granulométrique de référence et la droite qui relie les deux points suivant :

- Point d'intersection entre la droite $Y=95\%$ et la courbe granulométrique du gravier I
- Point d'intersection entre la droite $Y=5\%$ et la courbe granulométrique du gravier II

Et pour le % gravier II dans ce cas est % gravier II = 100 - % sable - % gravier I

- ✓ Il va de même si nous avons plusieurs graviers.

Pour déterminer les masses des granulats, il convient alors de faire appel à la notion de coefficient de compacité du béton. On définit celui-ci comme le rapport entre la somme des volumes absolus des constituants solides (granulats et ciment) et le volume de béton correspondant en œuvre que l'on prend ici égal à 1000 litres.

On a donc :

$$\gamma = \frac{Vg + Vc}{100} \quad (B.2)$$

Avec Vg et Vc (en litres) volumes absolus des granulats d'une part et du ciment d'autre part dans un mètre cube de béton en œuvre.

La connaissance du dosage en ciment C déjà fixé permet le calcul de Vc . Le choix de la valeur de γ dans le tableau 14 permet de calculer le volume absolu Vg de l'ensemble des granulats : la connaissance du pourcentage de chacun d'eux permet alors de calculer leurs volumes absolus respectifs en litres pour un mètre cube de béton en œuvre.

Tableau B-6: Valeur du coefficient de compacité γ .

Consistance	Serrage	$D_{max}=5$	$D_{max}=10$	$D_{max}=12,5$	$D_{max}=20$	$D_{max}=31,5$
Molle	Piquage	0.75	0.78	0.795	0.805	0.81
	Vibration faible	0.755	0.785	0.8	0.81	0.815
	Vibration normale	0.76	0.79	0.805	0.815	0.82
Plastique	Piquage	0.76	0.79	0.805	0.815	0.82
	Vibration faible	0.765	0.795	0.81	0.82	0.825
	Vibration normale	0.77	0.8	0.815	0.825	0.83
	Vibration puissante	0.775	0.805	0.82	0.83	0.835
Ferme	Vibration faible	0.775	0.805	0.82	0.83	0.835
	Vibration normale	0.78	0.81	0.825	0.835	0.84
	Vibration puissante	0.785	0.815	0.83	0.84	0.845

Connaissant les différents pourcentages des granulats nous pouvons déterminer le volume et la masse de chaque composant.

✓ **Composition en volume**

➤ Calcul du volume du ciment V_C :

$$\begin{cases} V_C = \frac{C}{\rho_C} \text{ avec } C \text{ le dosage du ciment (en kg)} \\ \rho_C = \text{masse volumique réelle du ciment (en kg/m}^3) \end{cases}$$

➤ Détermination du volume des granulats V_{gran} :

$$V_{gran} = 1000 \cdot \gamma - V_C$$

➤ Détermination du volume de chaque granulat

Volume du sable : $VS = \%S \cdot V_{gran}$

Volume du gravier G_1 : $VG_1 = \%G_1 \cdot V_{gran}$

Volume du gravier G_2 : $VG_2 = \%G_2 \cdot V_{gran}$

➤ Vérification

Il faut que : $V_C + VS + VG_1 + VG_2 + V_{eau} = 1000l$

Car $1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ litres}$ si cette condition n'est pas vérifiée alors une correction s'impose.

✓ **Composition en masse**

Masse du sable (S) : $S = VS \times \rho_s(S)$

Masse du gravier (G_1) : $G_1 = VG_1 \times \rho_s(G_1)$

Masse du gravier (G_2) : $G_2 = VG_2 \times \rho_s(G_2)$

Il faut vérifier que

$$2000 \text{ kg/m}^3 \leq M_{\text{totale}} \leq 2600 \text{ kg/m}^3$$

Sinon une correction s'impose.

La formulation théorique de béton recherchée est définie par les quantités d'eau E, de sable S, de gravillon g et de gravier G. La masse totale d'un mètre cube de béton $\Delta_0 = (E+C+S+g+G)$ est pour un béton courant comprise entre 2 t/m^3 et 2.6 t/m^3 . La formulation obtenue reste théorique et il convient de la tester et de la corriger par des essais de laboratoire avant d'être utilisée.

Des corrections seront apportées avant fabrication pour prendre en considération la teneur en eau éventuelle des granulats et après une série de tests effectués en laboratoire pour ajuster les dosages en eau, granulats et ciment.

La composition théorique de béton est établie pour des matériaux secs. Il est impératif avant confection du béton de prendre en considération l'eau contenue dans les granulats. Une mesure de teneur en eau doit être par conséquent effectuée ($w = \text{Masse d'eau} / \text{Masse sèche}$). A défaut de toutes mesures précises on peut apprécier l'humidité des granulats grâce aux valeurs données dans le tableau B-7.

Tableau B-7: Quantité d'eau en litre contenue dans 1 m³ de matériau granulaire en fonction de son degré apparent d'humidité.

Degré apparent d'humidité	Eau d'apport en Litre / m ³ de matériau			
	Sable 0 / 5	Gravillon 5 / 12.5	Gravier 5 / 20	Gravier 16 / 31.5
Apparence sèche	0 à 20	négligeable	négligeable	Négligeable
Apparence humide	40 à 60	20 à 40	10 à 30	10 à 20
Apparence très humide	80 à 100	40 à 60	30 à 50	20 à 40
Apparence saturée, égouttée	120 à 140	60 à 80	50 à 70	40 à 60

Les corrections à apporter après essais en laboratoire seront effectuées sur chaque matériau utilisé. La quantité d'eau sera ajustée grâce à la valeur obtenue lors de la mesure de l'affaissement au cône, les quantités de granulats grâce à la mesure de la masse volumique réelle du béton, et la quantité de ciment après essais sur béton durci. Les trois corrections se feront indépendamment les unes des autres.

- Correction sur la quantité de granulats

L'objectif de cette correction est de vérifier que la quantité de matériau utilisé aboutit bien à la formulation d'un mètre cube de béton et que par conséquent il n'y a ni sur dosage ou sous dosage de ciment. Lorsque la masse volumique apparente réelle du béton (Δ) est différente de la masse volumique apparente théorique (Δ_0) de la formulation, il convient d'effectuer une correction sur les quantités de granulats : $\Delta m = (\Delta - \Delta_0)$. Si Δm est négatif la formulation réalisée aboutit à la confection de plus d'un m³ de béton (des granulats doivent être enlevés). Si Δm est positif la formulation réalisée aboutit à moins d'un m³ de béton (des granulats doivent être rajoutés). Cette correction s'effectue sur tous les granulats au prorata des pourcentages en volume absolu des granulats :

$$S_{\text{corrigé}} = S + \Delta m \text{ S } \%$$

$$g_{\text{corrigé}} = g + \Delta m \text{ g } \%$$

$$G_{\text{corrigé}} = G + \Delta m \text{ G } \%$$

- *Correction sur la quantité de ciment*

Lorsque la résistance obtenue à 28 jours ($s'_{28 \text{ réelle}}$) diffère de la résistance souhaitée (s'_{28}) il convient d'apporter une correction sur le dosage de ciment ($C_{\text{corrigé}}$). Si $C_{\text{réel}}$ et $E_{\text{réelle}}$ sont les dosages initiaux en ciment et en eau effectivement utilisés pour la confection du béton, il est possible d'écrire en fonction des résultats obtenus ou des résultats souhaités deux équations résultant de la formulation de Bolomey :

$$\text{Résultats obtenus : } s'_{28 \text{ réelle}} = G s'_c (C_{\text{réel}}/E_{\text{réelle}} - 0.5)$$

$$\text{Résultats souhaités : } s'_{28} = G s'_c (C_{\text{corrigé}}/E_{\text{réelle}} - 0.5)$$

En combinant les équations précédentes on obtient :

$$s'_{28} / s'_{28 \text{ réelle}} = (C_{\text{corrigé}}/E_{\text{réelle}} - 0.5) / (C_{\text{réel}}/E_{\text{réelle}} - 0.5) \text{ d'où la détermination de } C_{\text{corrigé}}.$$

L'augmentation ou la diminution de la quantité de ciment ΔC conduit à une augmentation ou à une diminution de la quantité de fines. Il convient pour conserver la maniabilité du béton de compenser l'augmentation ou la diminution de volume absolu du ciment ΔV_c par une diminution ou une augmentation du volume absolu de sable ΔV_s (considéré comme des éléments fins). D'où une ultime correction sur le dosage en sable $S_{\text{corrigé}} = S + \Delta S$ avec :

$$\Delta C = (C_{\text{corrigé}} - C_{\text{réel}})$$

$$\Delta V_c = (C_{\text{corrigé}} - C_{\text{réel}}) / r_{s(c)}$$

$$\Delta V_s = -\Delta V_c = -(C_{\text{corrigé}} - C_{\text{réel}}) / r_{s(c)}$$

$$\Delta S = -(C_{\text{corrigé}} - C_{\text{réel}}) r_{s(s)} / r_{s(c)} = -\Delta C r_{s(s)} / r_{s(c)}$$

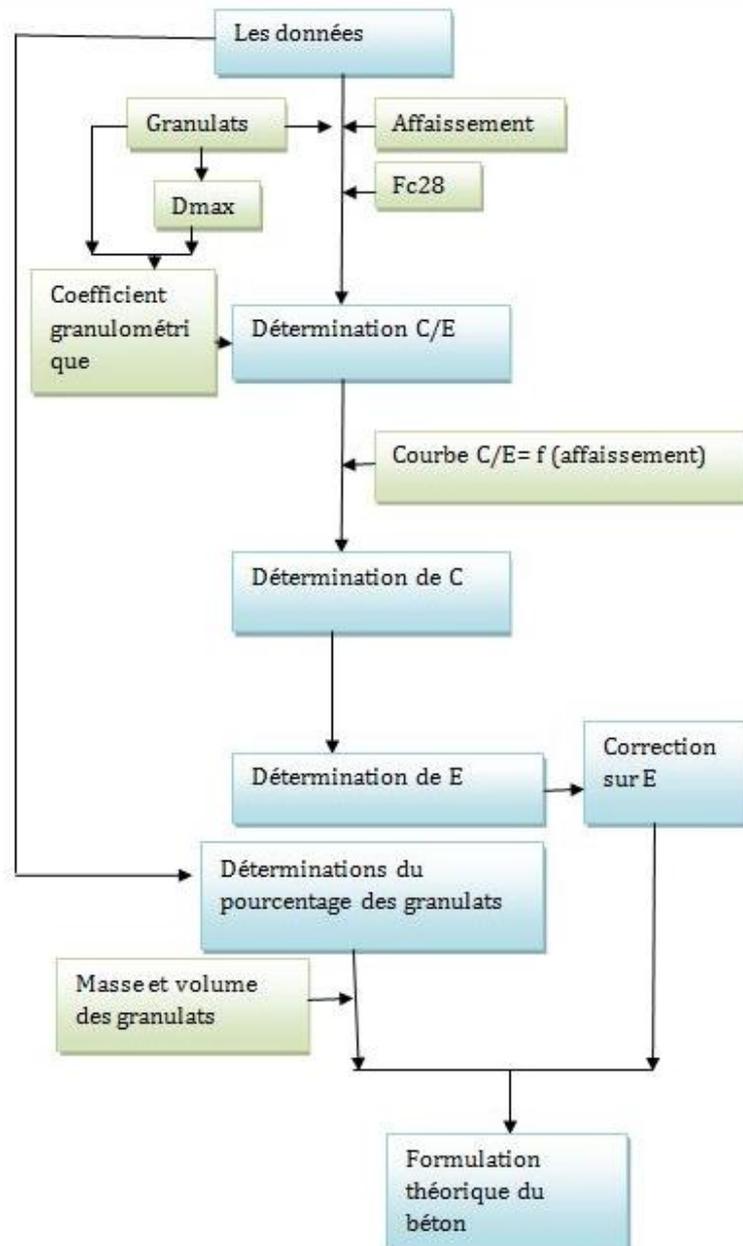


Figure B-3: Organigramme de la méthode de formulation de Dreux-Gorisse.

ANNEXE C

Méthodologie de formulation

Approche adaptée au béton de granulats carbonatés

De nos jours, l'utilisation des matériaux recyclés renforce le besoin de définir une méthode de formulation des bétons plus adéquate à leurs performances physiques, mécaniques et thermiques. Nous proposons donc l'utilisation d'une méthodologie de formulation basée sur les approches de Dreux-Gorisse et de Baron-Olivier afin de déterminer les proportions de chaque constituant du béton, en prenant en considération les spécificités des granulats carbonatés. Enfin, une approche empirique permettra de prédire, avec plus ou moins de précision, les performances physiques, mécaniques et thermiques des bétons de granulats carbonatés ainsi mis en œuvre.

Le principe de la méthode

Les bétons de granulats carbonatés font partie des nouveaux bétons écologiques, produits à partir des cendres d'incinérateurs et du CO₂, qui ont des propriétés intéressantes (thermiques, hygriques et mécaniques). La démarche de formulation est plutôt expérimentale. La formulation du mélange consiste à choisir les proportions de chaque constituant le composant de façon à ce que le béton atteigne les propriétés attendues notamment en termes de consistance à l'état frais et de résistances mécaniques à l'état durci. D'autres propriétés peuvent être ciblées (module d'élasticité, conductivité thermique...). L'étude de formulation d'un béton consiste à choisir une composition optimale des granulats utilisés ainsi que du ciment et l'eau afin de réaliser un béton aux performances recherchées.

Les granulats utilisés dans notre étude sont de classes granulaires 0/16 et 0/20. La méthode de formulation proposée est basée sur la méthode de Dreux-Gorisse. C'est une approche

empirique qui se base sur la courbe granulométrique des matériaux. La résistance et la consistance désirées sont fixées afin de déterminer les dosages optimaux des bétons.

La méthode de formulation proposée comporte trois phases :

- L'obtention du rapport C/E à partir de la résistance ;
- la détermination de la quantité C+E et la compacité du squelette granulaire maximum à partir de la consistance souhaitée ;
- le bilan des quantités de chacun des constituants (masses de C, E, S, G) et masse volumique théorique du béton.

Le dosage en ciment est basé sur la détermination du rapport $\frac{C}{E}$ en fonction de la résistance mécanique désirée f_{cm} . Pour cela, on utilise la formule proposée Bolomey :

$$f_{cm} = G f_{C28} \left(\frac{C}{E} - 0.5 \right) \quad (C.1)$$

avec G le coefficient granulaire qui dépend de la qualité et des dimensions des granulats (tableau C-1)

Tableau C-1: Valeurs approximatives du coefficient granulaire G.

Qualité des granulats	Dimensions D des granulats		
	Fins $D \leq 16 \text{ mm}$	Moyens $25 \leq D \leq 40 \text{ mm}$	Gros $D \geq 63 \text{ mm}$
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne, courante	0,45	0,50	0,55
Passable	0,35	0,40	0,45

Une fois le rapport C/E déterminé et l'affaissement souhaité fixé, le dosage du ciment est par la suite déterminé à partir du graphe sur la figure C-1.

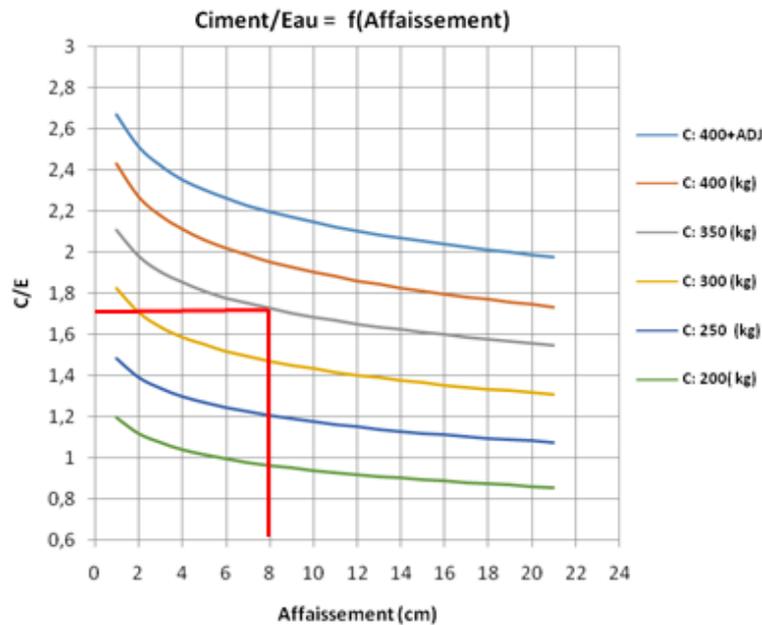


Figure C-1: Abaque pour déterminer le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée.

Après avoir déterminé le dosage en ciment C et connaissant le rapport C/E, le dosage en eau peut être déterminé. Afin d'avoir la consistance désirée, cette valeur peut par la suite être corrigé expérimentalement. Selon Dreux-Gorisse, des premières corrections sont à prévoir selon la dimension maximale des grains.

Tableau C-2: Correction en eau en (%) selon la valeur du diamètre maximal D (mm).

D (mm)	Correction (%)
5	15
10	9
16	4
25	0
40	-4
63	-8
100	-12

La quantité d'eau totale à ajouter sur les granulats secs, relative à l'hydratation du ciment, étant ainsi déterminée. A cette quantité d'eau est ajoutée la quantité d'eau relative à l'absorption des granulats légers. Cette quantité est préalablement déterminée par l'essai d'absorption d'eau réalisé sur les granulats. L'eau efficace est calculée en tenant compte de l'eau du mélange et de celle absorbée par les granulats.

$$E_{eff} = E + E_{abs} \quad (C.2)$$

Afin de déterminer le dosage des granulats, pour une formulation de béton contenant un seul granulat, on a recours aux courbes d'analyse granulométrique. La courbe granulaire de référence OAB est tracée. Elle est caractérisée par trois points :

- ✓ Le point O (0.08 ; 0) ;
- ✓ Le point B (D ; 100) ;
- ✓ Le point A (X ; Y).

tel que :

- $X = \begin{cases} D/2 & \text{si } D \leq 20 ; \\ \text{Au milieu du segment graviers (se trouve sur l'abscisse, de 5 mm à D)} & \text{sinon.} \end{cases}$
- $Y = 50 - \sqrt{D} + K + K_s + K_p$

où :

- K est le terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité, de serrage, de la forme des granulats (tableau C-3) ;
- $K_s = 6 M_f - 15$ avec M_f qui représente le module de finesse du sable ;
- K_p est un coefficient de pompabilité pour le cas où le béton doit être de qualité pompable ; on peut prendre en général $K_p = +5$ à $+10$ %.

Tableau C-3 : Valeur du coefficient K selon la valeur de C, du type de vibration et la nature des granulats.

Vibration dosage en ciment (kg/m ³)	faible		normale		Puissante	
	Roulés	Concassés	Roulés	concassés	Roulés	concassés
Dosage 400+supp	-2	0	-4	-2	-6	-4
Dosage 400	0	2	-2	0	-4	-2
Dosage 350	2	4	0	2	-2	0
Dosage 300	4	6	2	4	0	2
Dosage 250	6	8	4	6	2	4
Dosage 200	8	10	6	8	4	6

Le pourcentage du sable dans la composition résulte de l'intersection entre la courbe granulométrique de référence et la droite dite ligne de partage qui relie les deux points suivant :

- Point d'intersection entre la droite $Y=95\%$ et la courbe granulométrique du sable
- Point d'intersection entre la droite $Y=5\%$ et la courbe granulométrique du gravier

Pour déterminer le pourcentage du gravier : % gravier = 100 - % sable

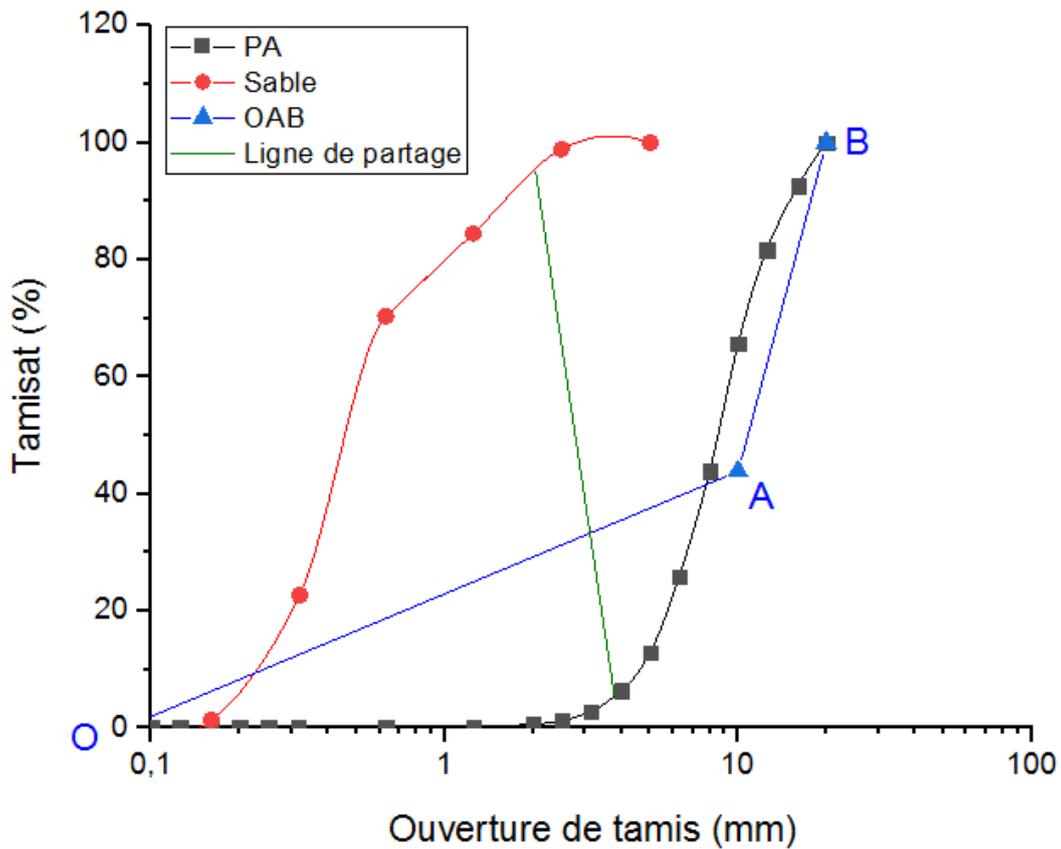


Figure C-2 : Composition granulaire type d'un béton étudié.

Afin de déterminer les masses des granulats, on fait appel à la compacité du béton. On le définit comme étant le rapport entre la somme des volumes absolus des constituants solides (granulats et ciment) et le volume de béton (1 m³) :

$$\gamma = \frac{V_g + V_c}{1000} \quad (C.3)$$

avec V_g et V_c les volumes absolus des granulats et du ciment dans un mètre cube de béton.

V_c peut ainsi être calculée connaissant le dosage du ciment de γ qui est choisi dans le tableau C-4 ce qui nous permet de calculer le volume absolu V_g des granulats.

*

Tableau C-4: valeur du coefficient de compacité γ .

Consistance	Serrage	$D_{max}= 5$	$D_{max}= 10$	$D_{max}=12,5$	$D_{max}= 20$	$D_{max}=31,5$
Molle	Piquage	0.75	0.78	0.795	0.805	0.81
	Vibration faible	0.755	0.785	0.8	0.81	0.815
	Vibration normale	0.76	0.79	0.805	0.815	0.82
Plastique	Piquage	0.76	0.79	0.805	0.815	0.82
	Vibration faible	0.765	0.795	0.81	0.82	0.825
	Vibration normale	0.77	0.8	0.815	0.825	0.83
	Vibration puissante	0.775	0.805	0.82	0.83	0.835
Ferme	Vibration faible	0.775	0.805	0.82	0.83	0.835
	Vibration normale	0.78	0.81	0.825	0.835	0.84
	Vibration puissante	0.785	0.815	0.83	0.84	0.845

Les différents pourcentages des granulats étant connus, le volume et la masse de chaque constituant peut être déterminés. La composition en volume des composants se fait comme suit :

- $V_{\text{Ciment}} = \frac{C}{\rho_C}$
- $V_{\text{granulats}} = 1000 \gamma - V_{\text{Ciment}}$
- Volume du sable : $V_{\text{Sable}} = \%S V_{\text{granulats}}$
- Volume du gravier G : $V_{\text{Gravier}} = \%G V_{\text{granulats}}$

Il faut vérifier que : $V_{\text{Ciment}} + V_{\text{Sable}} + V_{\text{Gravier}} + V_{\text{eau}} = 1000 \text{ l}$

Nous pouvons exprimer la composition en masse :

- $S = V_{\text{Sable}} \rho_s(\text{Sable})$
- $G = V_{\text{Gravier}} \rho_s(\text{Gravier})$

Dans le but d'optimiser la formulation, nous faisons varier les pourcentages massiques des éco-granulats et des granulats ordinaires. La méthode de Dreux ne permet pas de choisir le pourcentage de substitution. Elle permet juste, dans le cas d'utilisation de plusieurs granulats, de déterminer les pourcentages en fonction de leurs distributions granulométriques. Nous proposons donc une substitution granulaire (P) connaissant le volume des graviers V_{Gravier} (voir figure C-3) selon l'équation.

$$V_{\text{Gravier } 1} = P V_{\text{Gravier}} \quad (\text{C.4})$$

$$V_{Gravier\ 2} = (1 - P)V_{Gravier} \quad (C.5)$$

Afin d'exprimer ces valeurs en masses, il suffit d'introduire la masse volumique des constituants.

$$M_{Gravier\ 1} = V_{Gravier1} \rho_{s,Gravier1} \quad (C.6)$$

$$M_{Gravier\ 2} = V_{Gravier2} \rho_{s,Gravier2} \quad (C.7)$$

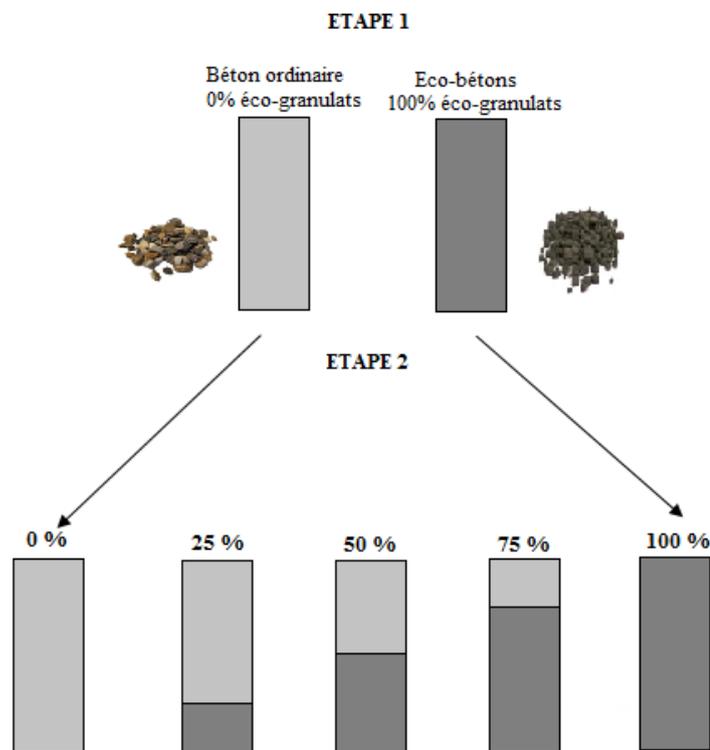


Figure C-3: Méthode de substitution des granulats dans le béton.

Approche empirique de prédiction des performances

La nature des granulats influence sur les performances mécaniques des bétons. Cela dépend de l'absorption d'eau des granulats et de leur porosité. Afin d'optimiser la formulation et pour un rapport propriétés mécaniques/densité optimale, il est judicieux d'utiliser des granulats plus légers. Contrairement aux granulats naturels, les granulats carbonatés (ou légers) ont des porosités élevées et ils absorbent des quantités importantes d'eau.

La matrice est composée de liant (ciment), sable, granulats carbonatés et/ou granulats ordinaires et l'eau. Puisque les granulats carbonatés représentent environ 50% du volume total du béton, il est prévu que les propriétés des bétons à base de ces granulats dépendent essentiellement des propriétés physiques et mécaniques des granulats.

Afin de promouvoir l'utilisation des granulats carbonatés pour la production des bétons écologiques, nous visons à proposer une méthode de formulation adéquate de ces bétons tenant en compte les caractéristiques des granulats. Cette méthode se base sur les résultats trouvés lors de notre campagne expérimentale afin de proposer une alternative de formulation à partir des propriétés des bétons souhaitées.

Bien qu'il s'agisse d'une méthodologie de formulation, elle repose sur un nombre important de résultats expérimentaux destinés à faire ressortir des corrélations entre les propriétés des granulats et celles des bétons. Les résultats des essais, rapportés sur les figures et analysés dans les chapitres précédents, sont la base du modèle de formulation proposé.

La prise en compte de l'effet des propriétés physiques des granulats carbonatés (absorption d'eau, porosité, écrasement en vrac etc....) sur la résistance en compression des bétons constitue le point le plus important de cette méthodologie.

La méthodologie repose sur la corrélation entre la résistance mécanique et le pourcentage des granulats dans le mélange et leurs masses volumiques.

Les masses volumiques des granulats composant le squelette granulaire peuvent être déterminées à partir des pourcentages de substitution des granulats de l'équation suivante :

$$\rho_{s,pc}^* = P \times \rho_{car} + (1 - P) \times \rho_{ord} \quad (C.8)$$

avec P le pourcentage de substitution des granulats ordinaires de masse volumique ρ_{ord} par des granulats carbonatés de masse volumique ρ_{car} .

A partir des masses volumiques des granulats, nous pouvons prédire les masses volumiques des bétons. Il existe une corrélation simple reliant les propriétés physiques des granulats aux propriétés des bétons.

Une relation linéaire s'établit aussi entre la masse volumique des granulats et la masse volumique des bétons (figure C-4) et elle sera exprimée selon l'équation.

$$\rho_{bs} = 1445 + 0.3 \rho_{s,pc}^* \quad (C.9)$$

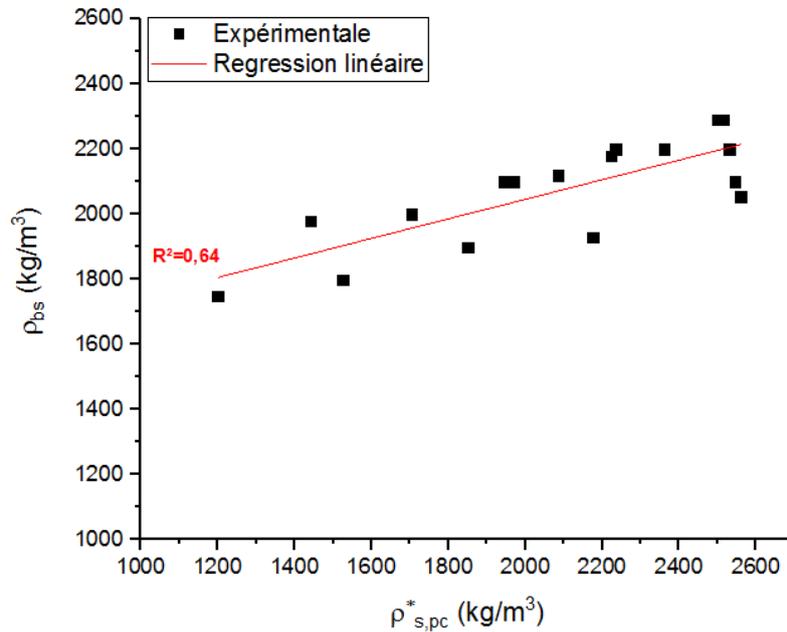


Figure C-4 : Masse volumique du béton en fonction de la masse volumique des granulats dans la squelette granulaire.

En connaissant la masse volumique des bétons, nous pouvons prédire la résistance en compression des bétons. La figure C-5 présente les résistances à la compression en fonction des masses volumiques des bétons à un rapport E/C constant.

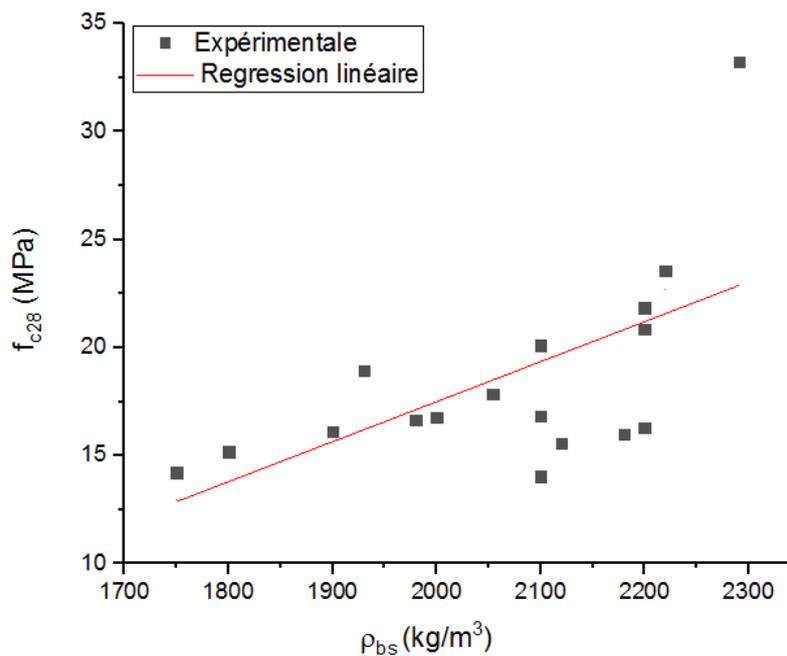


Figure C-5: Résistance à l'écrasement en fonction des masses volumiques des bétons.

Nous proposons donc l'utilisation d'une approche empirique de prédiction selon l'équation suivante :

$$f_{c28} = 18(\rho_{bs} - 1.03) \quad (C.10)$$

avec ρ_{bs} la densité du béton après séchage, défini par l'équation C.9.

En revanche, notre approche n'est pas adaptée aux formulations traditionnelles, comme on peut le voir avec la résistance en compression du béton dont la masse volumique est de 2300 kg/m³.

En ayant prédit la résistance en compression, nous pouvons déterminer le module d'Young par la formule empirique suivante :

$$E_c = 17540 \left(\frac{f_{c28}}{10} \right)^{0.6684} \quad (C.11)$$

Les propriétés thermiques aussi peuvent être prédites en fonction de la masse volumique des bétons et celle des granulats. L'équation suivante permet de prédire la conductivité thermique du béton λ_b :

$$\lambda_b = \delta^* \times (0.18 \times \rho_b + 0.79) \quad (C.12)$$

avec $\delta^* = \frac{\rho_b}{\rho_{s,pc}^*}$

En suivant la même démarche, une approche empirique permettrait de prédire la capacité thermique massique des bétons de granulats carbonatés. Nous proposons une approche basée sur l'inverse de la densité du béton ρ_{bs} . Ainsi, l'expression suivante permet de déterminer, relativement précisément, la chaleur massique spécifique d'un béton de granulats carbonatés :

$$C_p = \delta^* \times \left(3500 \times \frac{1}{\rho_{bs}} + 3600 \right) \quad (C.13)$$

Ainsi, ayant prédit la conductivité thermique et la chaleur spécifique, il est donc possible de définir la diffusivité thermique ainsi que l'effusivité thermique grâce aux propriétés physiques des granulats carbonatés.

RESUME

Ce travail de recherche s'intéresse aux matériaux écologiques qui représentent une solution *sine qua non* aux objectifs affichés par les politiques mondiales en terme de développement durable. L'élimination des déchets ainsi que la ré-utilisation du CO₂ est un enjeu important de nos jours. Les matériaux de notre projet sont produits à partir de déchets et de sous-produits industriels de centres d'incinération et du CO₂, ce qui présente une solution pour préserver les ressources naturelles et réduire les émissions de CO₂. Ce manuscrit de thèse a pour objectif l'étude des propriétés mécaniques, thermiques et hygriques des bétons de granulats carbonatés obtenus par carbonatation accélérée des cendres d'incinérateurs. Ces matériaux possèdent des porosités importantes ce qui leurs donnent l'aspect léger et leurs offrent des propriétés thermiques et hygriques importantes. Les travaux présentés dans ce manuscrit portent sur l'utilisation de 3 types de granulats carbonatés (produits à partir de déchets de REFIOM, papier et Biomasse) ainsi que 2 types de granulats couramment utilisés de l'argile expansée et un gravier ordinaire utilisés comme granulats de référence. Une large campagne expérimentale a été réalisée, des bétons ont été confectionnés en substituant partiellement ou totalement les granulats ordinaires par des granulats écologiques dans les proportions suivantes 25%, 50%, 75% et 100%. Ces bétons confectionnés ont été par la suite comparés aux bétons de référence. Nous avons déterminé les principales caractéristiques et analysés le comportement de ces bétons. Ces données nous aideront à étudier l'influence des différents paramètres par exemple la nature de granulats et leurs pourcentages dans la matrice sur le comportement des bétons carbonatés. Les résultats expérimentaux ont été confrontés aux résultats théoriques déterminés par modélisation analytique afin de déterminer les modules d'élasticité ainsi que la conductivité thermique des bétons étudiés. Les prédictions des propriétés des bétons sont en bon accord avec les résultats expérimentaux.

Mots clés : *Granulats carbonatés, déchets d'incinérateurs, propriétés mécaniques, caractérisation thermohygrique, modélisation analytique*

ABSTRACT

This research work focuses on ecological materials that represent a solution for sustainable development. Nowadays, the elimination of waste and the reuse of CO₂ is an important issue. The materials used in our project has been produced from industrial waste or by-products and CO₂, which offers a solution to preserve natural resources and reduce CO₂ emissions. This thesis aims to study mechanical, thermal and hygric properties of carbonated aggregates' concretes obtained by accelerated carbonation of incinerator ash. These materials have significant porosities that classify them as lightweight aggregates and offer interesting thermal and hygric properties. This work concerns the use of three types of carbonated aggregates (produced from APCr waste, paper ash and biomass ash) as well as two types of commonly used aggregates of expanded clay and ordinary aggregates used as control aggregates. A large experimental campaign was carried out; concretes were made by substituting partially or totally ordinary aggregates with ecological ones by 25%, 50%, 75% and 100%. These manufactured concretes have been subsequently compared to the control concretes. We have determined the main characteristics and analyzed the behavior of these concretes. These results will help us to study the influence of the different parameters such as aggregates' type as well as their percentages in the matrix on the behavior of carbonated concretes. The experimental results have been compared to the theoretical results determined by analytical modeling in order to determine the mechanical properties and thermal conductivity of the studied concretes. The predictions of concrete's properties are in good accordance with the experimental results.

Key words: *Carbonated aggregates, incinerator waste, mechanical properties, thermo-hygric characterization, analytical modeling.*