

THESE

En vue de l'obtention du : **DOCTORAT**

Centre de Recherche : Centre de recherche en Énergie

Structure de Recherche : Équipe de Thermodynamique et Énergétique

Discipline : Physique

Spécialité : Mécanique et Énergétique

Présentée et soutenue le 10/03/2021 par :

Sara BELAROUF

Contribution à L'étude Expérimentale et la Modélisation Numérique des Bétons à Granulats Recyclés de Démolition pour les Bâtiments : Caractérisation des Propriétés Mécaniques, Thermophysiques et Analyses Chimiques-Minéralogiques.

JURY

Mohamed TABYAOUI	PES	Faculté des Sciences, Université Mohammed V, Rabat	Président
Abderrahim SAMAOUALI	PES	Faculté des Sciences, Université Mohammed V, Rabat	Directeur de Thèse
Rachid TADILI	PES	Faculté des Sciences, Université Mohammed V, Rabat	Rapporteur/Examineur
Abderahim DINANE	PES	École Royale Navale de Casablanca, Maroc	Rapporteur/Examineur
Noureddine ZAHID	PES	Faculté des Sciences, Université Mohammed V, Rabat	Rapporteur/Examineur
Asmae ARBAOUI	PES	Faculté des Sciences, Université Mohammed V, Rabat	Examineur
Lahcen AZRAR	PES	ENSAM, Université Mohammed V, Rabat	Examineur
Saïf ed-Dîn FERTAHI	PA	Faculté des Sciences, Université Mohammed V, Rabat	Invité

Année Universitaire : 2020-2021

Dédicace

Je tiens à dédier ce modeste travail à tous ceux qui me sont Chers, A ceux qui ont fait de moi ce que je suis.

Mon grand-père que ton âme repose en paix

Mes très chers parents pour qui je n'oublierai jamais leur

Grande affection ; leur soutien et leur encouragements ; tout le Long de mes études.

Ma Sœur Noujoud que j'aime beaucoup

À toute ma famille.

À mon meilleur ami Mr Hamid laarousi pour son soutien et encouragement durant tout le Long de mes études

À mes meilleures amies

À mes collègues, pour leur soutien et leurs encouragements.

À tous les enseignants, qui ont participé, par leurs immenses Efforts, à ma formation.

À tous les scientifiques qui ont changé notre Perception du

Monde.

Remerciements

*Ce manuscrit de thèse a été réalisé au sein de l'Équipe de Thermodynamique Énergétique Centre d'énergie de la Faculté des Sciences de Rabat sous la direction de Monsieur le Professeur **Abderrahim SAMAOUALI**.*

- ✚ Je tiens d'abord à exprimer ma reconnaissance à mon Professeur **SAMAOUALI Abderrahim**, Professeur de l'Enseignement Supérieur à la Faculté des Sciences de Rabat et Directeur du Laboratoire de Thermodynamique Énergétique, d'avoir accepté d'assurer la direction de ce travail et de partager sa grande connaissance durant mes années d'études. Les mots me manquent pour lui exprimer toute ma profonde gratitude. Je lui adresse un grand hommage pour son accompagnement, sa confiance et ses idées originales qui ont servi à enrichir le contenu de cette Thèse.*
- ✚ Je voudrais adresser mes plus sincères remerciements à Monsieur Le **Vice Doyen**, le Pr. **Mohamed TABYAOUI**, chargé des affaires académiques et pédagogiques de la Faculté des Sciences à L'**Université Mohammed V** de Rabat, pour son soutien durant les années de la recherche. en me faisant l'honneur de présider ce jury.*
- ✚ Je voudrais également exprimer mes plus sincères remerciements à Monsieur **Rachid TADILI**, Professeur à l'université Mohammed V de Rabat, en me faisant l'honneur en qualité de rapporteur et examinateur pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail.*
- ✚ Je voudrais également exprimer mes plus sincères remerciements à Monsieur **Abderahim DINANE**, Professeur à École Royale Navale de Casablanca, qui s'est intéressé à mon travail et me fait l'honneur en qualité de rapporteur et examinateur pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail.*
- ✚ Je voudrais également exprimer mes plus sincères remerciements à Monsieur **Noureddine ZAHID** Professeur à l'université Mohammed V de Rabat, en me*

faisant l'honneur en qualité de rapporteur et examinateur pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail.

- ✚ Je voudrais également exprimer mes plus sincères remerciements à Madame **Asmae ARBAOUI**, Professeur à l'université Mohammed V de Rabat, en me faisant l'honneur d'examiner mon travail.*
- ✚ Je voudrais également exprimer mes plus sincères remerciements à Monsieur **Lachen AZRAR** Professeur à École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Université Mohammed V, Rabat en me faisant l'honneur d'examiner mon travail.*
- ✚ Je voudrais également exprimer mes plus sincères remerciements à Monsieur **Saïf ed-Dîn FERTAH** Professeur à l'université Mohammed V de Rabat, en me faisant l'honneur d'être invité et d'examiner mon travail.*
- ✚ Je voudrais également exprimer mes plus sincères remerciements à tous les **Professeurs de notre Centre de Recherche en Énergies – Équipe de Thermodynamique et Énergétique**. À de la Faculté des Sciences l'Université Mohammed V de Rabat d'avoir accepté et partagé leur soutien et ses grandes connaissances.*
- ✚ J'aimerais souligner aussi le plaisir que j'ai eu à travailler et à discuter avec le Docteur **Hubert Rahier**, Professeur de l'Enseignement Supérieur à la Faculty of Engineering **Vrije Universiteit Brussel VUB**, d'avoir accepté et partager sa grande connaissance de la science des matériaux en me prodiguant ses nombreux conseils avisés.*
- ✚ Je voudrais également adresser mes plus sincères remerciements à Monsieur **Patrizio MADAU** de l'Ecole Polytechnique de Bruxelles-Centre de recherche de Materials Engineering, Characterization, Synthesis and Recycling (4MAT,) Campus du Solbosch pour son temps et l'ambiance agréable du travail au laboratoire.*

✚ *Mes remerciements les plus sincères à Monsieur le directeur du **Laboratoire Public Essais et d'Études (LPEE)** de Casablanca. et à toute l'équipe du laboratoire du béton pour leur accueil chaleureux et leur contribution.*

Enfin, un grand merci aux enseignants et professionnels de recherche que j'ai côtoyés tout le long de mon parcours de thèse.

Résumé

L'objectif principal de cette recherche est l'étude des caractéristiques chimique, minéralogique, thermique, mécanique et thermo physique de plusieurs échantillons, préparés au laboratoire, des bétons de granulats recyclés. Ces échantillons sont usinés de façon à remplacer partiellement du sable naturel par diverses quantités de béton recyclé et broyé. Ces déchets de bétons sont issus d'un ancien bâtiment démolé au centre-ville de Rabat (Maroc). Dans chaque nouveau béton, nous avons incorporé une teneur de sable recyclé (de même granulométrie que le sable naturel) avec un pourcentage allant de 0 à 20 %. Les résultats expérimentaux de ce travail ont montré que le béton recyclé améliore la résistance mécanique et réduit la diffusion du chlorure et de la porosité. En comparaison avec le béton de référence (ordinaire), les analyses chimiques –minéralogiques montrent qu'il n'y a aucune modification de la minéralogie du nouveau matériau de granulat recyclé et ce jusqu'à 20 % des granulats recyclés ajoutés. De même, nos résultats expérimentaux des paramètres thermo- physiques restent approximativement similaires pour les différents pourcentages, et sont en bon accord avec ceux trouvés par la modélisation numérique.

En Conclusion, le béton à agrégat recyclé possède les mêmes performances que celle du béton conventionnel.

Mots-clés: Béton, granulats recyclés, recyclage du béton, analyses chimique, minéralogique, propriétés mécaniques, thermo physique, modélisation numérique,

Abstract

The main objective of this research is the study of the chemical, mineralogical, thermal, mechanical and thermo-physical characteristics of several samples, prepared in the laboratory, of recycled aggregate concrete. These samples are machined in order to partially replace natural sand by various quantities of recycled and crushed concrete. These waste concretes come from an old demolished building in downtown Rabat (Morocco). In each new concrete, we incorporated a recycled sand content (of the same granulometry as natural sand) with a percentage ranging from 0 to 20%. The experimental results of this work showed that recycled concrete improves mechanical resistance and reduces the diffusion of chloride and porosity. In comparison with the (ordinary) reference concrete, chemical-mineralogical analyses show that there is no change in the mineralogy of the new recycled aggregate material up to 20% of the recycled aggregate added. Similarly, our experimental results of the thermo-physical parameters remain approximately similar for the different percentages, and are in good agreement with those found by numerical modeling.

To conclude, recycled aggregate concrete has the same performance as conventional concrete.

Keywords: Concrete, recycled aggregates, concrete recycling, chemical and mineralogical analysis, mechanical properties, thermo-physics, numerical modeling

Liste des Publications

1. Sara Belarouf (*), A. Samaouali, Kamal Gueraoui , Hubert. Rahier

Mechanical Properties of Concrete with Recycled Concrete Aggregates. International Review of Civil Engineering (IRECE). Vol 11, No 6 (2020). <https://doi.org/10.15866/irece.v11i6.18478>

2. Sara Belarouf (*), A. Samaouali, Abdelkrim Moufakkir, Kamal Gueraoui , H. Rahier

Thermal behavior of concrete with Recycled concrete aggregates on the Effect of temperature and composition. JP Journal of Heat and Mass Transfer. Volume 21, Issue 2.2020. <http://dx.doi.org/10.17654/HM021020167>

3. Sara Belarouf (*), A. Samaouali, Abdelkrim Moufakkir, Kamal Gueraoui , H. Rahier

Chemical-mineralogical characterization of concrete with recycled concrete aggregates JP Journal of Heat and Mass Transfer. Volume 22, Issue 1 .2021 <http://dx.doi.org/10.17654/HM022010035>

4. Abdelkrim Moufakkir, Salah El Alami, Sara Belarouf, Houda Soulami, Abderrahim Samaouali, Bouselham Kabouchi and Abderrahim Famiri

Physical-mechanical characterization and drying wood of holm-oak bush from azrou region – morocco. JP Journal of Heat and Mass Transfer. Volume 21, Issue 1.2020

<http://dx.doi.org/10.17654/HM021010151>

5. Abderrahim Samaouali, Hanane S EL, Youness EL Rhaffari, Abdelkrim Moufakkir, Sara Belarouf, Houda Soulami,

Thermal Conductivity and Porosity Characterization of Calcarene Stones used In Historical Building. JP Journal of Heat and Mass Transfer. Volume 21, Issue 2.2020

<http://dx.doi.org/10.17654/HM021020237>

6. Sara Belarouf (*), A. Samaouali, Kamal Gueraoui , Hubert. Rahier

Experimental and numerical Study on thermal conductivity of concrete with recycled concrete aggregates in different temperatures. Technology Reports of Kansai University. Volume - 62, Issue –06. 2020

Liste des Communications

1. Sara Belarouf*, abderrahim Samaouali
Thermo physical mineralogical and chemical characterization of building construction waste.
2nd International Congress on Materials & Structural Stability (CMSS-2017) MATEC Web of Conferences (21-24 Novembre 2017).
2. Sara Belarouf*, abdeerrahim Samaouali
Simulation des quantités des déchets des chantiers de Construction: cas de la ville de Rabat-
MAROC. La quatrième édition du Colloque francophone COMPOLA (Combustion et Pollution Atmosphérique) a lieu à Ouarzazate en 2018 (23-26 Avril).
3. Sara Belarouf^{*1}, abdaberrahim Samaouali ,M . HRAITA ,J .A. Aazim, S.EL Malouki, M.charia A.Bernatchou .
Demolition and deconstruction waste of monument building: Mineralogical and physical Characterization. RIPAM: International Meeting of Mediterranean Architectural Heritage.
Architectural Heritage: science, Issues and Prospects 20-21-22 November 2019. Morocco.Rabat
4. Mohammed Hraita, F. Hajji, K. Hajjami, S.Mrigal, O. Nassry ,Sara Belarouf, abdaberrahim Samaouali
Influence of Combined Interactions Of Substrate, Sodium Chloride and Water On the Alteraction Of Calcarenite Stone Of Rabat. RIPAM: International Meeting of Mediterranean Architectural Heritage.
Architectural Heritage: science, Issues and Prospects 20-21-22 November 2019. Morocco. Rabat.

***Contribution à l'étude expérimentale et la modélisation
numérique des bétons à agrégats recyclés de démolition pour les
bâtiments : Caractérisation des propriétés mécaniques, thermo-
physiques et analyses chimiques minéralogiques.***

Sommaire

Dédicace.....	2
Remerciements	3
Résumé.....	6
Abstract.....	7
Keywords: Concrete, recycled aggregates, concrete recycling, chemical and mineralogical analysis, mechanical properties, thermo-physics, numerical modeling	7
Liste des Publications.....	8
Liste des Communications.....	9
Sommaire	11
Liste des tableaux	16
Table des figures.....	18
Liste des symboles utilisés.....	22
INTRODUCTION GENERALE	24
Chapitre I. valorisations des déchets de construction et de démolitions : synthèses bibliographiques.....	29
Introduction.....	30
1. les bâtiments et la construction durable.....	30
2. L'efficacité énergétique des bâtiments au Maroc.....	31
3. Problématique des déchets de construction et de démolition au Maroc.....	32
3.1. Les principaux types de déchets de déconstructions et de démolitions	34
4. Les quantités des déchets des chantiers de construction:.....	35
4.1. Estimation de la production des déchets.....	35
4.2. Méthode Institut Technique Environnement Catalogne (ITEC).....	36
5. Synthèse Bibliographique sur l'utilisation des granulats recyclés dans les applications du béton	37
5.1. Béton à granulats recyclés	37
5.2. Les propriétés mécaniques du béton à granulats recyclés	39
5.3. Les propriétés Thermique du béton à granulats recyclés	40
Conclusion	42
Chapitre II. Généralités sur les Matériaux composites et les milieux poreux.....	43
Introduction.....	44
1. Les milieux poreux.....	44
1.1. Définition	44
1.2. Caractéristiques et types des milieux poreux	44
1.3. Porosité du matériau	46
1.3.1. Définition	46
1.3.2. Les Types de porosités.....	46
1.3.3. Porosité d'interstice.....	46
1.3.4. Porosité capillaire et hydrate	47
1.4. La distribution des dimensions de pores et de grains.....	47
1.5. La tortuosité.....	47
1.6. La connectivité	48
1.7. La teneur en eau	48

1.7.1. La teneur en eau massique.....	48
1.7.2. La teneur en eau volumique.....	48
1.8. La saturation de la phase.....	48
1.9. Volume Élémentaire Représentatif (VER).....	49
2. Généralités sur les Matériaux composites.....	50
2.1. Matériaux composites.....	50
2.2. Composites à matrice Cimentaire.....	52
3. Généralités sur le béton et leur application.....	52
3.1. Généralités sur le béton.....	52
3.2. Composition du béton.....	53
3.3. Les avantages du béton.....	55
4. Transferts chaleurs : quelques éléments fondamentaux.....	55
4.1. Définition.....	55
4.2. Mode de transfert de chaleur thermique.....	56
4.2.1. Conduction.....	56
4.2.2. Convection.....	57
4.2.3. Rayonnement.....	57
4.3. Loi de fourrier.....	57
4.4. Équation de chaleur.....	57
4.5. Propriétés thermo physiques.....	58
4.5.1. Conductivité thermique.....	58
4.5.2. Capacité thermique.....	58
4.5.3. Diffusivité thermique.....	59
4.5.4. Effusivité thermique.....	59
4.6. Transfert de chaleur dans les milieux poreux.....	60
4.6.1. Effets de la porosité et de la composition minéralogique.....	60
4.6.2. Influence de la température sur la conductivité thermique et la chaleur spécifique.....	61
4.6.3. Effet de l'eau sur la conductivité thermique.....	62
4.7. Propriétés mécaniques.....	63
4.7.1. La résistance à la compression.....	63
4.7.2. Essai de traction.....	63
Conclusion.....	64
Chapitre III. Caractérisations physico- chimiques et thermophysiques des matériaux étudiés.....	65
Introduction.....	66
Matériaux utilisés et méthodes d'essais.....	67
1. Déchets utilisés.....	67
2. Préparation des échantillons.....	67
2.1. Dosage des composants.....	68
2.2. Moulage des échantillons.....	68
3. Détermination du rapport C/E.....	71
4. Essai d'affaissement.....	72
5. Caractérisation chimique et minéralogique.....	73
5.1. microscopie électronique à balayage (MEB) couplé à EDX.....	73
5.2. Diffraction des rayons X (DRX).....	75
5.3. Spectrométrie de fluorescence X.....	76
5.4. La diffusion de chlorure.....	77
6. Caractérisation thermo-physique.....	79
6.1. Analyse Thermique Différentielle couplée à l'analyse thermogravimétrique (ATD-ATG -DSC).....	79
6.2. La conductivité thermique.....	80

6.3. la chaleur spécifique	81
6.4. La diffusivité thermique	82
6.5. l'effusivité thermique.....	82
7. Caractérisation mécanique et Pétro-physique.....	83
7.1. La résistance à la compression.....	83
7.2. La porosité	84
Conclusion	85
Chapitre IV. Résultats expérimentaux et Interprétations	86
Introduction.....	87
1. Caractérisation chimique et minéralogique	87
1.1. Résultats de la microscopie électronique à balayage (MEB) avec EDX.....	87
1.2. Résultats de la Diffraction des rayons X (DRX).....	98
1.3. Résultats de la Spectrométrie de fluorescence X	101
1.4. Résultats de la diffusion de chlorure	105
2. Caractérisation thermo-physique.....	116
2.1. Résultats des Analyses Thermiques Différentielles couplées à l'analyse thermogravimétrique (ATD-ATG -DSC).....	116
2.2. Résultat de la conductivité thermique.....	120
2.3. Résultat de la chaleur spécifique	122
2.4. Résultat de la diffusivité thermique	123
2.5. Résultat de l'effusivité thermique.....	124
2.6. Effet de la température sur les paramètres thermo-physique	125
3. Caractérisation mécanique et Pétro-physique.....	134
3.1. Résultats de la Résistance à la compression	134
3.2. Résultats de la porosité.....	136
Conclusion	141
Chapitre V. Modélisation numérique	142
Introduction.....	143
1. Principe de la modélisation	143
1.1. Méthode des différences finis	144
1.2. Méthode des éléments finis	144
1.3. Méthode des volumes finis.....	144
2. Construction du modèle.....	145
2.1. Schéma du dispositif	145
3. Formulation mathématique	145
3.1. Mise en équation du problème.....	145
3.2. Projection cylindrique	146
3.2.1. Formulation mathématique du problème.....	146
3.2.2. Conditions initiales	146
4. Méthode de résolution.....	146
4.1. Introduction	146
4.2. Maillage.....	147
4.3. Discrétisation	148
5. Résultats est discussions	151
5.1. Introduction	151
5.2. Données du programme	152
5.3. Résultats et interprétation.....	153
5.4. Comparaison des résultats numériques et expérimentaux :	156

Conclusion	159
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	160
1. Conclusions.....	160
2. Perspective	161
Références Bibliographiques.....	162

Liste des tableaux

Tableau 1.1: Répartition du gisement des déchets de construction et de démolition (2015-2030)

Tableau 2 .1 les propriétés thermiques pour quelque Minéraux

Tableau 3.1 : Résultat de calcule Du rapport C / E pour le béton

Tableau 4.1 : Résultats de la Spectrométrie de fluorescence X mesurées expérimentalement pour un béton référence

Tableau 4.2 : Résultats de la Spectrométrie de fluorescence X mesurées expérimentalement pour un béton 5% recyclé

Tableau 4.3 : Résultats de la Spectrométrie de fluorescence X mesurées expérimentalement pour un béton 10% recyclé

Tableau 4.4 : Résultats de la Spectrométrie de fluorescence X mesurées expérimentalement pour un béton 15% recyclé

Tableau 4.5 : Résultats de la Spectrométrie de fluorescence X mesurées expérimentalement pour un béton 20% recyclés

Tableau 4.6/a : La Diffusion calculée pour chaque type en moyennant pour les 3 échantillons (28 Jours) BN

Tableau 4.6/b : La Diffusion calculée pour chaque type en moyennant pour les 3 échantillons (28 Jours) BV5%

Tableau 4.6/c : La Diffusion calculée pour chaque type en moyennant pour les 3 échantillons (28 Jours) B10%

Tableau 4.6/d : La Diffusion calculée pour chaque type en moyennant pour les 3 échantillons (28 Jours) B15%

Tableau 4.6/e : La Diffusion calculée pour chaque type en moyennant pour les 3 échantillons (28 Jours) B20%

Tableau 4.7/a : La Diffusion calculée pour chaque type en moyennant pour les 3 échantillons (90 Jours) BN

Tableau 4.7/b: La Diffusion calculée pour chaque type en moyennant pour les 3 échantillons (28 jours) BV 5%

Tableau 4.7/c: La Diffusion calculée pour chaque type en moyennant pour les 3 échantillons (28 jours) BV 10%

Tableau 4.7/d: La Diffusion calculée pour chaque type en moyennant pour les 3 échantillons (28 jours) BV 15%

Tableau 4.7/e: La Diffusion calculée pour chaque type en moyennant pour les 3 échantillons (90 jours) BV 20%

Tableau 4.8 : le dosage d'agrégat recyclé et les données utilisées

Tableau 4.9 : Les Valeurs de la conductivité thermique mesurée expérimentalement

Tableau 4.10: Les valeurs expérimentales de la chaleur volumique spécifique en pourcentage de l'agrégat recyclé à différentes températures

Tableau 4.11: les valeurs de la diffusivité thermique en fonction du pourcentage à différentes températures

Tableau 4.12: valeurs de l'effusivité thermique en fonction du pourcentage à différentes températures

Tableau 4.13 : Détails des échantillons pour l'essai de la compression (7 jours et 28 jours)

Tableau 4.14 : La porosité calculée pour chaque type en moyennant pour les 3 échantillons (28 jour)

Tableau 4.15 : La porosité calculée pour chaque type en moyennant pour les 3 échantillons (90 jour)

Tableau 5.1 : Les données de la conductivités et chaleur spécifique utilisées dans le programme

Table des figures

Figure 1.1 : Consommation d'énergie finale des bâtiments à l'échelle mondiale par unité de surface de plancher, 2000-30.

Figure 1.2 : Impacts sur l'environnement des déchets de construction démolition (Rabat Maroc)

Figure 2.1 : Diagramme schématisé du système à trois phases (Samaouali et al 2011)

Figure 2.2 : Représentation schématisé d'un VER (Fatah Mejni 2008).

Figure 2.3 : Représentation schématisé d'un matériau composite Centre d'Animation Régional en Matériaux Avancés

Figure 2.4 : Classification des principaux matériaux composites selon la nature de la matrice (Chevalier, 2014).

Figure 2.5 : Béton et domaine d'utilisation

Figure 2.6 : Les différentes compositions du béton

Figure 2.7 : Schéma des échanges thermiques par : conduction, convection et rayonnement.

Figure 2.8 : Illustration schématisé des transferts thermiques dans un milieu poreux.

Figure 3.1 : Type de déchets étudiés (Chantier étudiant Rabat Maroc)

Figure 3.2 : Le malaxage des différents constituants d'un béton (LPEE Casablanca)

Figure 3.3 : la pâte du béton récupéré (LPEE Casablanca)

Figure 3.4 : Échantillonnage de béton dans les bains d'eau pour 28 jours. (LPEE Casablanca)

Figure 3.5 : cylindres destinés pour la compression .porosité et la diffusion.

Figure 3.6 : échantillonnage destinés pour les analyses chimiques (LPEE Casablanca).

Figure 3.7 : Principe d'affaissement

Figure 3.8 : Hitachi SU 70 appareil pour mesurer MEB avec EDX « au Laboratoire 4MAT ULB (Materials Engineering, characterization, synthesis and recycling) école polytechnique de bruxelles ULB Université libre de Bruxelles ».

Figure 3.9 : D8 Advance bruker appareil pour mesurer DRX « au Laboratoire 4MAT ULB (Materials Engineering, characterization, synthesis and recycling) école polytechnique de bruxelles ULB Université libre de Bruxelles ».

Figure 3.10 : D8 TIGER appareil pour mesurer XRF « au Laboratoire 4MAT ULB (Materials Engineering, characterization, synthesis and recycling) école polytechnique de bruxelles ULB Université libre de Bruxelles ».

Figure 3.11 : Appareil pour mesurer la diffusion de chlorure « au Laboratoire du béton LPEE Casablanca- Maroc».

Figure 3.12 : Netzsch TG – DTA . DSC appareil « au Laboratoire des matériaux faculty of engineering vrije université de bruxelles VUB ».

Figure. 3.13 : Appareil de mesure CT-Mètre et la sonde cylindriques utilisés.

Figure. 3.14: La sonde à anneaux

Figure. 3.15 .test de résistance à la compression pour les cylindres du béton (LPEE Casablanca)

Figure. 3.16: test de Porosité (LPEE Casablanca)

Figure 4.1 : (a) Micrographies électroniques à balayage – des échantillons béton de référence

Figure 4.1 : (b) -Spectre de dispersion en énergie (EDX) des échantillons béton de référence

Figure 4.1 : (c) Tableau des valeurs du Spectre de dispersion en énergie (EDX) des échantillons béton de référence.

Figure 4.2 : (a) Micrographies électroniques à balayage – des échantillons béton valorisés 5%.

Figure 4.2 : (b) Spectre de dispersion en énergie (EDX) des échantillons béton valorisés 5%.

Figure 4.2 : (c) Tableau des valeurs du Spectre de dispersion en énergie (EDX) des échantillons béton valorisés 5%.

Figure 4.3 : (a) Micrographies électroniques à balayage des échantillons béton valorisés 10%.

Figure 4.3 : (b) Spectre de dispersion en énergie (EDX) des échantillons béton valorisés 10%.

Figure 4.3 : (c) tableau des valeurs du Spectre de dispersion en énergie (EDX) de l'échantillon béton valorisés 10%.

Figure 4.4 : (a) Micrographies électroniques à balayage des échantillons béton valorisés 15%.

Figure 4.4 : (b) Spectre de dispersion en énergie (EDX) des échantillon béton valorisés 15%.

Figure 4.4 : (c) tableau des valeurs du Spectre de dispersion en énergie (EDX) de l'échantillon béton valorisés 15%.

Figure 4.5 : (a) Micrographies électroniques à balayage des échantillons béton valorisés 20%.

Figure 4.5 : (b) Spectre de dispersion en énergie (EDX) des échantillons béton valorisés 20%.

Figure 4.5 : (c) tableau valeurs du Spectre de dispersion en énergie (EDX) de l'échantillon béton valorisés 20%.

Figure 4.6: Diffractogramme des rayons x des échantillons du béton de référence

Figure 4.7 : Diffractogramme des rayons x des échantillons béton a 5 % valorisés

Figure 4.8 : Diffractogramme des rayons x des échantillons béton a 10 % valorisés

Figure 4.9 : Diffractogramme des rayons x d'échantillons béton a 15 % valorisés

Figure 4.10 : Diffractogramme des rayons x des échantillons béton a 20 % valorisés

Figure 4.11 : les spectres Diffractogramme des rayons x pour les 5 échantillons

Figure 4.12: résultats du test du coefficient de diffusion du chlorure (28 jours et 91 jours)

Figure 4.13: résultats d'analyse ATD ATG et DSC pour (BN)

Figure 4.14: résultats d'analyse ATD ATG et DSC pour (BV5%)

Figure 4.15: résultats d'analyse ATD ATG et DSC pour (BV10%)

Figure 4.16: résultats d'analyse ATD ATG et DSC pour (BV15%)

Figure 4.17: résultats d'analyse ATD ATG et DSC pour (BV20%)

Figure 4.18 : résultats expérimentales BN, B20%, B10% Température en fonction du temps à $T = 20^{\circ}C$

Figure 4.19: résultats expérimentales BN, B20%, B10% Température en fonction du temps à $T = 30^{\circ}C$

Figure 4.20: résultats expérimentales BN, B20%, B10% Température en fonction du temps à $T = 40^{\circ}C$

Figure 4.21: résultats expérimentales BN, B20%, B10% Température en fonction du temps à $T = 50^{\circ}C$

Figure 4.22 : Variation de la conductivité thermique en fonction de la température à différentes compositions de granulats recyclés

Figure 4.23 : Variation de la chaleur spécifique en fonction de la température

Figure 4.24 : Variation de la diffusivité thermique en fonction de la température

Figure 4.25 : Variation de l'effusivité thermique en fonction de la température

Figure 4.26 : Résistance à la compression des échantillons à 28 jours

Figure 4.27 : différents types de pores

Figure 4.28: résultats du test de la porosité (28 et 91 Jour)

Figure 5.1 : schéma du modèle étudiés

Figure 5.2 : Le maillage de calcul structuré à 2D

Figure 5.3: Résultats numériques Pour BN, B20%, B10% à une température $T = 20^{\circ}C$

Figure 5.4: Résultats numériques Pour BN, B20%, B10% à une température $T = 30^{\circ}C$

Figure 5.5: Résultats numériques Pour BN, B20%, B10% à une température $T = 40^{\circ}C$

Figure 5.6: Résultats numériques Pour BN, B20%, B10% à une température $T = 50^{\circ}C$

Figure 5.7: comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux de BN, B20%, B10% Température en fonction du temps à $T = 20^{\circ}C$

Figure 5.8: comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux de BN, B20%, B10% Température en fonction du temps à $T = 30^{\circ}\text{C}$

Figure 5.9: comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux de BN, B20%, B10% Température en fonction du temps à $T = 40^{\circ}\text{C}$

Figure 5.10: comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux de BN, B20%, B10% Température en fonction du temps à $T = 50^{\circ}\text{C}$

Liste des symboles utilisés

Ad	: Adjuvent
B 10%	: Béton avec 10 % d'agrégats recyclés
B 5%	: Béton avec 5 % d'agrégats recyclés
B15%	: Béton avec 5% d'agrégats recyclés
B20%	: Béton avec 5% d'agrégats recyclés
BN	: Béton normal
c	: Ciment
C	: Chaleur volumique spécifique (J/K.m ³)
C0	: Concentration de chlorure dans la solution de catholyte
Cd	: Concentration en chlorure [N]
D	: Diffusivité thermique (m ² /s)
Dc	: Coefficient de diffusion du chlorure [m ² /s]
E	: Effusivité thermique (J / m ² .K.s ^{1/2})
e	: épaisseur (m)
erf	: Inverse de la fonction d'erreur
F	: La constante de Faraday [J/V.mol]
Fc	: La résistance à la compression [Mpa]
G	: Gravier G
g	: Gravillon g
L	: Épaisseur de l'échantillon [m]
M _{air}	: Masse après absorption d'eau sous vide [g]
M _{dry}	: La masse sèche [g]
M _{water}	: Masse du spécimen immergé [g]
R	: Constante de gaz [J/K.mol]
RCA	: Granulats de béton recyclés

S	: Sable
T	: Températures [K]
t	: Durée des tests [s]
U	: Valeur absolue de la tension appliquée [V]
W	: Eau
xd	: Valeur des profondeurs de passage [m]
λ	: Conductivité thermique (W/m.K)
Z	: Valeur absolue de la valence ionique
ϵ	: La porosité accessible à l'eau [%]

INTRODUCTION GENERALE

Le béton et l'eau sont deux matériaux les plus consommés au monde. Préserver l'environnement demeure une problématique primordiale pour les professionnels de la construction et des travaux publics. Au Maroc, dans les grandes villes très urbanisées comme Casablanca, Rabat ..., le nombre de constructions augmente, et ainsi que le besoin en matières premières. Le béton est un des matériaux les plus utilisés dans les ouvrages modernes, et le besoin en granulats, un de ses composants, s'élève à plusieurs tonnes par habitant chaque année au niveau national. En effet, les carrières de granulats s'épuisent considérablement ses dernières décennies. Les espaces potentiellement exploitables se réduisent, et les professionnels de la construction font face à des difficultés d'approvisionnement. Ils se trouvent face au besoin d'amener des granulats depuis d'autres régions, avec de fait un transport supplémentaire qui a un coût environnemental évident. D'autre part, le secteur du bâtiment, notre pays ou dans le reste du monde, produit annuellement plusieurs millions de tonnes de déchets de matériaux de déconstruction et de démolitions, qui sont aujourd'hui souvent déposés en installation de stockage. La valorisation de ces déchets est un enjeu environnemental important pour la nation. Leur réutilisation comme granulats destinés à la fabrication de nouveaux bétons serait un choix bénéfique pour l'environnement. Elle permettrait, en effet la préservation des ressources naturelles, et la limitation de la pollution. Le recyclage est désormais vivement souhaité, en sensibilisant les décideurs du secteur de bâtiments et de la protection de l'environnement à mettre en place un projet national convenable regroupant de nombreux scientifiques chercheurs, ingénieurs et industriels pour élaborer un cadres général d'exploitation de ces nouveau matériaux recyclés.

En effet, le secteur du BTP (bâtiments et Travaux publics) est un acteur clé dans la lutte contre le changement climatique. Les déchets issus du bâtiment représentent une part croissante des émissions de gaz à effet de serre. Le secteur du bâtiment et des travaux publics produisent cinq fois plus de déchets que les ménages. Un chiffre énorme vu jusqu'à présent qui se développe en parallèle avec la croissance du secteur de la construction, de démolition et de réhabilitation des bâtiments. Il Génère annuellement près de 42 millions de tonnes de déchets de construction et de démolition (CDW), non seulement du béton, mais aussi du plâtre, du bois

Récemment, au Maroc, une prise de conscience a permis à l'élaboration de concepts et de politiques de gestion orienté vers la protection de l'environnement et des ressources naturelles. Depuis que le Maroc a organisé la COP22, il s'est engagé dans plusieurs

actions pour la protection de l'environnement. L'une des principales actions est la valorisation des déchets. Le recyclage des agrégats de bétons de déchets de construction et de démolition fait partie du contexte général de la politique du Maroc dans sa politique de la réservation des ressources naturelles du pays.

L'augmentation de la population de la planète et l'augmentation générale du niveau de vie moyen des habitants conduisent à une augmentation de la production de biens de consommation, générant en même temps une augmentation du flux de déchets. L'accumulation de ces déchets, dont la durée de vie peut atteindre plusieurs milliers d'années, pose de grands problèmes à des sociétés de consommation car elles polluent l'environnement et occasionnellement peut causer des dommages aux vivants, et problèmes environnementaux (destruction faune et flore, pollution des eaux souterraines).

Récemment, au Maroc, une prise de conscience a permis à l'élaboration de concepts et de politiques de gestion orienté vers la protection de l'environnement et ressources naturelles. Le recyclage des agrégats de bétons de déchets de construction et de démolition joue un rôle important dans ces politiques.

Néanmoins, ce travail de recherche est essentiellement fondé sur la prise de conscience de l'importance du recyclage des déchets de construction et de démolition dans le cadre du développement durable. Et que l'utilisation de déchets de construction à la place de produit naturel aura des avantages économiques tels que le prix du béton recyclé utilisé dans les bâtiments peut coûter moins cher que le béton avec du sable naturel.

Le travail de thèse de doctorat présenté dans ce manuscrit a pour objectif d'améliorer la compréhension du comportement de béton recyclé. Les recherches présentées ici comprennent deux volets : une approche expérimentale et une simulation numérique. Nous avons choisi pour le prélèvement des déchets du béton un ancien bâtiment démoli (âgé d'environ 50 ans) qui existe dans la ville de Rabat (Maroc). Les déchets du béton, ont été broyés pour obtenir une granulométrie comparable à celle du sable. Un pourcentage allant de 0 à 20 % en poids de sable recyclé a été utilisé dans le nouveau béton préparé. L'étude de l'effet de remplacement partiel du sable par diverses quantités de béton recyclé broyé a été développée par l'étude des propriétés mécaniques, thermophysique et physico-chimiques des matériaux préparés.

Nos échantillons sont préparés avec les normes nationales au Laboratoire Public d'Essais et d'Etudes (LPEE) exactement au laboratoire de béton de Casablanca - Maroc. Les analyses mécaniques sont effectuées dans ce même laboratoire. Les analyses thermophysique

(Conductivité thermique, la chaleur spécifique la diffusivité thermique et l'effusivité thermique) ont été effectuées au laboratoire thermodynamiques énergétique – départements de physique faculté des sciences rabat. Les analyses chimiques minéralogiques et thermiques ont été réalisées durant mon parcours d'échange doctorale entre université Mohammed V et VUB faculté d'ingénieries à Bruxelles au Laboratoire des matériaux de la Faculté d'ingénierie VUB vrije universitat de bruxelles et au Laboratoire 4MAT ULB (Materials Engineering, characterization, synthesis and recycling) école polytechnique de Bruxelles (ULB) Université libre de Bruxelles.

Ce travail de thèse est réparti en cinq chapitres et s'achève par une Conclusion générale et perspectives :

Le chapitre 1 : relate une étude bibliographique faisant une synthèse sur la valorisation des déchets et les différents types des déchets du secteur du bâtiment et travaux publics. Un aperçu sur les travaux antérieurs sur les bétons à granulats recyclés et leurs principales caractéristiques Mécanique et thermique.

Le chapitre 2 : présente une description sur les milieux poreux .matériaux composites et le béton, Ainsi qu'un rappel sur le processus de transfert de chaleur dans les milieux continus.

Le chapitre 3 : est consacré à la description des principales modifications physico-chimiques dans le béton on décrivant les différents processus expérimentaux utilisés pour déterminer les différentes caractéristiques des matériaux et matériels utilisés. La caractérisation chimique et minéralogique est réalisée par : la microscopie électronique à balayage (MEB) avec EDX, la Diffraction des rayons X (DRX), la Spectrométrie de fluorescence X, et la diffusion de chlorure. La Caractérisation thermique a été accomplie par l'Analyse Thermique Différentielle couplée à l'analyse thermogravimétrique (ATD-ATG). La caractérisation thermo physique (conductivité thermique, chaleur spécifique, diffusivité thermique, effusivité thermique) par Un CT-Mètre. La caractérisation mécanique (résistance à la compression) et Pétro-physique (porosité) ont été déterminés par un appareil Sercomp7 et porosité à l'eau respectivement.

Le chapitre 4 : énonce les résultats expérimentaux qui portent sur la détermination des propriétés chimique, thermique et mécanique. Ce chapitre se termine par une analyse et discussions des résultats obtenus.

Le chapitre 5 : est consacré à la description de la méthode numérique utilisée et qui est basée sur la reformulation des équations de conservation sur chaque élément du maillage. Les résultats obtenus lors de ce travail ont été validés en comparant les résultats ainsi obtenus à ceux donnés par l'expérimentation.

Ce manuscrit de doctorat s'achève par une Conclusion composée d'une synthèse générale de nos travaux, ainsi que des perspectives envisagées.

**Chapitre I. valorisations des
déchets de construction et de
démolitions : synthèses
bibliographiques**

Introduction

L'enjeu socio-économique majeur est la protection de l'environnement et de l'économie des ressources naturelles. Dans le secteur du bâtiment, la modification des techniques de production et/ou de mise en œuvre est primordiale, et doit être une obligation pour adopter des méthodes qui s'inscrivent dans le contexte de développement durable (Stratégie Énergétique Nationale 2030) [1].

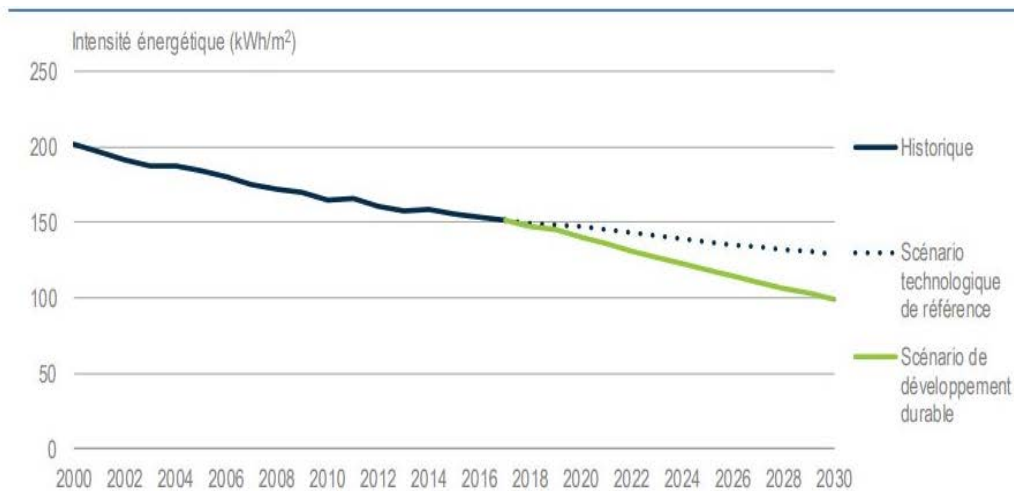
Le secteur du bâtiment et de la construction est un acteur clé dans la lutte contre le changement climatique. Les déchets des bâtiments issus de déconstruction et de démolitions ont une grande responsabilité dans les émissions de gaz à effet de serre (AMEE.2015) [2].

Ces dernières années, il a été observé dans le secteur du bâtiment et travaux publics (BTP), une nette croissance de la construction des bâtiments qui est liée directement à l'augmentation de la population. Cette hausse de la construction mène à un besoin croissant en matières premières naturelles et à la réduction progressive des gisements de granulats naturels. Ceci va nous mettre face à une difficulté d'approvisionnement croissante (Faucheux S.1995) [3].

Cette étude bibliographique présente un aperçu sur l'efficacité énergétique, sur le contexte socio-économique dans lequel s'inscrit l'utilisation du béton à granulats recyclés dans les bâtiments durables et aussi sur leurs principales propriétés mécaniques (résistance à la compression ...), thermo-physiques (conductivité thermique, diffusivité thermique, chaleur spécifique, effusivité thermique) et pétro-physiques (porosité).

1. les bâtiments et la construction durable

L'intensité énergétique mondiale moyenne des bâtiments devrait être inférieure à 30% des niveaux actuels pour que le scénario du développement durable de l'Agence internationale de l'Énergie (AIE.2018) [4], soit limité à une augmentation des températures mondiales moyennes à moins de 2°C par rapport aux niveaux de l'époque préindustrielle d'ici 2030 (Figure 1.1). Récemment, l'AIE a examiné les composantes d'efficacité énergétique du scénario de développement durable et a élaboré la stratégie Efficient World (monde efficace), qui a révélé que de nombreux bâtiments neufs sont déjà sur cette voie. En outre, certains pays commencent à s'efforcer de mettre en place une voie durable.



Remarque : L'intensité énergétique indiquée ici correspond à la consommation d'énergie finale dans les bâtiments par m².

Source : AIE (2018), calculs établis à partir des données de *Energy Technology Perspectives buildings model*, www.iea.org/buildings.

Figure 1.1: Consommation d'énergie finale des bâtiments à l'échelle mondiale par unité de surface de plancher, 2000-30.

Les multiples avantages des bâtiments éco-énergétiques et durables sont colossaux. Ils comprennent des avantages locaux tels que la création d'emplois, une productivité accrue, la réduction de la pollution atmosphérique locale et l'abaissement de la pauvreté. Tous ces éléments permettent, le rapport de AIE en (2018) : un meilleur accès à l'énergie et une efficacité énergétique est essentielle ; une meilleure santé et bien-être grâce aux mesures d'efficacité énergétique ; la réduction de la pauvreté ; un confort thermique est à l'appui ; une hausse de création des taux d'emploi directs et indirects dans le secteur des bâtiments ; une plus grande productivité.

En effet, dans le secteur des bâtiments et de la construction, il y a plusieurs domaines d'opportunité dans le but de créer une voie durable, nous citons : les facteurs et compétences humains; les solutions technologiques ,les solutions d'architecture pour réaliser des bâtiments passifs ,les solutions matérielles, la durabilité des bâtiments face aux phénomènes météorologiques extrêmes et au changement climatique ,une économie circulaire et la réutilisation, la valorisation et le recyclage. (RECORD.2011) [5]

2. L'efficacité énergétique des bâtiments au Maroc

Depuis ces dernières années, le Maroc a connu une demande énergétique remarquablement ascendante, en parallèle avec son développement socio- économique. Ceci qui a incité à adopter une politique d'indépendance énergétique en se basant sur des ressources énergétiques renouvelables et de l'efficacité énergétique. Ces deux contextes

constituent une priorité majeure dans la stratégie énergétique nationale. L'ambition de cette stratégie est d'économiser 15% en 2030 de la consommation d'énergie. Dans cette perspective, un plan d'action d'efficacité énergétique a été mis en place surtout dans le secteur du bâtiment. Ce plan s'articule autour des axes suivants :

- une réduction de la consommation d'énergie des équipements et des matériaux grâce à une meilleure performance intrinsèque visant à optimiser les ressources.
- une isolation thermique des bâtiments de l'intérieur et de l'extérieur sur des constructions neuves et anciens (murs, toitures et planchers bas), permettant ainsi 26 % d'économie sur la facture annuelle d'électricité.
- la mise en place de double-vitrages, aujourd'hui disponible sur le marché, et offrant les mêmes aspects esthétiques que les fenêtres simples avec plus de confort thermique et acoustique.

Dans cette vision énergétique et environnementale du secteur du BTP, le recyclage des déchets du béton de démolition comme substitut est l'une des meilleures options pour diminuer la consommation des matières premières naturelles, de réduire les décharges sauvages et réduire les coûts énergétiques.

Ainsi, le recyclage de ce type de déchets peut procurer des économies sur plusieurs points :

- Des économies financières, car si on réutilise ces matériaux recyclés, on évite les coûts dans le cas où la collecte est organisée et proche de la zone de fabrication des nouveaux bétons;

3. Problématique des déchets de construction et de démolition au Maroc

La figure 1.2 montre un impact significatif des déchets de déconstruction et de démolition au Maroc. En effet, cette nuisance est extrêmement importante sur le milieu naturel ainsi que sur la santé des populations lorsqu'ils ne sont pas gérés rationnellement.

La gestion des déchets de construction est une problématique qui concerne au plus haut point la population marocaine ainsi que les gestionnaires des milieux comme le département de l'eau, les eaux et forêts, l'urbanisme, la santé et les collectivités locales.

En effet, en raison de la mauvaise gestion de ces déchets, et en l'absence de filières pour leur élimination, les déchets sont évacués sans aucune forme de traitement dans les forêts, dans les fleuves ou dans des terrains en périphérie des villes, parfois à l'intérieur des cités.

L'impact environnemental des déchets inertes sur l'environnement crée des difficultés. Pour trouver des solutions d'élimination de ces déchets ainsi que l'épuisement des gisements naturels de granulats (carrières de calcaires notamment), les entreprises de BTP se trouvent dans l'obligation de rechercher à valoriser et recycler les déchets de construction-démolition.

Le recyclage des matériaux du BTP peut être considéré comme une solution d'avenir, car elle permettra de répondre partiellement au déficit éventuel entre la production et la consommation. (KOESTEN J.2015) [6].

Il existe plusieurs possibilités de valorisation des déchets inertes parmi lesquelles : un réemploi direct sur le chantier, une réutilisation en remblais pour le réaménagement des carrières et un acheminement vers des plateformes de recyclage pour fabriquer des agrégats. Ces trois modalités de valorisation sont prévues par la loi Marocaine 28-00.



Figure 1.2 : Impacts sur l'environnement des déchets de construction démolition (Rabat Maroc)

Les solutions classiques de gestion des déchets, actuellement, sont catastrophiques. L'incinération des déchets à l'air libre émet des gaz toxiques très nocifs. Elle agit sur la déshydratation du sol, déséquilibre l'écosystème et porte préjudice à la sécurité sanitaire de la population. De même, les structures bâties ont aussi des impacts indirects sur l'environnement, principalement ceux qui sont liés aux besoins énergétiques (pour le chauffage, l'eau chaude, la climatisation...) et aux émissions de gaz à effet de serre qu'ils induisent (Nayana. A.Y.2017)[7]. La mauvaise gestion des déchets de déconstruction, l'absence de filières pour l'élimination de ces déchets, au Maroc par exemple, se traduit par le

dépôt des déchets dans les décharges sauvages et dans des zones non contrôlées aux abords des villes, dans les forêts et au bord des oueds. (De Canio S.2009) [8]

3.1. Les principaux types de déchets de déconstructions et de démolitions

Le terme déchet de construction et de démolition (DCD) désigne un déchet issu des travaux de construction, de réhabilitation et de démolition de bâtiments et ceux issus des chantiers de travaux publics. Le secteur du Bâtiment et travaux publics produit principalement trois types de déchets : Déchets inertes, déchets non dangereux et déchets dangereux.

Déchets inertes : Ils sont les déchets les plus stables, et ils ne présentent pas de danger pour les êtres vivants et l'environnement. Ces sont des matériaux, sans caractère polluant, qui ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune réaction physique ou chimique. Ils ne sont pas biodégradables et ne se détériorent pas au contact d'autres matières d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement. Ils sont constitués presque intégralement de minéraux tels que silicates, carbonates ou aluminates, leur contenu en métaux lourds ou autres polluants est très faible. Parmi les déchets inertes produits par le secteur du bâtiment on trouve : Béton, Briques, Parpaings, Tuiles et céramiques, Terres et granulats non pollués et sans mélange.

Déchets non dangereux : Ce sont des déchets qui ne présentent pas de danger particulier vis-à-vis des humains ou de l'environnement, et qui peuvent être éliminés dans les mêmes conditions que les déchets ménagères. Il s'agit notamment des cartons, des papiers, des plastiques, de plâtre, de verre, de bois d'ouvrage, des métaux etc.

Déchets dangereux : Les déchets dangereux ou les déchets industriels spéciaux (DIS) sont des déchets qui présentent un caractère polluant ou toxique et nécessitent d'être éliminés dans une filière spécifique. Nous citons par exemple : pots de peinture, tubes de colle, certains déchets d'amiante, etc.

En conclusion, seulement les déchets inertes peuvent être transformés en granulats recyclés pour leur utilisation, en remblais de diverses natures, en couches de forme sur les chantiers de travaux publics ou encore comme granulats pour le béton.. En effet, ces déchets inertes proviennent, généralement des déchets de construction et débris des matériaux de construction (brique, ciment, béton, plâtre, terre, pierres, métaux, bois, papier, plastique, isolant etc.), des résidus de produits utilisés pour la mise en œuvre des matériaux (mastic, colle, bitume, huile de décoffrage etc.) dans leur emballage, ou en mélange avec d'autres

déchets, de débris de matériel de construction (chute de bois de coffrage, clous, fil d'attache, etc.) ainsi que des équipements réformés (grues, bétonnières, engins...).

4. Les quantités des déchets des chantiers de construction:

Au Maroc, la gestion intégrée des déchets du bâtiment et travaux publics est l'une des priorités dans la filière de protection environnementale et considère également la dimension sociale dans le sens où elle vise l'amélioration de la qualité de vie des citoyens. Mais avant de s'attaquer à l'élaboration des filières de valorisation de déchets où à la recherche de solutions, il serait nécessaire voire indispensable de quantifier la production nationale de déchets de construction. En effet, cette partie représente une étude importante et a pour objectif : l'estimation des gisements des DCD au niveau du Maroc d'après une étude récente du Secrétariat d'État Chargé du Développement Durable.

4.1. Estimation de la production des déchets

L'estimation de la quantité de déchets (Q_d) d'une activité donnée, implique la connaissance de la quantité Q (débit, tonnage ou volume, superficie) produite et le ratio C de déchet produit par unité, soit la relation suivante :

$$Q_d = Q \times C \quad (1.1)$$

Le paramètre C de la majeure partie des activités industrielles, et autres activités économiques est donné dans la littérature grâce aux différentes études publiées.

Cependant, Il arrive souvent qu'on soit confronté à des paramètres différents pour une même activité, ce qui exige une certaine analyse critique et/ou comparative pour proposer l'utilisation de la mesure du paramètre considéré la plus appropriée. Il restera à déterminer le tonnage ou le volume de la production (Q) de l'activité.

Les ratios de ce type de déchets sont obtenus d'après une récente étude sur les DCD, et qui s'est basée sur une méthode préconisée par l'Institut Technique Environnement Catalogne (ITEC), qui est adaptée au contexte Marocain, à cause de la similitude des méthodes de construction en Espagne et au Maroc avec mêmes matériaux de construction etc. Une enquête est toujours primordiale afin de déterminer le gisement du secteur de bâtiment. Par la suite nous présentons les étapes de la méthode ITEC.

4.2. Méthode Institut Technique Environnement Catalogne (ITEC)

Les déchets de construction et de démolition (DCD) générés par la construction sont calculés comme le produit de la surface construite des bâtiments multiplié par la quantité de déchets générés par unité de surface pendant la construction qui vaut 85 kg/m^2 . Ce Ratio a été élaboré par l'institut Technique Environnement Catalogne. Cette étude est présentée dans le plan de gestion des déchets pour les travaux de construction et de démolition (programme de la Direction générale de l'environnement) (Mañà reixach et al. 2000) [9] : Le Ratio C'est la quantité de déchets générés par unité de surface pendant la construction. Cette quantité a été obtenue à partir des statistiques des travaux de construction récents. Le nombre et le volume des conteneurs de déchets utilisés dans chaque chantier sont connus, de sorte que le volume de déchets par surface construite peut être quantifié. Il est de l'ordre de 85 kg/m^2 .

Le tableau 1.1 ci-dessous, montre une évolution de déchets de déconstruction et de démolitions des bâtiments entre 2015 et 2030. Les déchets de construction et de démolition représentent 14 Millions de tonnes pour l'année 2015 d'après les statistiques du ministère de l'environnement. L'évolution de ce gisement est étroitement liée au grand cycle de prospérité du secteur de l'immobilier et des travaux publics. Ce gisement ne cessera d'évoluer pour atteindre 15,6 millions de tonnes à l'horizon 2030.

Tableau 1.1: Répartition du gisement des déchets de construction et de démolition (2015-2030)

Région	DCD (Tonnes)	
	2015	2030
Tanger –Tétouan – Al Hoceima	4 178 828	3 052 321
Oriental	1 060 409	1 829 435
Fès- Meknès	1 229 576	1 598 452
Rabat- Salé-Kenitra	2 332 216	790 231
Beni Mellal-Khénifra	202 655	1 609 289
Grand Casablanca- Settat	1 492 248	1 996 191
Marrakech-Safi	1 619 968	440 020
Draa- Tafilalet	596 521	2 115 208
Souss- Massa	471 096	259 598
Guelmim-Oued Noun	259 541	396 427
Laayoune- Sakia El Hmra	518 122	160 195
Eddakhla-Oued Eddahab	89 889	1 398 248
Total Royaume du Maroc	14 051 069	15 645 614

5. Synthèse Bibliographique sur l'utilisation des granulats recyclés dans les applications du béton

5.1. Béton à granulats recyclés

Le béton est le matériau le plus utilisé dans le domaine de la construction. Les granulats représentent 75% du volume du béton. À cet effet, il est avantageux d'étudier la possibilité des déchets de démolition et de déconstruction qui sont en abondance aux alentours de la ville de Rabat (Maroc), comme substituant des granulats naturels qui font défaut dans la région. Dans ce travail, les granulats naturels sont les sables.

La production de granulats recyclés, se base en général sur trois types d'installation :

- Installation avec un ou plusieurs concasseurs.
- Installation transportable avec 1 ou 2 concasseurs de faible capacité.
- Petite installation transportable avec un concasseur de faible capacité.

L'objectif principal de la suite de ce paragraphe est de donner quelques renseignements sur le recyclage et les déchets destinés à être réutilisés comme agrégats dans la production de nouveaux bétons qui offrent une solution écologique et économique.

L'étude menée par Xu Feng. (2014) [10] et Yasser Ibrahim .(2019) [11] montre que les granulats recyclés peuvent non seulement protéger l'environnement, économiser les ressources, mais aussi de réduire le coût du projet et promouvoir le développement durable.

Aussi, les travaux de Meyer et al. (2009) [12] Et Bravo et al. (2015) [13] montrent que les agrégats recyclés, obtenus à partir de vieilles structures en béton démolies, ont été considérés comme un matériau alternatif dans la préparation du béton de structure, dans le but de préserver les ressources naturelles et de minimiser l'impact environnemental des déchets de C&D. Il a été démontré que le béton d'agrégats recyclés, qui est produit en remplaçant partiellement ou totalement les agrégats naturels par des agrégats recyclés dans le mélange de béton, présente des avantages environnementaux et économiques significatifs

Vivian W.Y. Tam et al.(2018) [14] ont conclu que l'utilisation de granulats recyclés dans le béton offre une solution prometteuse au problème des déchets de construction et de démolition. Les caractéristiques des granulats recyclés contribueront à améliorer le niveau d'acceptation et l'utilisation des applications du béton recyclé et aideront à faire du recyclage l'une des composantes importantes du développement durable.

Dans le même contexte, Krishan Pareek et al .(2019) [15] montrent que les granulats recyclés RA obtenus à partir de déchets de construction et de démolition .doivent être considérés comme un matériau durable qui est non seulement économique mais aussi respectueux de l'environnement.

Hossain et al .(2016) [16] ont présenté l'analyse de la production d'agrégats recyclés à partir de déchets de construction et de démolition en Hong Kong et leurs résultats ont révélé que, pour les gros granulats, le recyclage entraîne une réduction jusqu'à 65 % des émissions de gaz à effet de serre (GES), avec des économies pouvant atteindre à 58% de la consommation d'énergie non renouvelable et de même pour la production d'agrégats fins recyclés à partir de déchets de construction et de démolition .

5.2. Les propriétés mécaniques du béton à granulats recyclés

Les bétons à granulats recyclés présentent des tendances, en perspectives, dans le secteur de bâtiments et travaux publics comme un choix aux bétons ordinaires.

Cependant, une forte absorption d'eau et des propriétés mécaniques mauvaises des bétons à granulats recyclés influencent fortement la résistance et la durabilité du béton durci.

Il est nécessaire d'avoir une bonne perméabilité à l'eau et au gaz, et une résistance à la diffusion d'ions chlorure. Cette technique de diffusion a fait l'objet de notre travail expérimental dans le chapitre 3. En effet, les propriétés physico-mécaniques et chimiques des granulats recyclés (GR) sont inférieures à celles des granulats naturels (GN), pour certains auteurs. Cette étude comparative entre les différents bétons à base des granulats recyclés, issus de béton de démolition, et naturels, montre globalement que ces recyclés possèdent des caractéristiques acceptables vis-à-vis de la durabilité, dont la valorisation des granulats recyclés pour la fabrication des bétons semble une voie prometteuse.

Plusieurs résultats diversifiés existent dans la littérature, nous citons à titre d'exemple les travaux de J. Yang et al. (2011) [17], Nepomuceno et al. (2018) [18], González et al. (2017) [19], M. Nematzadeh et al. (2018) [20], A. Lotfy et al. (2015) [21], A. Devenny et al. (1999) [22], FM Khalaf et al. (2004) [23], AS DeVenny et al. (2005) [24], montrent que les propriétés mécaniques du béton de granulats recyclés sont relativement inférieures à celles du béton conventionnel, il existe un grand potentiel d'incorporation des granulats de béton recyclé dans les applications de béton structurel. L'incorporation des granulats recyclés réduit la résistance à la compression d'environ 30% lorsque 100% des agrégats ont été remplacés. (Debieb et al. 2008) [25].

En effet, autres agrégats recyclés à base d'argile cuit, introduit dans un béton, d'un pourcentage de 20 et 50% peuvent diminuer la résistance à la compression de 11% et 20%, respectivement. (Yang et al. 2011) [26].

Ses résultats sont en accord avec ceux de Medina et al. (2014) [27], qui ont travaillé sur les bétons à granulats recyclés, et que la résistance à la compression diminue avec l'ajout des déchets recyclés de démolition et de construction. Une étude intitulée "Impact of Using Recycled Aggregates on the Compressive Strength of Concrete" a montré qu'un remplacement supérieur à 50 % est possible. Les auteurs ont utilisé des agrégats de béton

recyclés avec des particules de gravier de 5 à 12,5 mm et de 12,5 à 31,5 mm. La résistance à la compression dépasse 50 % après utilisation d'agrégats recyclés.

D'autre part, Long Li et al. (2019) [28], ont montré que la diminution de la gamme de granulométrie remplacée par des agrégats fins de béton recyclé avait tendance à entraîner une réduction de la résistance à la compression et à la flexion.

Plusieurs études ont été menées sur l'effet de l'ajout d'agrégats recyclés sur la résistance à la compression du béton. Les résultats sont variantes, il a été constaté que la résistance à la compression du béton contenant des agrégats recyclés provenant des débris de construction et de démolition est inférieure à celle du béton normal (Alzouhayli K et al.2014) [29] et (Salehlamein F R et al .2015) [30]. De nombreux chercheurs ont démontré que les agrégats recyclés provenant de bétons connus sont de bonne qualité donnent un béton ayant une résistance à la compression équivalente et parfois supérieure à celle du béton naturel (AL-Luhybi A S et al. 2017) [31] et (Duan Z H et al. 2014) [32].

Pour autres propriétés physiques Thomas et al. (2018) [33]. ont constaté que les granulats recyclés ont un pouvoir absorbant plus important que celui des granulats naturels. La quantité d'eau nécessaire pour mélanger correctement le béton recyclé doit être augmentée.

D'autre part, quelques études Maslehuddin et al.(2007) [34] montrent que le béton avec du ciment normal est plus résistant à la diffusion des chlorures que le béton recyclé. Ils ont également constaté que la concentration en chlorure accélère la corrosion des armatures, et que plus la concentration en chlorure augmente, plus la densité du courant de corrosion augmente, ce qui entraîne une perte de poids plus importante du matériau due à la corrosion. En plus, le coefficient de diffusion diminue avec le temps jusqu'à ce qu'il atteigne finalement une valeur stable. (Verian et al.2018) [35].

Nous pouvons conclure que l'influence des granulats recyclés, utilisés dans les bétons, sur la résistance à la compression du béton est devenue beaucoup plus perceptible. Ceux-ci est due, principalement, en raison de leurs caractéristiques plus hétérogènes.

5.3. Les propriétés Thermique du béton à granulats recyclés

L'utilisation de granulats recyclés provenant de la déconstruction dans de nouvelles structures en béton peut permettre de valoriser ces déchets. Techniquement, les bétons sont caractérisés par leurs propriétés thermo physiques (conductivité, capacité thermique diffusivité thermique effusivité thermique) et thermiques (ATD, ATG, DSC). C'est pour cela

des nombreux auteurs contribuent aux différentes recherches sur les propriétés thermiques du béton à base de granulats recyclés et granulats naturel. Les résultats trouvés dépendent de la nature et de la composition et la structure du béton. C'est pour cela nous présentons dans ce mémoire quelques résultats obtenus par certains chercheurs sur cette thématique :

Un résultat remarquable, et en accord avec nos résultats, montre que la conductivité thermique du béton diminue au fur et à mesure que le pourcentage de remplacement des granulats naturels (NA) par des granulats recyclés augmente (Xiao et al.2010) [36] et (Diez Ramirez et al .2013) [37].

Diez Ramirez et al. (2013) [37] Ont trouvé que la conductivité thermique des mélanges de béton avec 100% de granulats recyclés et 100% d'agrégats naturel est de l'ordre de 1,58 et 2,00 W/m.K, respectivement, il y a un abaissement de la conductivité thermique des bétons à granulats recyclés.

Marie et al. (2017) [38] ont mené une enquête dans laquelle l'influence de la présence en pourcentage simultané d'agrégat recyclé en béton sur le comportement thermique du béton a été évaluée. Trois échantillons de $150 \times 150 \times 150$ mm ont été préparés à partir de chaque mélange. Les échantillons ont été durcis au laboratoire dans de l'eau à une température de 20 ± 2 °C pendant 28 jours. Ces auteurs a constaté que l'utilisation de 10 % d'agrégat recyclé du béton et de 10 % d'agrégat recyclé du caoutchouc réduit la conductivité thermique du béton de granulats recyclés de 32 % par rapport à celle du béton a granulats naturels .Par conséquent, ses auteurs ont conclu qu'il est possible d'utiliser ce béton hybride comme matériau d'isolation thermique non structurel. Dans le cas du béton à granulats naturels, la diminution de la conductivité thermique du mélange béton à agrégats recyclés est liée à l'augmentation de la teneur en air de la pâte de ciment, qui est responsable d'une densité plus faible (Benazzouk et al .2008) [39].

Le comportement thermique du béton avec granulats recyclé a été étudié par Zhu et al. (2015) [40] dans des conditions spéciales et bien définies. L'étude a montré que la conductivité thermique diminue avec l'augmentation du taux d'incorporation des agrégats recyclés. L'influence de l'ajout des agrégats est remarquable sur la conductivité thermique.

Conclusion

Nous avons passé en revue la problématique des déchets issus de démolition et de déconstruction ainsi que de leur valorisation, en tant que granulats dans les matériaux à base cimentaire. À travers la littérature, nous nous sommes rendu compte que l'ajout de granulats recyclés aux bétons peut constituer une solution pour concevoir un composite cimentaire offrant de meilleures performances des propriétés mécanique thermophysiques, diffusion de chlore. Malgré la chute et la hausse des résistances mécaniques (en compression) et un net abaissement de la conductivité thermique. Ce composite offre une grande promesse à être un matériau remplaçant le béton conventionnel dans le secteur des bâtiments et travaux publics.

Le prochain chapitre, explique une synthèse sur les milieux poreux, Matériaux et composites et des généralités sur le béton, ainsi qu'un rappel sur le processus de transfert de chaleur dans les milieux continus.

Chapitre II. Généralités sur les Matériaux composites et les milieux poreux

Introduction

Dans ce chapitre, nous rappelons le contexte général théorique des matériaux bétons naturels et bétons recyclés. Ces deux matériaux sont des matériaux hétérogènes et anisotropes, gérés par des théories différentes que ceux des matériaux homogène et isotrope. En effet, les propriétés mécaniques et thermiques dépendent de la porosité totale, la distribution et la taille des pores, la teneur en ciments, la surface spécifique, l'empilement granulaire, etc. Par la suite nous présentons dans ce chapitre quelques éléments fondamentaux.

1. Les milieux poreux

1.1. Définition

Un milieu poreux est un milieu composé d'une structure solide et d'espaces vides appelés pores. Ces vides peuvent être reliés ou non les uns aux autres. Une ou plusieurs phases fluides peuvent se déplacer à l'intérieur, et peuvent échanger avec la matrice solide de la matière et /ou de l'énergie. Les milieux poreux occupent une place et un rôle important dans de nombreux domaines industriels aussi bien naturels ; on les rencontre par exemple en génie civil, pétrolier, médecine, chimie, géologie, etc. (Fatah Mejni .2008) [41]

1.2. Caractéristiques et types des milieux poreux

Un fluide (eau liquide, vapeur, air) dans un matériau poreux évolue à l'intérieur d'un espace délimité par la matrice solide du matériau. La figure 2.1 donne une représentation schématique nous permettant de définir les relations entre les volumes et la masse des trois phases.

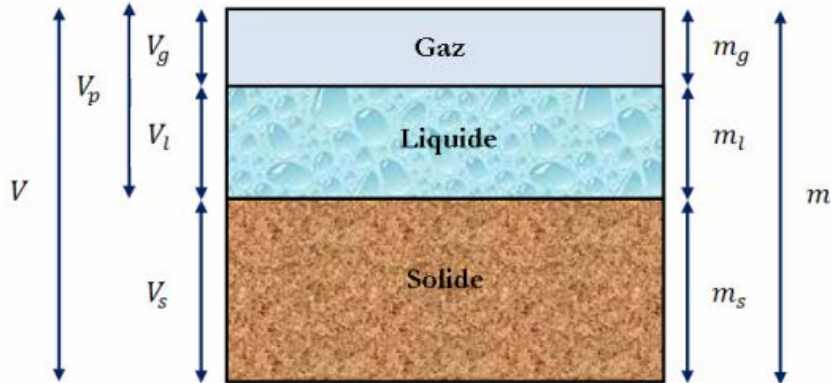


Figure 2.1 : Diagramme schématique du système à trois phases (Samaouali 2011) [42]

En effet, nous exposons ci- dessous quelques paramètres préliminaires indispensables. Ces paramètres ou grandeurs d'état, sont classés suivant deux groupes: paramètres extensifs et paramètres intensifs.

Avec V : volume apparent (m^3), V_s : volume de solide (m^3), V_l : volume de liquide (m^3),

V_g : volume gazeux (m^3), V_p : volumes des pores (m^3), m : masse totale (kg), m_s : masse de solide (kg), m_l : masse de liquide (kg), m_g : masse de gaz (kg).

Les relations quantitatives entre les masses et les volumes des constituants sont les suivantes :

$$\text{Masse totale : } (m = m_s + m_l + m_g) \text{ (kg)} \quad (2.1)$$

La masse de gaz m_g est considérée comme négligeable devant les autres masses (liquide, Solide),

$$\text{Volume apparent : } (V = V_s + V_l + V_g) \text{ (m}^3\text{)} \quad (2.2)$$

$$\text{Volumes des pores : } (V_p = V_l + V_g) \text{ (m}^3\text{)} \quad (2.3)$$

Masse Volumique apparente et masse volumique apparente à l'état sec :

$$\left(\rho = \frac{m}{V} ; \rho_0 = \frac{m_s}{V} \right) (\text{kg.m}^{-3}) \quad (2.4)$$

Masse volumique absolue :

$$\left(\rho_s = \frac{m_s}{V_s} (\text{kg.m}^{-3}) \right) (2.5)$$

1.3. Porosité du matériau

1.3.1. Définition

La porosité ou indice de vide est par définition le rapport du volume des vides (V_v) au volume total (V_t) du matériau considéré. Le volume du solide (V_s) est donné par :

$$(V_s = V_t - V_v) (2.6)$$

Il suffira donc de mesurer deux de ces trois paramètres pour calculer la porosité. Différentes méthodes de mesure de la porosité sont décrites dans la littérature Samaouali, (2011) [42], Mehta (1986) [43], Baroghel-Bouny(1994)[44], Marchand et Pigeon(1996) [45],Maltais et al (1997) [46] , Mindess et al.(2003) [47].

Dans le cas des matériaux consolidés (béton naturel, béton recyclés, roches, pierre), la porosité constitue une caractéristique intrinsèque. Elle est responsable de la gestion de plusieurs paramètres tels : les paramètres mécaniques, thermo physiques, la diffusion ionique et perméabilité.

1.3.2. Les Types de porosités

On distingue différentes types de porosité. Porosité d'interstice et porosité capillaire et hydrate.

1.3.3. Porosité d'interstice

La porosité peut être de deux formes. La porosité d'interstice représente les vides subsistant autour de particules minérales solides, plus ou moins cimentées alors que la porosité de fissure correspond aux fissures, fractures ou diaclase non colmatées présentes

dans les roches par exemple. Généralement, dans les bétons naturels, ces deux types de porosité peuvent coexister.

1.3.4. Porosité capillaire et hydrate

La structure poreuse des bétons est constituée de pores capillaires et de pores d'hydrates. Les pores capillaires, les plus gros, influencent fortement les propriétés de transfert des bétons surtout lorsqu'ils sont interconnectés. Par contre, la porosité hydrate remplit graduellement les espaces entre les grains de ciment.

1.4. La distribution des dimensions de pores et de grains

La détermination de la distribution des dimensions des grains et de pores s'impose lorsqu'on s'intéresse à la structure du matériau béton. En effet, les méthodes de l'analyse statistique permettent de mettre en évidence la caractérisation de la distribution des tailles des grains (courbe granulométrique) ou des pores (courbe porosimétrique). La porosité, la taille, la forme des grains, la distribution et les dimensions des pores sont des paramètres caractérisant la microstructure d'un matériau poreux (béton naturel et béton recyclé). Ce sont des paramètres importants pour différencier les milieux entre eux.

1.5. La tortuosité

La tortuosité τ d'un matériau poreux (bétons) est une quantité sans dimension qui caractérise les cheminements de fluides dans la structure poreuse. Elle peut être défini comme le rapport entre la distance parcourue par le fluide L_e sur la distance effective du déplacement L , selon la relation de (Quenard 1999) [48]:

$$\left(\tau = \left(\frac{L_e}{L} \right)^2 \right) \quad (2.7)$$

Avec L_e : Longueur effective du déplacement du fluide, c'est-à-dire la longueur moyenne des lignes de courant du fluide traversant le matériau ; L : longueur du matériau poreux ou distance parcourue par le fluide dans la direction de l'écoulement.

1.6. La connectivité

La connectivité est un paramètre topologique qui mesure le degré d'interconnexion d'un matériau poreux, en général il est préférable que le réseau de pores capillaires soit constitué de pores les plus petits possibles car le degré d'interconnexions y est plus faible (Quenard .1999) [48]. La perméabilité s'en trouve alors considérablement diminuée car il y a moins de chemins préférentiels pour le passage des liquides, des gaz ou des ions potentiellement agressifs.

1.7. La teneur en eau

1.7.1. La teneur en eau massique

La teneur en eau ω d'un matériau est le rapport de la masse d'eau contenu dans ce matériau à la masse du même matériau à l'état sec, exprimé en pourcentage.

$$\left(\omega_m = \frac{W_e}{W_s} = \frac{\text{Poids de l'eau dans le matériau}}{\text{Poid du matériau a l'etat sec}} \right) (2.8)$$

1.7.2. La teneur en eau volumique

C'est le rapport du volume de l'eau V_e contenue dans les pores (ou vides) du matériau poreux au volume total V du matériau considéré

$$\omega_v = \frac{V_e}{V} = \frac{\text{Volume de l'eau occupant les pores}}{\text{Volume du matériaux}} (2.9)$$

1.8. La saturation de la phase

La saturation S_i d'une phase est définie par la proportion du volume de pores occupé par cette phase :

$$\left(S_i = \frac{V_i}{V_p} \right) (2.10)$$

Où V_i et V_p sont respectivement le volume de la phase fluide et le volume de pores. Pour un milieu saturé (en écoulement diphasique) la somme des saturations est égale à 1. Lors du drainage d'un milieu poreux, la saturation en eau, obtenue en fin de déplacement, est dite irréductible et est notée S_{wi} . (Djivedé Elvire .2011) [49].

1.9. Volume Élémentaire Représentatif (VER)

Les propriétés du milieu poreux dépendent de l'échelle de description considérée. Elles ont un sens physique à une échelle macroscopique et leurs valeurs varient avec le volume de mesure qui peut être, par exemple, de la taille d'une hétérogénéité. Que ce soit dans le cadre de la modélisation numérique ou celui de la mesure des paramètres, il est nécessaire de pouvoir changer d'échelle et déduire la valeur des paramètres d'une échelle à l'autre.

C'est dans ce but que le calcul de paramètres équivalents a fait l'objet de plusieurs études théoriques Charles Danquigny. (2003) [50]. Pour caractériser un milieu poreux, on doit tout d'abord définir un Volume Élémentaire Représentatif (Figure 2.2) pour quantifier un problème de la physique. Dans les milieux poreux, les propriétés physiques (porosité, perméabilité, etc.) sont discontinues au niveau microscopique.

. La dérivation de solutions de problèmes d'écoulement doit donc toujours faire appel, implicitement ou explicitement, à la définition d'un volume élémentaire représentatif VER à l'intérieur duquel les propriétés moyennes des fluides et des matériaux sont supposées uniformes et continues.

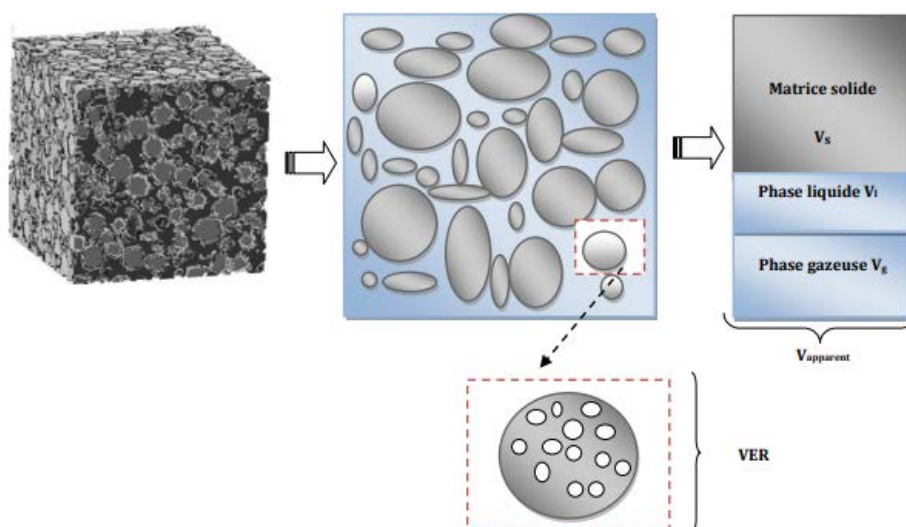


Figure 2.2 : Représentation schématique d'un VER (Fatah Mejni .2008) [41].

2. Généralités sur les Matériaux composites

2.1. Matériaux composites

Un matériau composite peut être défini comme étant un assemblage de deux composants ou plusieurs non miscibles, dont les propriétés se complètent. Le nouveau matériau ainsi constitué, hétérogène, possède des propriétés (caractéristiques mécaniques, propriétés thermiques, durabilité, masse volumique, prix...) que les composants seuls ne possèdent pas (Berthelot. 1996. Gornet Laurent. 2008) [51-52] Au sens structural, il est généralement constitué d'une ossature appelée renfort, qui assure la tenue mécanique, et d'une protection appelée matrice, qui assure la cohésion de la structure et le transfert de charges. A ces deux composants principaux peuvent s'ajouter des adjuvants, dans le cas des bétons, qui permettent de modifier l'aspect, ou les caractéristiques du matériau (Figure 2.3).

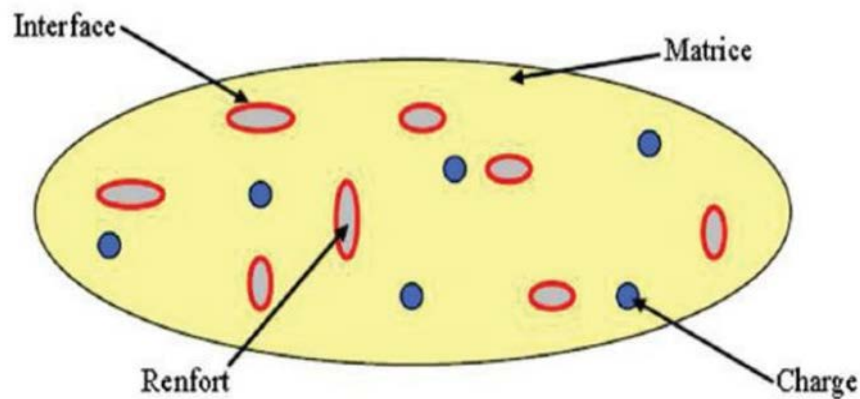


Figure 2.3 : Représentation schématique d'un matériau composite (Centre d'Animation Régional en Matériaux Avancés).

Il existe actuellement, un grand nombre de matériaux composites que l'on classe généralement en deux familles, les composites à matrices organiques (CMO) et les composites à matrices minérales (CMMi). Chaque famille possède trois matrices qui sont représentés dans le schéma ci-dessous (figure 2.4) (Chevalier.2014) [53].

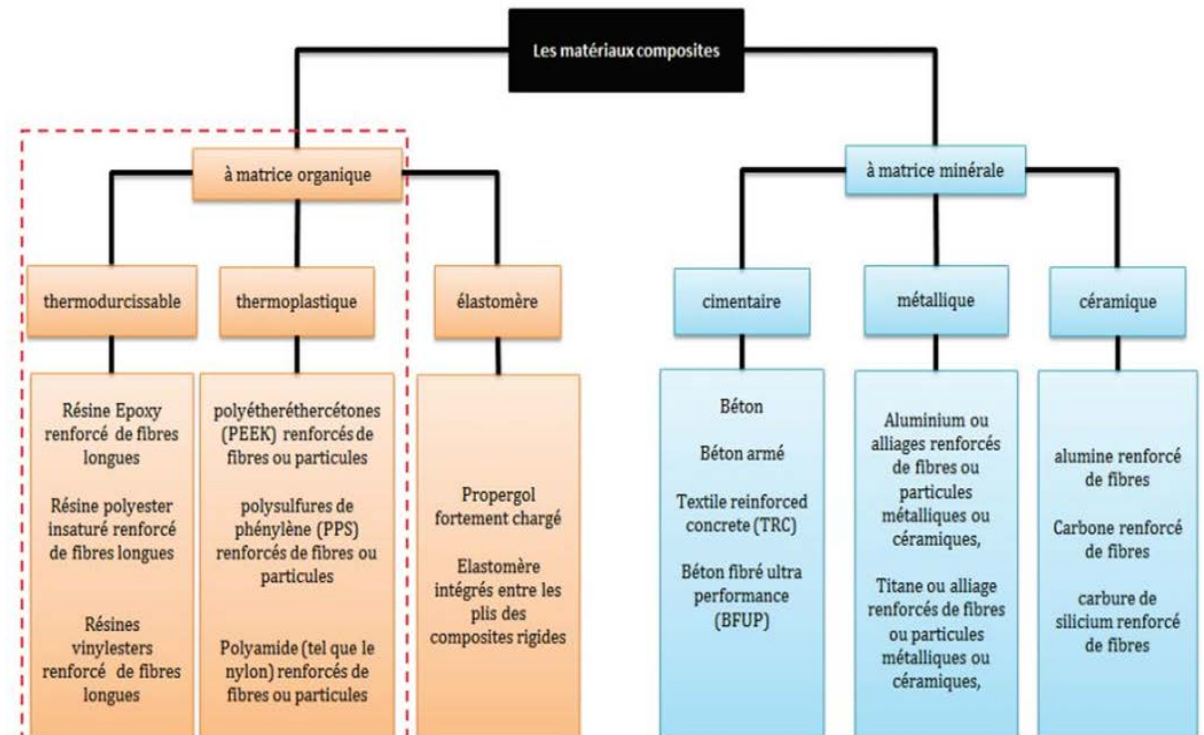


Figure 2.4 : Classification des principaux matériaux composites selon la nature de la matrice (Chevalier. 2014).

Dans le domaine du Génie Civil, les CMO (voir schéma, figure 2.4) sont assez utilisés. L'application des élastomères est limitée et concerne en général les fondations dans les zones sismiques ou pour des applications spéciales qui nécessitent une grande flexibilité. Ce sont les thermodurcissables et les thermoplastiques qui sont les plus employés aussi bien en collage qu'en isolation. Dans la suite de la recherche bibliographique, nous nous n'intéresserons pas à ces deux groupes de CMO. Ce qui nous intéresse le plus c'est le groupe des élastomères, car notre nouveau béton à granulats recyclés peut être employé dans les zones sismiques (Aucher Jérémie. 2009) [54].

Les élastomères

Ce sont des polymères qui présentent des propriétés élastiques, obtenus après réticulation. Ils supportent de très grandes déformations avant rupture. La plupart des élastomères sont des polymères organiques. Ils sont d'excellents combustibles.

2.2. Composites à matrice Cimentaire

Un béton ou mortier fibré est un matériau associant des fibres à une matrice cimentaire afin d'en rehausser les propriétés mécaniques. Les fibres jouent le rôle de renfort tandis que la matrice assure la cohésion du matériau et le transfert des efforts aux fibres.

Depuis longtemps, les fibres sont utilisées pour renforcer des matériaux fragiles. La paille a été utilisée pour renforcer les briques de terre, et le crin de cheval pour renforcer les mortiers de maçonnerie et de plâtre. Un travail est en cours dans notre laboratoire de thermodynamique énergétique, qui traite ses thématiques (ciment + plastique, mortier + verre, terre rouge + fibre de cuivre). La raison fondamentale de l'emploi des fibres comme renfort tient à leur bonne contrainte à la rupture.

L'intérêt du secteur industriel pour les matériaux de construction renforcés de fibres ne cesse d'augmenter du fait du nombre conséquent de recherches en cours sur cette thématique (ACI. 1996) [55].

En général, les fibres permettent aussi une meilleure répartition des contraintes mécaniques. L'incorporation de fibres a pour effet d'augmenter la ductilité du béton et donc ses caractéristiques post fissuration. De plus, les fibres peuvent améliorer les propriétés mécaniques (la résistance en flexion, en torsion, en cisaillement). Un béton fibré continue ainsi de supporter les efforts après l'apparition de fissures.

3. Généralités sur le béton et leur application

3.1. Généralités sur le béton

Le béton est le matériau le plus utilisé dans le monde du génie civil du fait de sa haute résistance en compression et de son faible coût. Il joue un rôle essentiel dans la vie quotidienne des humains. On constate une plus vaste contribution de ce matériau dans la construction et le bâtiment (maisons, écoles, hôpitaux, ponts, barrages, etc.) (De Larrard F.2000 et CHANVILLARD G.1999) [56-57] Figure 2.5.



Figure 2.5 : Béton et domaine d'utilisation

3.2. Composition du béton

Un matériau composite est le mélange de différents constituants avec des proportions variables. De manière générale, les principaux ingrédients employés sont le sable, le gravier, le ciment, le tout gâché avec de l'eau. (KOSMATKA S.H.2004) [58]. La figure 2.6 présente la composition de ce matériau composite

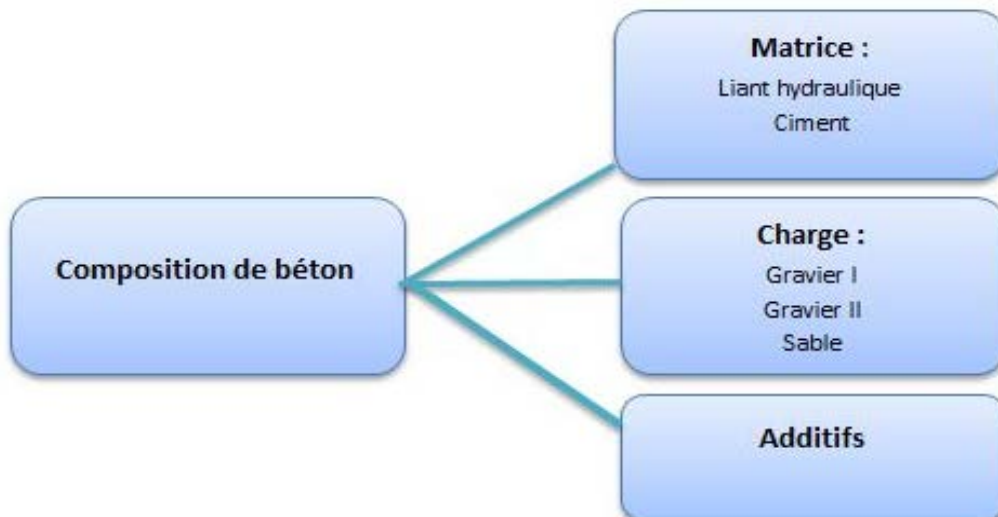


Figure 2.6 : Les différentes compositions du béton

- Le ciment

Le ciment est le liant hydraulique par excellence. Ce dernier est généralement composé de calcaire et d'argile. Il fait partie des principaux composants du béton qui peut lier ses constituants entre eux, et lui confère une certaines caractéristiques essentielles telles que sa résistance. La composition du ciment peut varier en fonction des différents types de besoins, ce qui le divise en plusieurs catégories :

Le CEM I (ciment Portland) est un ciment adapté pour la conception de béton armé ou précontraint car il offre un niveau de résistance élevé.

Les CEM II A ou B (ciment Portland composé) ont pour particularité d'être très maniabes. Ils sont donc utilisés dans les travaux d'usage courant tels que pour les chapes traditionnelles ou bien pour les enduits simples.

Les CEM III A, B ou C (ciment de haut-fourneau) sont adaptés à des environnements difficiles, ils sont réputés pour être durables.

Les CEM IV A ou B (ciment de type pouzzolanique) sont également adaptés à un milieu agressif, idéals pour des structures hydrauliques.

Les CEM V A ou B (ciment composé) ont les mêmes propriétés physiques que les CEM III mais pas les mêmes constituants

- L'eau de gâchage :

L'eau de gâchage est un élément indispensable lors de la conception du béton. Elle permet d'hydrater le ciment, ce qui libère ses capacités de liant, et rend également plus facile l'application du béton. L'eau utilisée doit être propre (l'eau de mer à éviter dans la construction). L'eau de gâchages doit respecter les normes de mélanges.

- Les granulats :

Les granulats, d'origine naturelle ou artificielle, sont des grains minéraux de dimensions variables. Ils sont les principaux composants du matériau, leur choix doit suivre les normes de mélanges. On distingue alors différentes sortes de granulats : les fillers, les sables, les graves, les gravillons et les ballasts.

- Les adjuvants :

Les adjuvants sont des produits chimiques ajoutés lors du malaxage du béton et faiblement dosés lors de la préparation (moins de 5% de la masse du béton). Ces produits offrent la possibilité d'améliorer certaines caractéristiques du béton telles que son temps de prise ou son étanchéité. Très répandus aujourd'hui, il existe différents types d'adjuvants qui vous permettront d'obtenir un meilleur béton.

3.3. Les avantages du béton

Le béton est un produit essentiel pour le secteur de bâtiment et travaux publics. C'est un matériau capable de produire des matériaux de construction de façon économique et présente des avantages intéressants grâce à sa résistance, durabilité, longévité. Son efficacité énergétique est maximisée et améliorée grâce à son inertie thermique confortable. Un matériau de construction qui ne brûle pas, ne rouille pas, qui dure et possède une excellente isolation aux vibrations et aux sons. Il est recyclable et de plus, les matériaux nécessaires pour sa fabrication, sont abondants dans presque toutes les régions. À la suite d'événements météorologiques extrêmes, les structures de béton se sont avérées être les plus résilientes.

Le béton a une grande capacité, dans les bâtiments, de stocker l'énergie (sa masse thermique) et permet de tempérer l'intérieur, ce qui réduit jusqu'à 8% la demande en chauffage et en climatisation. C'est une substance, totalement inerte, lorsqu'il est durci ; le béton n'émet pas de gaz, de composés toxiques ou composés organiques volatiles.

Dans le secteur de travaux publics, les chaussées en béton sont également rentables à la fois sur le coût initial et sur le coût total du cycle de vie, nécessitant seulement le tiers de l'entretien d'une route comparable en asphalte sur une durée de vie de plus de 50 ans.

En plus, lors de la valorisation des bétons de démolition et de déconstruction, ce matériau inerte est 100% recyclable. Ces déchets de bétons peuvent être recyclés comme granulats (sables, graviers) dans un nouveau béton à granulats dite recyclés, objet de notre travail de recherche dans ce mémoire de thèse.

4. Transferts chaleurs : quelques éléments fondamentaux

4.1. Définition

Dans cette partie, on traite essentiellement des connaissances de base nécessaires à la compréhension et au traitement des échanges thermiques qui jouent un rôle important dans de très nombreux processus naturels et industriels. Elle est classiquement divisée en trois parties

correspondant aux trois mécanismes gouvernant ces échanges : conduction, convection, rayonnement. La formulation propre à chaque mode d'échange a été présentée, et à la fin on développe les méthodes de détermination des flux de chaleur et des champs de température qui conditionnent ces transferts thermiques dans les milieux poreux.

4.2. Mode de transfert de chaleur thermique

Il existe trois modes de transfert d'énergie thermique qui peuvent avoir lieu entre deux milieux, mais aussi au sein d'un même milieu : la conduction, la convection et le rayonnement, (Figure 2.7). Il est important de bien comprendre chacun de ces phénomènes afin de mieux cerner la problématique présentée dans ce mémoire.

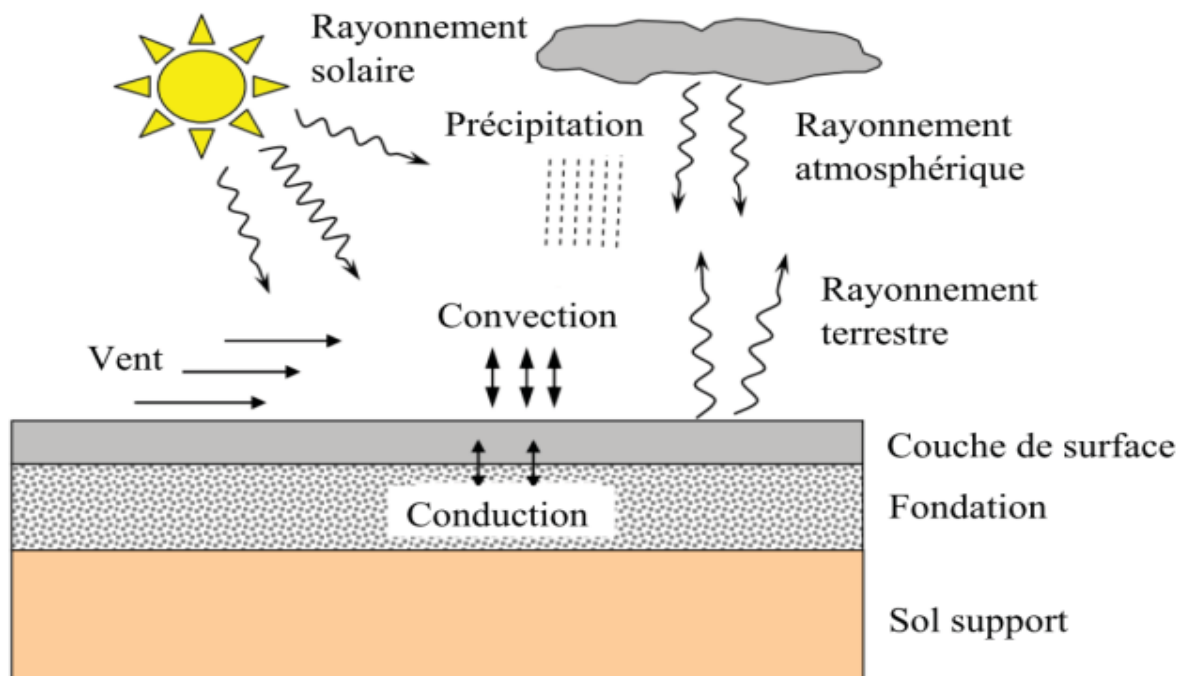


Figure 2.7 : Schéma des échanges thermiques par : conduction, convection et rayonnement.

4.2.1. Conduction

C'est un transfert d'énergie dans la matière sans déplacement de celle-ci. Ce transfert qui est par les électrons (conducteur) ou les phonons (isolant) nécessite un milieu solide de transmission car elle est faible dans les gaz.

4.2.2. Convection

C'est un transfert d'énergie dans la matière avec déplacement de celle-ci. Ce transfert qui se fait par écoulement de fluide (liquides, gaz) / différence de masse volumique et nécessite aussi un milieu fluide de transmission.

4.2.3. Rayonnement

C'est un transfert d'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques sans de déplacement de la matière, et sans contact entre les objets ou milieux qui échangent l'énergie.

Dans ce mémoire, nous nous intéresserons exclusivement au transfert thermique par conduction, ainsi nous négligerons les autres modes de transfert.

4.3. Loi de fourrier

Le transfert thermique par conduction pur, au sein d'un milieu solide et opaque, s'effectue, sans transfert de matière, sous l'influence d'un gradient de température entre deux points. (Samaouali. 2011). Le flux de chaleur par conduction définit par la loi de fourrier s'exprime par l'équation :

$$(q = -\lambda \nabla T) \quad (2.11)$$

Où λ est le tenseur conductivité thermique du matériau qui caractérise le transfert thermique dans le matériau. Dans un milieu isotrope, λ est un scalaire [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$].

4.4. Équation de chaleur

En mathématiques et en physique, l'équation de la chaleur est une équation aux dérivées partielles. (TingtingWU.2011) [59]. Pour décrire le phénomène physique de conduction thermique, introduite initialement en 1807 par Joseph Fourier, après des expériences sur la propagation de la chaleur, suivies par la modélisation de l'évolution de la température avec des séries trigonométriques, appelés depuis séries de Fourier et transformées de Fourier.(Y. C, eng. 1998) ET (J.F. Sacadura .1993) [26-60].

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (2.12)$$

Où, ρ est la masse volumique (kg/m^3),

C_p la chaleur massique ($\text{J K}^{-1} \text{kg}^{-1}$)

T : est la température (de la phase solide et des phases fluides) en (K)

λ : est la conductivité thermique du matériau homogène et isotrope ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

4.5. Propriétés thermo physiques

La détermination des propriétés thermo physiques des matériaux, en particulier les matériaux cimentaire (bétons, bétons recyclés ...), est actuellement un primordiale pour le développement dans la mesure où ces données nous permettent de concevoir et réaliser des infrastructures et ouvrages qui répondent à des besoins spécifiques ou d'optimiser des installations déjà existantes par l'introduction de matériaux dont les caractéristiques répondent mieux aux besoins. Ces paramètres sont la conductivité thermique, la diffusivité thermique, la chaleur spécifique et l'effusivité thermique.

4.5.1. Conductivité thermique

La conductivité thermique est l'une des propriétés thermo physiques recherchées pour les matériaux de construction. Elle mesure la capacité d'un matériau à conduire de la chaleur. Elle dépend de la nature du matériau et d'autres paramètres physiques (la température, la masse volumique, etc.) (Samaouali. 2011 et Ezbakhe.1986) [42]-[61].

En régime permanent, dans le cas le plus simple de l'écoulement unidimensionnel de chaleur à travers un mur homogène d'épaisseur e et de températures uniformes T_1 et T_2 , ce flux de chaleur ϕ (W) s'exprime sous la forme :

$$\left(\phi = \frac{\lambda}{e} * (T_1 - T_2) * S \right) \quad (2.13)$$

4.5.2. Capacité thermique

C'est est une grandeur thermo physique qui permet de quantifier la possibilité qu'a un corps de stocker ou déstocker de l'énergie par un échange thermique au cours d'une transformation pendant laquelle sa température varie. Plus la capacité thermique d'un corps est grande, plus la quantité d'énergie emmagasinée est importante.

La capacité thermique massique c ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$) et volumique C ($J \cdot K^{-1} \cdot m^{-3}$), sont reliés par la relation suivante :

$$(C = c \cdot \rho) \quad (2.14)$$

4.5.3. Diffusivité thermique

La diffusivité thermique traduit l'aptitude du matériau à diffuser la chaleur. C'est une propriété qui régit le flux de chaleur en régime transitoire. Elle est liée en régime stationnaire à la conductivité thermique suivant la relation.

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad (2.15)$$

En plus, la diffusivité thermique mesure la rapidité avec laquelle un corps peut changer de la température. Elle augmente avec la capacité d'un corps à conduire de la chaleur à travers la conductivité thermique et diminue avec la quantité de chaleur nécessaire pour changer la température d'un corps. Ainsi la diffusivité est fonction de la nature du matériau et d'autres paramètres physiques (la température, masse volumique, etc.)

4.5.4. Effusivité thermique

L'effusivité est la capacité d'un matériau à échanger de l'énergie thermique avec son environnement. Elle décrit la vitesse à laquelle varie la température en surface du matériau. Dans le cas des bâtiments, et plus particulièrement en hiver, cette grandeur est importante pour la notion de confort thermique. Une paroi à forte effusivité pourra entraîner une sensation de mur froid car le matériau aura tendance à absorber rapidement la chaleur. Son expression est donnée par la relation suivante :

$$E = \sqrt{\lambda \rho C_p} \quad (2.16)$$

L'unité de l'effusivité dans le système international est ($J/K \cdot m^2 \cdot s^{1/2}$).

4.6. Transfert de chaleur dans les milieux poreux

Les bétons ou tous matériaux cimentaires sont considérés comme des milieux poreux. La matrice cimentaire constitue la matrice solide du matériau, la porosité peut être saturée en fluide (air et/ou eau). De ce fait, nous pouvons considérer que, à priori, les trois modes de transfert thermique, cités plus haut, prennent lieu : la conduction dans le squelette solide et la convection de fait dans les fluides remplissant les pores. Certains auteurs (L. H. Nguyen. 2013) [62] considèrent que les transferts thermiques au sein des matériaux cimentaires sont plus complexes que pour les autres milieux composites dans la mesure où même certaines composantes du système peuvent être eux-mêmes assimilés à des milieux poreux.

Dans les milieux poreux à température et pression ambiantes, la convection et le rayonnement dans les pores sont souvent supposés négligeables, surtout devant les transferts par conduction au sein des différentes phases (V. Cermak et al. 2000) et (J. V Brakel. 1975) [63-64].

Certains auteurs rapportent cependant que la contribution de la convection naturelle aux transferts thermiques devient non négligeable à partir d'un seuil donné de diamètre de pores. (B. Naitali .2005) [65]. C'est uniquement un transfert à conduction pur à travers les différentes phases qui sera pris en compte. Nous nous intéresserons en particulier à la conductivité thermique du matériau, qui est la principale caractéristique régissant ce mode de transfert et qui permet de décrire de manière assez directe le pouvoir isolant ou conducteur.

De nombreux facteurs peuvent influencer la conductivité thermique, parmi ces facteurs on peut citer : La porosité, la texture poreuse, taille des grains et des pores, contact entre grains, teneur en eau, présence d'ions, sels et autres solutés, la composition minéralogique, nature des matériaux et la température. (Charles Danquigny .2003) [50].

Dans ce travail bibliographique on s'intéresse seulement à l'influence de trois facteurs qui sont la porosité, la composition minéralogique et la température

4.6.1. Effets de la porosité et de la composition minéralogique

Les bétons ou les bétons à agrégats recyclés sont constitués par un ensemble de particules solides entourées de vides. Les particules solides sont des grains de différents minéraux alors que les vides peuvent être remplis d'eau, d'air ou d'air et d'eau en proportions variables. La structure de ces matériaux est un paramètre important, car l'arrangement des particules solides a un impact sur la direction de propagation du flux de chaleur. En effet, le nombre et la nature des contacts entre granulats forment un facteur influençant la conductivité

thermique effective du matériau. Un matériau solide possède, donc une certaine distribution de la taille et de la forme de ses particules qui détermine sa densité, porosité et distribution des rayons de pores. Ces propriétés vont à leur tour affecter la propagation du flux de chaleur.

Par conséquent, la conductivité thermique a ainsi tendance à augmenter ou abaisser en fonction de la masse volumique (densité) (Horai & Simmons 1969, Moufakir et al. 2020) [66-67].

De même, la composition chimique et minéralogique des agrégats du solide joue un rôle significatif dans le comportement thermique. Chaque matériau constituant un béton possède des propriétés thermiques différentes ; les plus importants étant donnés dans le Tableau 2.1

Nous constatons que le quartz a la plus grande conductivité thermique tandis que l'air est le milieu le moins conducteur.

Tableau 2.1 : les propriétés thermiques pour quelque Minéraux

Matériau	ρ (g /cm ³)	c (J/Kg.k)	λ (W/m.k)
Quartz.....	2.65	733	8.4
Minéraux.....	2.65	733	2.9
Matière organique....	1.3	1926	0.25
Eau.....	1.00	4185	0.6
Air.....	0.0012	1005	0.026
Verre.....	2.2	800	1.05
Calcaire.....	2.7	850	1.4

4.6.2. Influence de la température sur la conductivité thermique et la chaleur spécifique

La détermination des propriétés thermiques comme la conductivité et/ou la chaleur spécifique permet d'estimer la distribution de la température dans un matériau, et donc de prévoir la distribution des contraintes et des instabilités thermiques qui peuvent en résulter.

À notre connaissance, il y a peu de travaux sur l'effet de la température, à base et à haute température sur ses deux paramètres thermo physiques.

Cependant, La nature des granulats a une influence non négligeable sur ces paramètres (Cléo LANEYRIE .2014) [68]. Dans le présent travail, le béton à granulats naturels et le béton à granulats recyclés ont une nature minéralogique approximativement similaire. En

effet, le matériau béton, de par la grande variété de ses composants et de sa microstructure, présente des propriétés qui évoluent fortement avec la température.

Plusieurs chercheurs ont effectués des mesures de chaleur spécifique en fonction de la température sur différents bétons secs. Si les résultats divergent quelque peu, notamment à cause de la variété de nature des granulats utilisés, tous s'accordent à dire que la chaleur spécifique des bétons augmente avec la température (Coop et al .1977) [66] et (Bazaet al .1996) [69]. Lorsque la mesure est effectuée en conditions isothermes, cette augmentation est attribuée à l'endommagement du béton et l'apparition de fissures ou de porosité. En effet, la chaleur spécifique de l'air ($1005 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) étant supérieure à celle du béton ($880 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), l'augmentation du volume d'air dans le matériau entraîne un accroissement de la valeur globale de chaleur spécifique.

4.6.3. Effet de l'eau sur la conductivité thermique

La teneur eau a un effet à complexe et important sur le transfert de chaleur en généralement. Elle dépend fortement de la température. Elle se trouve sous trois états : liquide, solide et ou vapeur (Winterkorn et al. 1946) [70]. La figure 2.8 illustre et explique le phénomène de transfert thermique dans un milieu poreux en fonction de sa teneur en eau.

En l'absence de l'eau, les contacts entre grains sont étroits (contact rouge) et le trajet d'un bord à l'autre de la section est plus long. Au fur et à mesure que la teneur en eau augmente, les contacts s'élargissent, entraînant une augmentation de la conductivité thermique.

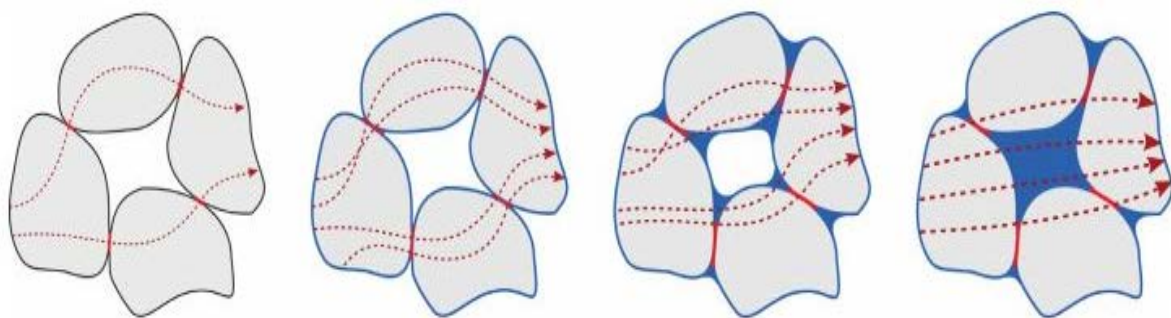


Figure 2.8 : Illustration schématique des transferts thermiques dans un milieu poreux.

En raison de faibles teneurs en eau, l'eau est retenue avec une extrême ténacité à la surface des particules solides. Lorsque tous les granulats sont imprégnés de cette fine couche

d'eau (Figure 2.8), l'eau va alors prendre place au contact entre granulats et ainsi créer des sortes de ponts entre ces derniers ; favorisant le transfert de chaleur.

Une augmentation de la teneur en eau se traduit alors par une diminution de la force de tension qui s'exerce entre les particules solides et l'eau. Dans les sables par exemple la conductivité thermique augmente rapidement avec l'augmentation de la teneur en eau et c'est de manière plus générale.

4.7. Propriétés mécaniques

4.7.1. La résistance à la compression

La résistance à la compression est l'une des propriétés mécaniques les plus importantes pour identifier le comportement d'un béton ou autre matériaux de génie civil. Plusieurs techniques et appareils peuvent mesurer ces grandeurs physiques suivant un protocole normalisé. Le principe de cet essai est de déterminer et de savoir si la capacité d'un matériau ou d'une structure peut supporter les charges qui tendent à réduire sa taille par compression. Nous avons présenté des travaux bibliographiques, de plusieurs auteurs sur ce concept mécanique dans, le chapitre 1. La technique de mesure et les résultats expérimentaux, de notre travail, concernant ce paramètre sont présentés dans le chapitre 3 et chapitre 4 respectivement.

4.7.2. Essai de traction

Cet essai permet de déterminer la Limite élastique et la résistance à la rupture des différents matériaux. Il consiste à soumettre à 20°C une éprouvette de longueur l à un effort de traction, progressivement croissant, généralement jusqu'à la rupture de l'éprouvette. À chaque ajout d'effort, la contrainte normale et la déformation de la barre sont portées sur une courbe. Cette opération est effectuée régulièrement jusqu'à la rupture de la barre. On obtient ainsi la courbe contrainte - déformation caractérisant le matériau.

La formulation de la contrainte de traction $[\text{MP}_a]$ est donnée par la relation suivante :

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (2.17)$$

Avec :

F : effort de traction [N]

S₀ : section initiale de l'éprouvette [mm²]

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques formulations et une synthèse sur les milieux poreux et les matériaux composite ainsi que leurs caractéristiques. Nous avons aussi donné quelques généralités sur les bétons naturels, leurs compositions et l'intérêt de ces matériaux dans le secteur de bâtiments et travaux publics. Une généralité sur le transfert de chaleur dans les milieux continus et discontinus a été présentée. L'exposition de certaines propriétés thermo-physiques et mécaniques ont été aussi exploités.

Le prochain chapitre, permettra d'établir une série d'analyses et de caractérisations physico- chimiques, thermiques, thermophysiques et mécaniques pour des échantillons préparés à base de granulats recyclés.

**Chapitre III. Caractérisations
physico- chimiques et
thermophysiques des matériaux
étudiés**

Introduction

Dans le présent chapitre, nous définirons les déchets étudiés ainsi que les conditions de préparation des échantillons et l'ensemble des techniques expérimentales ayant permis de caractériser les différents échantillons élaborés au cours de ce travail.

Tous les échantillons sont préparés avec les normes nationales au Laboratoire Public d'Essais et d'Études (LPEE) au laboratoire de béton de Casablanca - Maroc. De même, les mesures mécaniques sont aussi effectuées dans le même laboratoire cité ci-dessus durant des mois de stage.

Les analyses thermo physiques (conductivité thermique, la chaleur spécifique, la diffusivité thermique et l'effusivité thermique) ont été effectuées au laboratoire thermodynamiques énergétique – département de physique Faculté des Sciences Université Mohamed 5 de Rabat.

Les analyses chimiques minéralogiques et thermiques sont réalisées durant mon parcours d'échange doctoral entre Université Mohammed 5 et VUB Faculté d' Ingénieries à Bruxelles.

Les laboratoires d'accueils sont : Laboratoire des matériaux de la Faculté d'ingénierie VUB vrije universitat de Bruxelles et laboratoire 4MAT ULB (Materials Engineering, characterization, synthesis and recycling) école polytechnique de Bruxelles ULB Université libre de Bruxelles ».

Matériaux utilisés et méthodes d'essais

1. Déchets utilisés

Les déchets de béton à recycler sont issus des bétons déjà utilisés dans un ancien bâtiment démoli (figure 3.1) récemment à proximité du centre de la ville de Rabat (Maroc).



Figure 3.1 : Type de déchets étudiés (Chantier étudiant Rabat Maroc)

Ces déchets sont concassés et broyés afin d'obtenir une granulométrie de même dimensions que celle de sable naturel utilisé dans le béton naturel. Le nouveau béton obtenu est un béton à agrégat recyclé. Ses caractéristiques seront comparées à celle de béton naturel de référence.

2. Préparation des échantillons

Cinq types d'échantillon sont préparés dont 1 du béton normal de référence (B25) et 4 du béton valorisé de type B25 également pour l'ensemble des tests. Le béton de type B25 a une résistance à la compression de 25MPA

Tous les échantillons sont préparés aux normes nationales au Laboratoire Public d'Essais et d'Etudes (LPEE) exactement au laboratoire du béton casablanca –Maroc

2.1. Dosage des composants

Tous Les échantillons, sont préparés suivant la méthode de Dreux-Gorisse (DREUX. G, FESTA.J. 1995) [71]. Vu que le béton en étude et le B25, le dosage sera fait sur les composants : ciment C, Eau E, Sable S, Gravier G, Gravillon g et adjuvent A.

Admettons que le dosage des composants pour le béton normal de type 25 est le suivant :

$$(C + E + S + G + g + A) \quad (3.1)$$

Comme il a été précisé, l'introduction du béton se fait dans la fraction du sable S et donc pour chaque type de béton valorisé, on a gardé les mêmes quantités de C, E, G, g et A. Etant donné que x% est le pourcentage de déchets D qui doit être introduit, le dosage des composants pour chaque échantillon de béton est :

$$(C + E + G + g + A + [x\% D + (100\% - x\%)s]) \quad (3.2)$$

Avec :

$$(x\% D + (100\% - x\%)s = S) \quad (3.3)$$

Les pourcentages de déchets valorisés visés pour cette étude sont : 5%, 10%, 15% et 20%.

2.2. Moulage des échantillons

Après malaxage des compositions des bétons (Figure 3.2), La pâte du béton est récupérée (Fig 3.3) puis distribuée sur des moules cylindriques de dimension 300 Cm x 150 Cm. Les échantillons subissent des vibrations par un vibreur électrique afin d'éliminer le vide,



Figure 3.2 : Le malaxage des différents constituants d'un béton (LPEE Casablanca)



Figure 3.3 : la pâte du béton récupéré (LPEE Casablanca)

Ces échantillons ont été gardés dans une salle normalisée à température 20 ± 2 °C pendant 24h jusqu'à durcissement. Par la suite, les échantillons sont mis dans des bains d'eau Figure 3.4 afin d'éviter toute éventuelle réaction. L'ensemble de cette opération dure 28 jours.



Figure 3.4 : Échantillonnage de béton dans les bains d'eau pour 28 jours. (LPEE Casablanca)

Ces échantillons cylindres sont destinés à l'essai de compression .Tandis que pour les essais de porosité et de diffusion les cylindres ont été carottés 5cm x 10cm (figure. 3.5.). Et pour la conductivité thermique et la chaleur spécifique Les cylindres ont été carottés 5cm x 3.23 cm.



Figure 3.5 : cylindres destinés pour la compression ,porosité et la diffusion.

Les analyses chimiques minéralogique et thermique (ATD.ATG.DSC) les échantillons sont broyés sous forme de poudre destinée aux conditions des appareils (figure. 3.6).

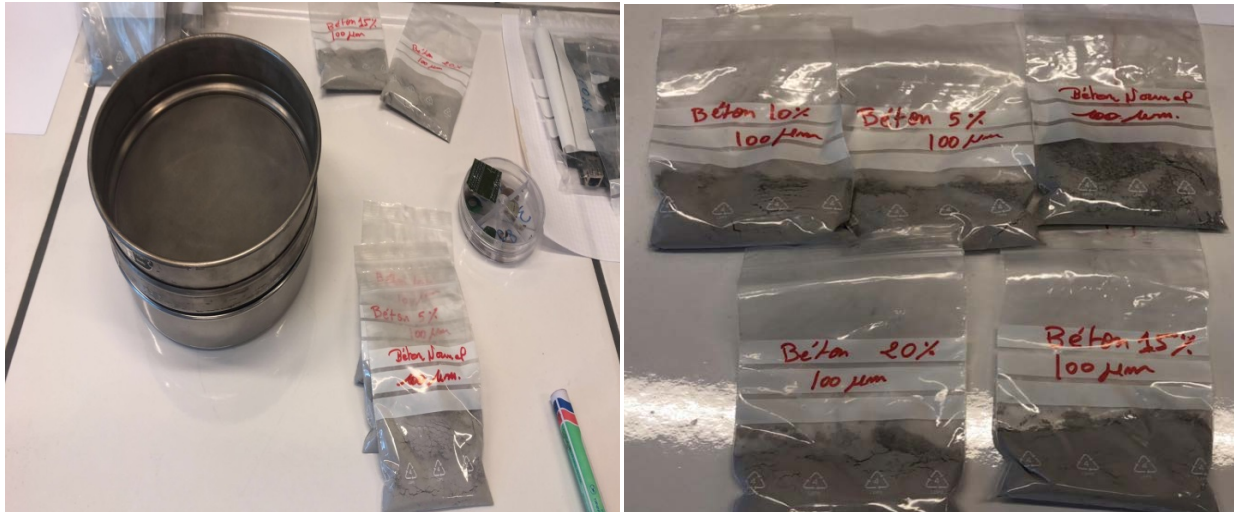


Figure 3.6 : échantillonnage destinés pour les analyses chimiques (VUB Bruxelles).

3. Détermination du rapport C/E

Le dosage en eau est un facteur très important de la composition du béton. Il a une influence sur la porosité à cause des vides créés, lorsque l'eau s'élimine évaporation, combinaison chimique et absorption par les granulats.

Dans le Tableau 3.1 nous présentons l'ensemble des résultats de calcul de rapport C / E pour nos échantillons de béton calculés par la formule de Bolomey suivante (Eq 3.4) :

$$(\sigma'_{28} = G' \sigma'_c (C/E - 0.5)) \quad (3.4)$$

Avec :

σ'_{28} = Résistance moyenne en compression du béton à 28 jours en MPa

σ'_c = Classe vraie du ciment à 28 jours en MPa

C = Dosage en ciment en kg par m³ de béton

E = Dosage en eau total sur matériau sec en litre par m³ de béton

G' = Coefficient granulaire fonction de la qualité et de la dimension maximale des granulats.

Le tableau suivant détermine le Rapport ciment sur eau : $C / E = 0.55$

Tableau 3.1 : Résultat de calcul Du rapport C / E pour le béton

ETUDE FORMULATION DU BETON B25									
COMPOSITION DE BETON									
proportion granulaire			proportion granulaire						
Sable Concassé			46						
gravillon GI			26						
gravillon GI			28						
G/S			1,2						
Masse en m ³		Eau	WA24	MV	Volume 1000l	Gachée 80 litre	Teneur en eau	Gachée corrige	
AT1 N°11	Eau	205	Eff	***	1	205	8,20	6,93	
	ciment	350	192	***	2,80	125	14,00	14,00	
	Ms.c	838	Etot	1,2	2,72	308	33,53	34,81	
	MGI	474	205	0,3	2,72	174	18,95	18,95	
	MGI	510	Eff/Ciment	0,3	2,73	187	20,41	20,41	
	Adjuvant (MEGA45) 0,4 %	1,40	***	***	1,06	1,32	0,06	***	0,056
	Masse volumique théorique	2379	0,55	***	***	1001	***		

4. Essai d'affaissement

Un essai d'affaissement est obligatoire pour permettre d'apprécier la maniabilité du béton ou le classer. Cette maniabilité dépend surtout de la quantité d'eau. Le principe d'affaissement est présenté dans la figure 3.7. Le mode opératoire est le suivant :

- huiler légèrement le moule, et humecter la plaque de base. Fixer le cône sur la plaque.
- Remplir le cône de béton
 - 3 couches de hauteurs sensiblement égales ;
 - Chaque couche piquée (traversée) de 25 coups de tige
 - Arroser la dernière couche avec la tige de piquage
- Démouler (soulever sans lenteur excessive, et sans brutalité)
- Laisser le mouvement d'affaissement se stabiliser (1 minute environ)

Après avoir mesuré la nouvelle hauteur, au point le plus haut du béton, l'affaissement noté A.

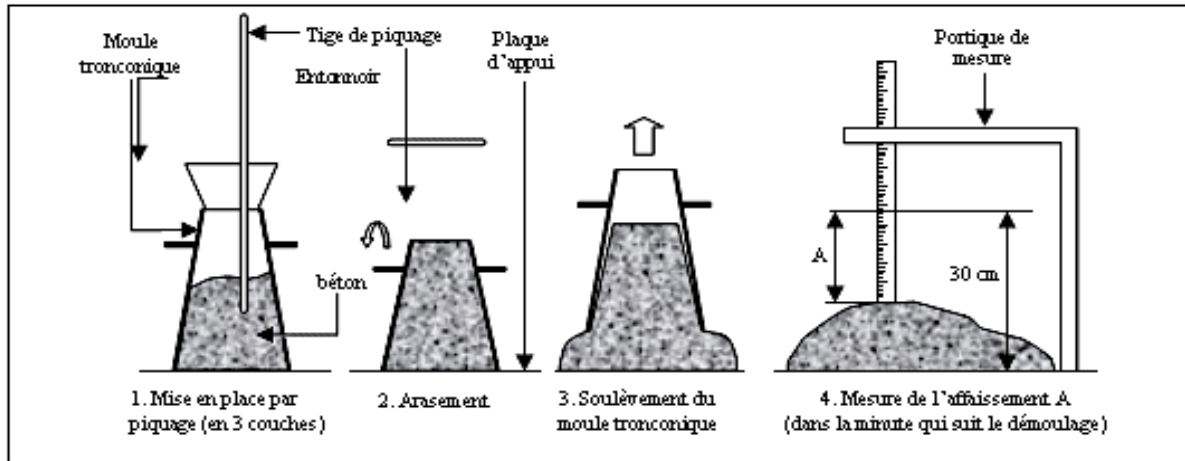


Figure 3.7 : Principe d'affaissement

L'essai d'affaissement appliqué pour l'ensemble des échantillons en étude est de 200 mm, et donc il s'agit d'un béton de classe S4. Le béton de classe S4 est destiné, dans les ouvrages : aux fondations, dalles, voiles avec forte densité de ferrailage. (N. Roussel .2006)

5. Caractérisation chimique et minéralogique

5.1. microscopie électronique à balayage (MEB) couplé à EDX

Le microscope électronique à balayage (MEB) est un type de microscope électronique qui image la surface de l'échantillon en le balayant avec un faisceau d'électrons à haute énergie dans un motif de balayage matriciel. Les électrons interagissent avec les coquilles des atomes qui composent l'échantillon, produisant des signaux contenant des informations sur la topographie de la surface de l'échantillon, sa composition et d'autres propriétés telles que la conductivité électrique.

Les types de signaux produits par un MEB comprennent les électrons secondaires (SE), les électrons rétrodiffusés (BSE), les rayons X caractéristiques, la lumière (cathodoluminescence), le courant de l'échantillon et les électrons transmis (STEM). L'imagerie SE est généralement le mode de détection le plus courant ou standard. La taille du spot dans un MEB à émission de champ est plus petite que dans un SEM conventionnel et peut donc produire des images à très haute résolution, révélant des détails de l'ordre de 1 à 5 nm.

L'appareil utilisé est Le Hitachi SU 70 (figure 3.8) est un FESEM semi-intégré avec un canon à électrons Schottky. Le SU 70 du CREST de l'Institut FOCAS dispose de capacités d'imagerie SE, BSE, STEM et en mode de décélération et est également équipé d'Oxford Instruments EDX et WDS. Ces composants analytiques fournissent des informations

complémentaires en termes d'analyse élémentaire, d'analyse de points de composition et de cartographie. Le SU 70 permet également une imagerie de charge réduite et une imagerie basse tension. Les spécifications techniques du MEB sont :

- Résolution d'image des électrons secondaires 1.0nm / 15kV
- Agrandissement 20x - 800.000x
- Courant de la sonde 1pA - 200nA
- Taille de l'échantillon 200 diamètres maximum.

Le SU 70 est équipé d'un détecteur EDX à dérive au silicium Oxford Instruments 50 mm² X-Max. Ce détecteur permet d'effectuer l'analyse à des taux de comptage élevés. Outre la capacité EDX, le SU 70 FESEM dispose également d'un spectromètre WDS, qui est monté avec un cercle Rowland horizontal et incliné. Les deux techniques utilisent les rayons X caractéristiques générés à partir de l'échantillon dans la colonne FESEM. Le traitement du signal génère un spectre, permettant l'identification des constituants élémentaires de l'échantillon. L'analyse quantitative peut être effectuée sur des échantillons propres, polis et plats dans lesquels les hauteurs ou les zones des pics sont comparées dans l'inconnu à un matériau standard. WDS permet de résoudre les lignes qui sont obscurcies par les chevauchements de pics dans EDX.



Figure 3.8 : Hitachi SU 70 appareil pour mesurer MEB avec EDX « au Laboratoire 4MAT ULB (Materials Engineering, characterization, synthesis and recycling) école polytechnique de bruxelles ULB Université libre de Bruxelles ».

5.2. Diffraction des rayons X (DRX)

La diffraction des rayons X (DRX) est une puissante technique sans effets destructeurs destinée à caractériser les matériaux cristallins. Elle donne des informations sur les structures, les phases, les orientations privilégiées du cristal (texture) et d'autres paramètres structurels comme la taille moyenne du grain, la cristallinité, la tension et les défauts des cristaux. Les pics de diffraction des rayons X sont produits par interférence constructive d'un faisceau monochromatique de rayons X diffusé à des angles spécifiques de chaque jeu de plans réticulaires compris dans un échantillon. Les intensités des pics sont déterminées par la distribution des atomes à l'intérieur du réseau. Par conséquent, le schéma de diffraction des rayons X est l'empreinte digitale du dispositif atomique périodique dans un matériau donné.

L'appareil utilisé est D8 Advance bruker (figure 3.9) D8 ADVANCE est la nouvelle génération de produits de diffraction des rayons X de Bruker AXS. Le D8 ADVANCE est un outil avancé et efficace pour les tâches analytiques en diffraction des rayons X. Sa conception ergonomique et simple facilite son utilisation. Ses Caractéristiques techniques et de réglages utilisés sont :

- Goniomètre : Géométrie "Bragg-Brentano" en Theta-Theta (l'échantillon reste toujours horizontal), Diamètre de focalisation : 500 mm
- Tube à rayons X "Céramique" : Anode Cu, alimentation du tube : 33 kV & 45 mA
- Détecteur PSD (Position Sensitive Detector) : Vântec-1 "super speed" basé sur la technologie mikrogap™
- Fentes : En entrée : Fente de divergence variable (à partir de 0.1°), fentes de Soller . Dispositif "Anti-Air Scatter" (AAS) démontable : suppression de la diffusion aux petits angles. Couteau-puits permettant de couper le faisceau direct. En sortie : Fentes de Soller, filtre nickel (Ni 0.5), ouverture 3° sur PSD (capacité d'ouverture jusqu'à 12°)
- Passeur automatique à 9 positions : Possibilité de rotation Phi de l'échantillon ("spinner")
- Domaine angulaire exploitable : de 0.5° à 150° (en 2 Theta)

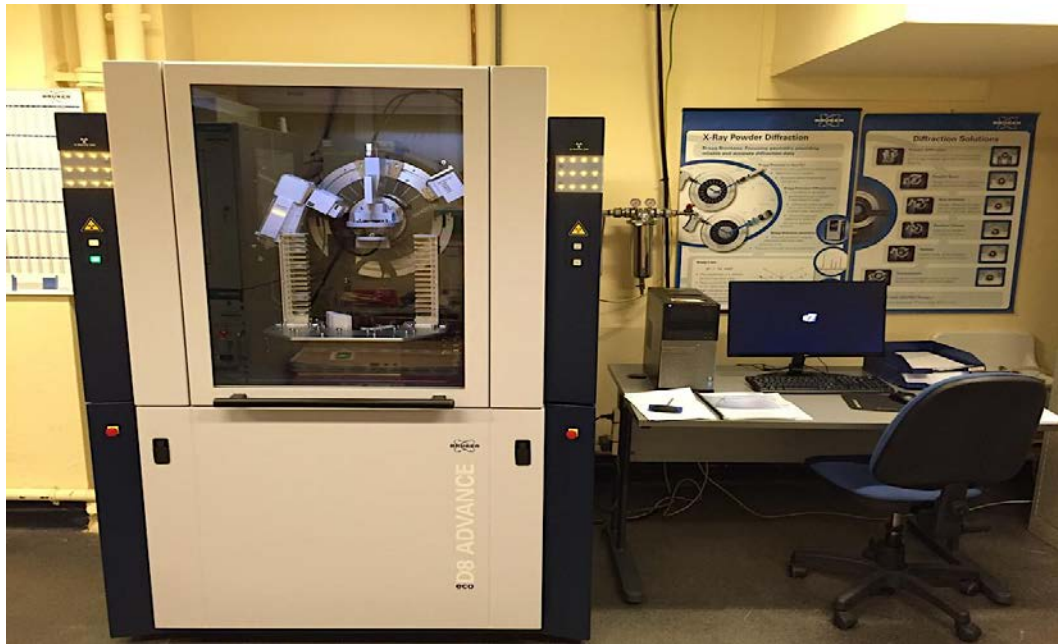


Figure 3 .9 : D8 Advance bruker appareil pour mesurer DRX « au Laboratoire 4MAT ULB (Materials Engineering, characterization, synthesis and recycling) école polytechnique de bruxelles ULB Université libre de Bruxelles ».

5.3. Spectrométrie de fluorescence X

La fluorescence des rayons X (XRF) est une technique non destructrice qui sert à quantifier la composition élémentaire des échantillons solides et liquides. On utilise les rayons X pour exciter les atomes qui sont dans l'échantillon, ce qui leur fait émettre des rayons X à énergie caractéristique de chaque élément présent. L'intensité et l'énergie de ces rayons X sont ensuite mesurées.

XRF est capable de détecter des éléments dans des concentrations de Be-U allant de quelques ppm (parties par million) à 100 %. Comme on se sert de rayons X pour exciter l'échantillon, il est possible d'analyser des profondeurs d'une taille atteignant 10 μ m. Grâce à l'utilisation d'une norme de référence appropriée, l'analyse XRF peut quantifier avec exactitude la composition élémentaire d'échantillons à la fois solides et liquide.

L'appareil utilisé est D8 TIGER (figure 3 .10) L'échantillon est bombardé de rayons X. L'échantillon est alors excité pour générer des rayons X fluorescence. Les rayons X "tirent" l'individu des électrons provenant des atomes des éléments, principalement à partir de l'enveloppe atomique interne K et L. Les postes vacants qui en résultent sont pourvus par des électrons de plus haute énergie des coquillages. L'énergie excédentaire de ces électrons est alors émise sous forme de rayons X le rayonnement de fluorescence. Ce rayonnement est caractéristique de chaque élément comme un et indépendant de l'empreinte digitale de l'atome

liaison chimique. L'intensité du rayonnement est proportionnelle à la concentration de l'élément dans l'échantillon.



Figure 3.10 : D8 TIGER appareil pour mesurer XRF « au Laboratoire 4MAT ULB (Materials Engineering, characterization, synthesis and recycling) école polytechnique de bruxelles ULB Université libre de Bruxelles ».

5.4. La diffusion de chlorure

Un potentiel électrique externe de 20V et 30V est appliqué à travers l'échantillon et force les ions chlorure à migrer dans l'échantillon. Après une certaine durée de l'essai, l'échantillon est coupé parallèlement à son axe. Une section est recouverte d'une solution de nitrate d'argent pour déterminer la distance de pénétration des ions chlorure (précipitation de AgCl_2).

L'instrument de mesure est PROOVE'it (Germann Instruments) (figure 3.11) (NT BUILD 208) (Tang, L et al 1998) [72-73].

La méthode exige des échantillons cylindriques d'un diamètre de 100 mm et d'une épaisseur de 50 mm, tranchés à partir de cylindres moulés ou de carottes percées d'une longueur minimale de 100 mm. Les cylindres et les carottes doivent répondre aux exigences décrites Dans NT BUILD. (201) et NT BUILD. (202) [74-75] à respectivement. Trois échantillons doivent être utilisés pour l'essai.

Et à partir de cette profondeur, le coefficient de diffusion est calculé à partir de la relation suivante :

$$\left(D = \frac{RT}{zEF} \cdot \frac{Xd - \alpha \sqrt{Xd}}{t} \right) \quad (3.5)$$

$$\text{Avec } E = \frac{U-2}{L} \quad ; \quad \alpha = 2 \sqrt{\frac{RT}{zFE}} \cdot \text{erf}^{-1}\left(1 - \frac{2Cd}{C_0}\right)$$

D : migration coefficient. (m^2/s)

Z : absolute value of ion valence. For chloride $.Z=1$

F : faraday constant. $F=9.648 \times 10^4$ (J/V.Mol)

U : absolute value of the applied voltage. v:

R : gas constant $.R=8.314$ (J/K.Mol)

T : average value of the initial and final temperatures in the anolyte solution .k

L : thickness of the specimen.m;

x_d : average value of the penetration depths.m;

t : test duration. Seconds;

erf: inverse of error function;

c_d : chloride concentration at which the colour changes. $c_d=0.07$ N for OPC concrete;

c_0 : chloride concentration in the catholyte solution. $C_0= 2$ N



Figure 3.11 : Appareil pour mesurer la diffusion de chlorure « au Laboratoire du béton LPEE Casablanca- Maroc».

6. Caractérisation thermo-physique

6.1. Analyse Thermique Différentielle couplée à l'analyse thermogravimétrique (ATD-ATG -DSC)

L'analyse thermique différentielle (ATD) est une méthode permettant de déterminer les températures et les quantités de chaleur dégagées correspondant aux modifications du matériau en fonction de la température. Le principe de cette analyse consiste à suivre l'évolution de la masse d'un échantillon de matériau soumis à une élévation de température dans un four. Cette température peut aller jusqu'à 1000°C. La perte de masse est suivie par une mesure continue à l'aide d'une balance. A la fin de l'essai, on obtient une courbe donnant l'évolution de la masse en fonction de la température. La représentation de la perte de masse sous la forme de sa dérivée par rapport au temps (dTG), met en évidence les différents pics de décomposition des phases constituant le matériau.

L'appareil utilisé est Netzsch TG – DTA. DSC (figure 3.12) L'analyseur thermique simultané NETZSCH STA 449 F3 NEVIO est particulièrement étudié pour la mesure des variations de masse et des effets thermiques variant entre -150°C et 1000°C. Ce système d'analyse thermique est capable de traiter tous les types de matériaux comportant des substances hétérogènes grâce à ses différents capteurs, à la grande variété de creusets et à la large gamme de pesée. Il est présenté avec des portes échantillons facilement interchangeables pour l'adapter aux différents domaines d'application (TG, TG-ATD et TG-DSC). Cet analyseur thermique simultané comporte différents fours, facilement interchangeables par l'opérateur, couvrant une plage étendue de température. Grâce à son design étanche au vide, ce système d'analyse thermique est capable d'effectuer les mesures sous atmosphères contrôlées (ex. inerte) sont possibles. Les Caractéristiques techniques sont :

- STA 409 PC/4/H Luxx Limite de travail de température ambiante à 1500°C.
- Le four peut travailler avec différentes atmosphères contrôler avec boîte à gaz à 3 voix.
- Couplé avec un spectromètre de masses Aëolos QMS 403 C
- Couplé avec un FTIR Bruker. Vertex 70



Figure 3.12 : Netzsch TG – DTA . DSC appareil « au Laboratoire des matériaux faculty of engineering vrije université de bruxelles VUB ».

6.2. La conductivité thermique

Les mesures des propriétés thermo physiques, telles que la conductivité et la chaleur spécifique des matériaux de construction utilisés dans la réalisation du prototype sont effectués à l'aide d'un appareil de mesure CT-Mètre (3.13). Cet appareil est développé par le SCTB, conforme à la norme NF EN 993-15.(2005) [76].

La méthode de l'anneau chaud permet d'estimer la conductivité thermique et la chaleur spécifique d'un matériau à partir de l'évolution de la température mesurée par un thermocouple placé à proximité d'un fil résistif. (Samaouali .2011)

La sonde (3.14), constituée d'un fil résistif et d'un thermocouple dans un support isolant en kapton, est positionnée entre deux échantillons du matériau à caractériser, utilise cette méthode avec les critères suivants :

- Conductivité de 0,02 à 5 W.m-1.K-1 ;
- Température de mesure de -20 à 80 °C;
- Échantillons : au moins 80 × 40 mm, d'épaisseur pour les Isolants à quelques centimètres pour les conducteurs.

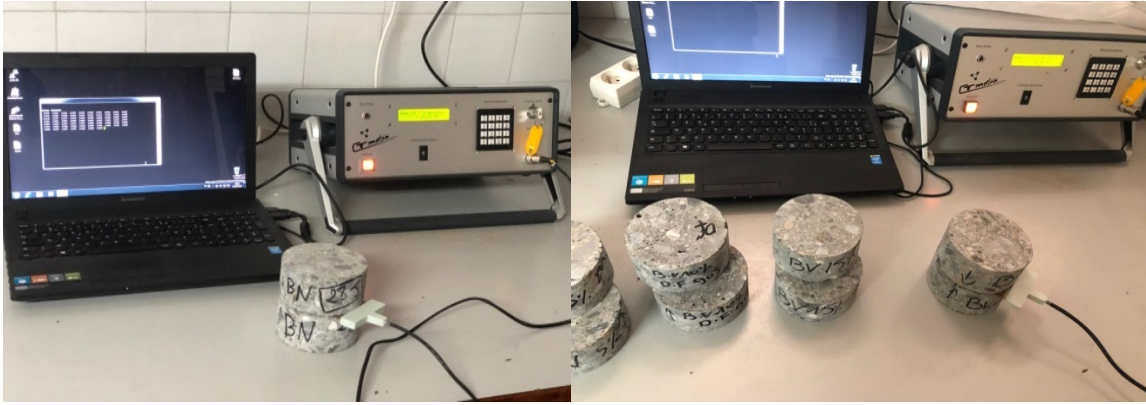


Figure 3.13 : Appareil de mesure CT-Mètre et la sonde cylindrique utilisé.

CT-Mètre : Appareil du Laboratoire de thermodynamique - énergie, Centre de l'énergie, Faculté des sciences, Université Mohammed V, Rabat, Maroc.



Figure 3.14: La sonde à anneaux

6.3. la chaleur spécifique

Suivant la norme ISO 8894-1, la mesure de la de la chaleur spécifique a été effectué en utilisant l'appareil Conductivité mètre (CT mètre) Figure (3.13) en régime transitoire grâce à l'utilisation des sondes à choc thermique figure 3.14.

L'échantillon de dimensions 5 cm de diamètre x 3,23 cm de hauteur (est excité par un signal d'entrée obtenu par un élément chauffant, la réponse du matériau sera recueillie en utilisant un couple thermo électrique affichages sur l'écran de système d'acquisition des donnée.

Il s'agit de la chaleur qu'un matériau peut stocker par rapport à son volume. C'est la quantité de chaleur qui peut augmenter la température de 1°C d'un mètre cube de matériau. (S. Contrerasa .1998) (Fabien Roget.2012). [77-78]. L'unité est la capacité thermique : (J / K.m³).

6.4. La diffusivité thermique

La diffusivité thermique caractérise la vitesse de propagation de la chaleur par conduction dans un matériau, elle dépend de la conductivité thermique et de la densité thermique spécifique d'un matériau donné (Geert De Schutter et al. 1999) [79].

Elle fait intervenir la conductivité thermique λ et la capacité thermique d'un matériau.

Plus la valeur de 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 est arrivée sur une face d'un mur et le moment où elle atteindra l'autre face est important. C'est une grandeur de l'inertie thermique. Mesuré par équation suivante :

$$\left(D = \frac{\lambda}{C} \right) \quad (3.6)$$

Avec :

λ = la conductivité thermique

C = la chaleur spécifique

6.5. l'effusivité thermique

L'effusivité thermique caractérise l'aptitude d'un matériau à changer de température lorsque il reçoit un apport d'énergie thermique. Deux phénomènes se conjuguent alors simultanément : l'énergie est absorbée localement en fonction de la capacité thermique du matériau et cette énergie est transférée aux régions voisines en fonction de la conductivité thermique du matériau. L'effusivité thermique est désignée par la lettre E et est le plus souvent exprimée en $J.K^{-1}.m^{-2}.s^{-1/2}$ (X. Zhang et al. 1999) [80] par la relation :

$$\left(E = \sqrt{\lambda C} \right) \quad (3.7)$$

Un matériau qui a une effusivité importante (métal, faïence, ...) absorbe rapidement beaucoup d'énergie sans beaucoup se réchauffer en surface. Inversement, un matériau avec une faible effusivité (bois, moquette, ...) se réchauffe rapidement en surface, mais absorbe peu de chaleur.

7. Caractérisation mécanique et Pétro-physique

7.1. La résistance à la compression

Pour les tests de résistance à la compression, un Sercomp7 (Germann Instruments) a été utilisé. Les différentes surfaces des cylindres d'essai ont été fraisées pour les rendre parallèles au plan.

Le principe de l'essai est de soumettre l'échantillon cylindrique à une force croissante et constante jusqu'à rupture de celle-ci afin de déterminer sa résistance à la compression. La vitesse constante de chargement varie de 0,2 MPa/s (N/mm². s) à 1,0 MPa/s (N/mm². s). La charge sans choc est appliquée et l'accroître de façon continue à la vitesse constante sélectionnée + ou -10 % jusqu'à la rupture de l'éprouvette. La charge maximale obtenue doit être enregistrée.



Figure 3.15 : test de résistance à la compression pour les cylindres du béton (LPEE Casablanca)

7.2. La porosité

La mesure de la porosité accessible à l'eau du béton durci est déterminée par la relation :

$$\left(\varepsilon = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \times 100 \right) \quad (3.8)$$

Le principe de mesure des différentes masses de l'échantillon est donné comme suit : l'échantillon est placé dans l'appareillage à vide. Après fermeture de ce récipient, il a fallu le vider jusqu'à une pression inférieure ou égale à 25 mbar et le maintenir jusqu'à pression constante. Le récipient est alors reconnecté à la pompe à vide pour introduire progressivement l'eau potable de façon que l'échantillon soit recouvert d'environ 20 mm d'eau pendant (48) h. La masse du béton immergé est donnée par la balance hydrostatique soit M_{eau} . Après l'avoir l'essuyer afin d'éliminer l'eau superficielle, sans toutefois retirer l'eau des pores, l'échantillon est pesé, on note M_{air} . Le corps d'épreuve est séché à $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ jusqu'à masse constante. La masse ainsi déterminée est la masse sèche M_{sec} . (Figure 3.16)



Figure. 3.16: test de Porosité (LPEE Casablanca)

Conclusion

La science des matériaux repose sur la relation entre les propriétés, la morphologie structurale et la mise en œuvre des matériaux qui constituent les objets qui nous entourent.

Caractériser les matériaux devient donc une nécessité. Notre étude s'est focalisée dans ce chapitre sur les principales caractéristiques des matériaux, ainsi que leurs propriétés mécaniques chimiques, électriques, thermiques, et minéralogique. Dans le chapitre suivant, nous analyserons et interpréterons nos résultats.

Chapitre IV. Résultats expérimentaux et Interprétations

Introduction

La détermination des propriétés des matériaux de construction se fait par l'utilisation de techniques de caractérisation qui sont standardisées et qui nécessitent de préparer des échantillons de géométries et de tailles normalisées.

Dans ce chapitre, nous présenterons les résultats de l'analyse expérimentale et par la suite nous allons interpréter et discuter les résultats obtenus en termes de caractérisations mécaniques, thermiques et chimiques examinées.

1. Caractérisation chimique et minéralogique

1.1. Résultats de la microscopie électronique à balayage (MEB) avec EDX

Dans notre étude, les observations au MEB sont faites en électrons rétrodiffusés (imagerie). L'imagerie permet un contraste chimique de l'échantillon. Elle donne une information sur le chimisme relatif des phases observées en niveau de gris. Ces nuances de gris sont intrinsèquement liées au poids atomique moyen des différentes phases observées et permettent de définir les zones à analyser (Hanaa Fares et al. 2011) (Stutzman P.E et al. 2004) [81-82].

L'analyse EDX permet d'identifier par dispersion d'énergie des photons X la composition chimique des zones définies au MEB. A cet effet, nous avons présenté, pour chaque zone analysée, un spectre global qui montre les éléments chimiques présents, une cartographie de ces éléments chimiques qui donne des informations sur leur répartition dans le granulat et un tableau de pourcentage en masse atomique de chacun de ces éléments chimiques.

Dans ce paragraphe, nous présentons les détails de l'analyse et les résultats intrinsèques aux échantillons étudiés pour les échantillons étudiés.

Le microscope électronique à balayage (MEB) a été utilisé pour observer la morphologie de l'échantillon. Les observations de la poudre représentée montrent une grande hétérogénéité concernant la morphologie des grains. Le microscope électronique à balayage (MEB) révèlent la présence des plaquettes hexagonales de forme réduite à des losanges dont la taille est de l'ordre de quelques micromètres. De plus, elles sont généralement empilées les uns sur les autres pour former les amas ayant des contours irréguliers et des tailles variables.

Il s'agit d'une morphologie rencontrée aussi bien pour les kaolinites mal cristallisées que pour des illites.

❖ Pour échantillons : Béton de référence

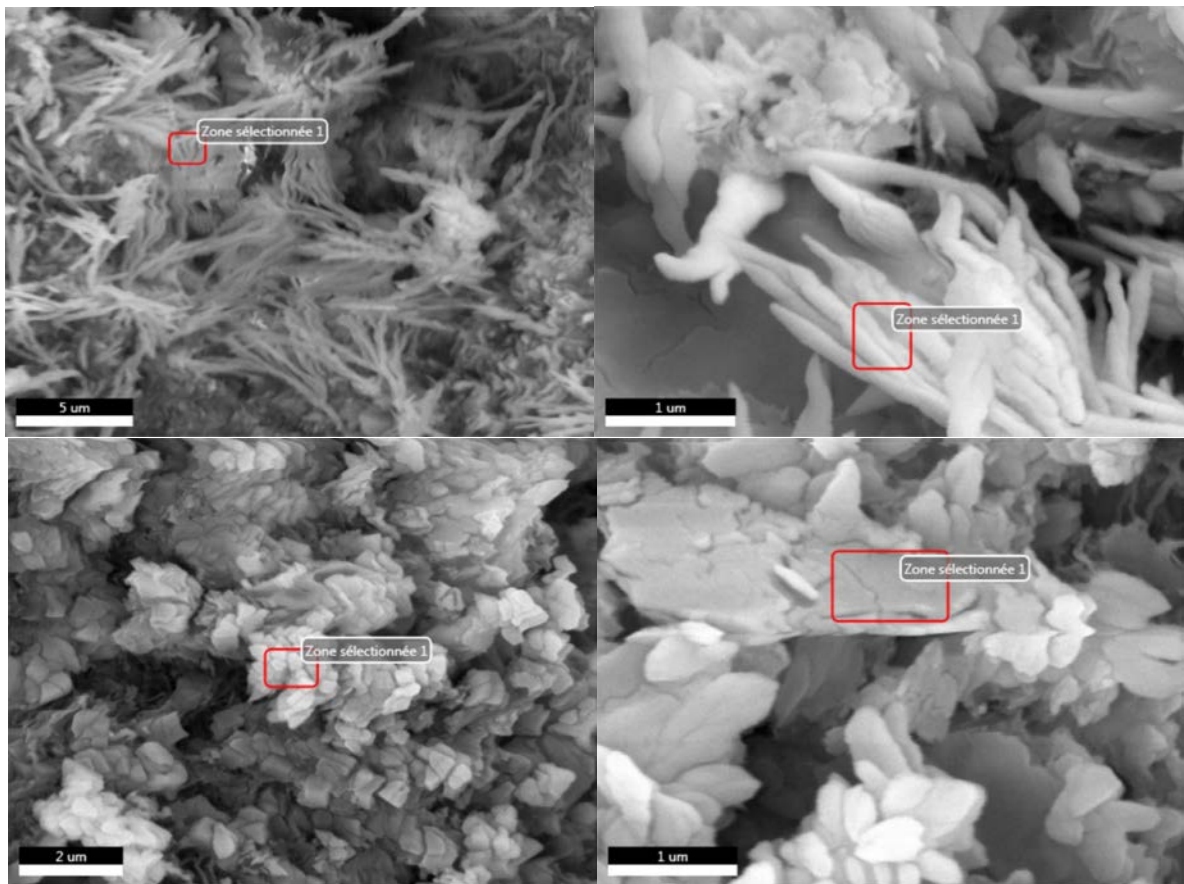


Figure 4.1 : (a) Micrographies électroniques à balayage – des échantillons béton de référence

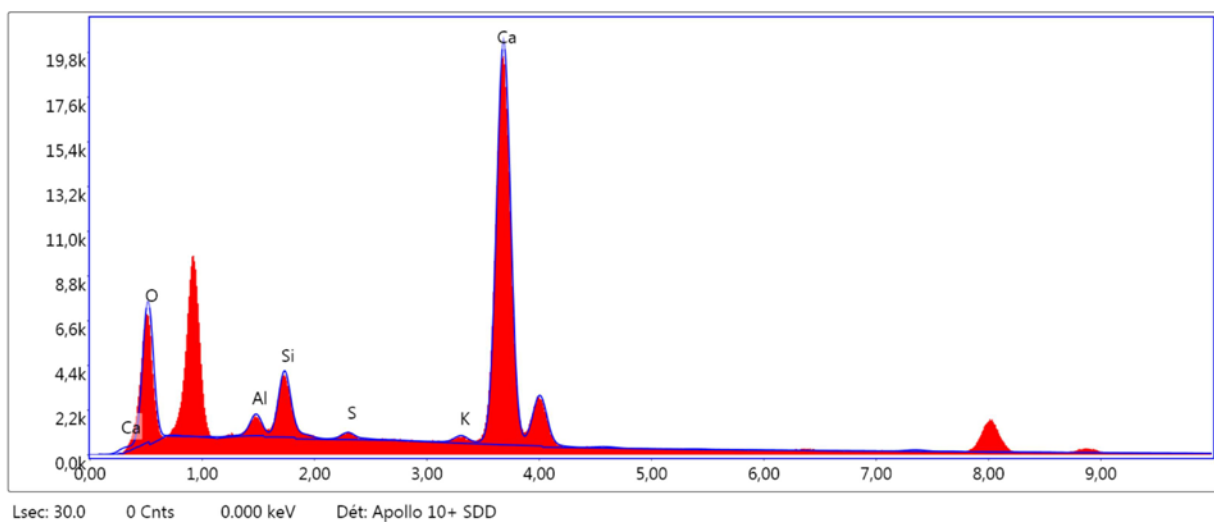


Figure 4.1 : (b) -Spectre de dispersion en énergie (EDX) des échantillons béton de référence

Elément	% de masse	% atomique	Intensité totale	Erreur %	Kratio	Z	A	F
O K	45.92	67.14	2791.44	10.09	0.0759	1.0827	0.1526	1.0000
AlK	1.23	1.07	449.42	7.14	0.0080	0.9579	0.6767	1.0044
SiK	3.52	2.93	1434.92	4.51	0.0270	0.9781	0.7808	1.0065
S K	0.42	0.31	151.67	13.12	0.0037	0.9562	0.9007	1.0174
K K	0.61	0.36	166.71	12.64	0.0058	0.9029	0.9865	1.0626
CaK	48.30	28.19	10352.91	1.82	0.4429	0.9185	0.9961	1.0025

Figure 4.1 : (c) Tableau des valeurs du Spectre de dispersion en énergie (EDX) des échantillons béton de référence.

Discussion :

Pour les clichés figures 4.1 (a) de la microscopie électronique à balayage, nous remarquons le développement d'une structure dont l'organisation augmente avec la résolution. De plus, dans le quatrième cliché nous remarquons la répétition d'un motif, donc il s'agit d'une structure quasi périodique.

Pour la XRDES (la spectroscopie X à énergie dispersive), elle nous a fourni une analyse quantitative et qualitative de l'échantillon nous constatons l'abondance du calcium, de l'oxygène, de silicium, et moins abondamment l'aluminium, le soufre et le potassium.

❖ Pour les échantillons : Béton valorisés 5%.

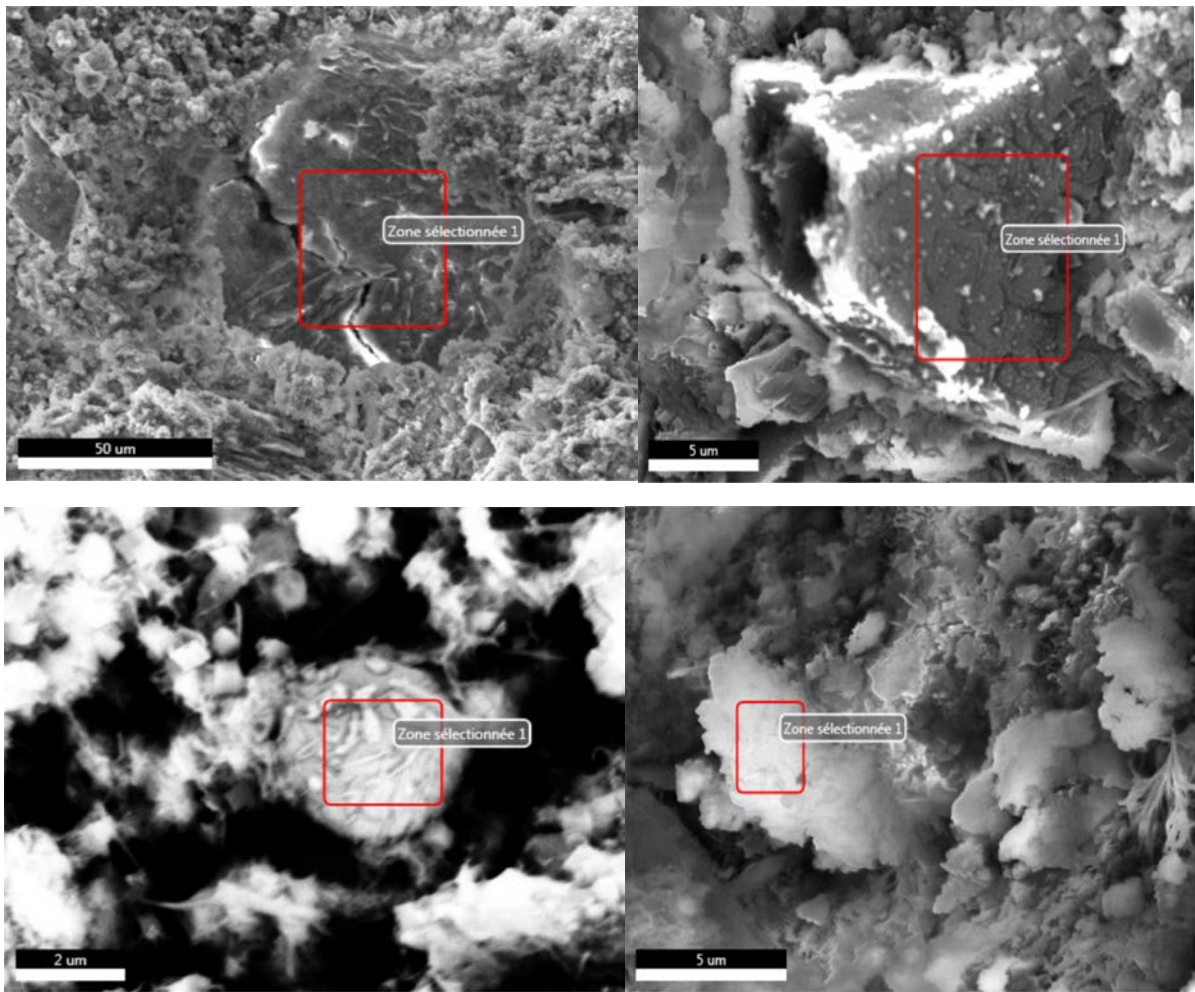


Figure 4.2 : (a) Micrographies électroniques à balayage – des échantillons béton valorisés 5%.

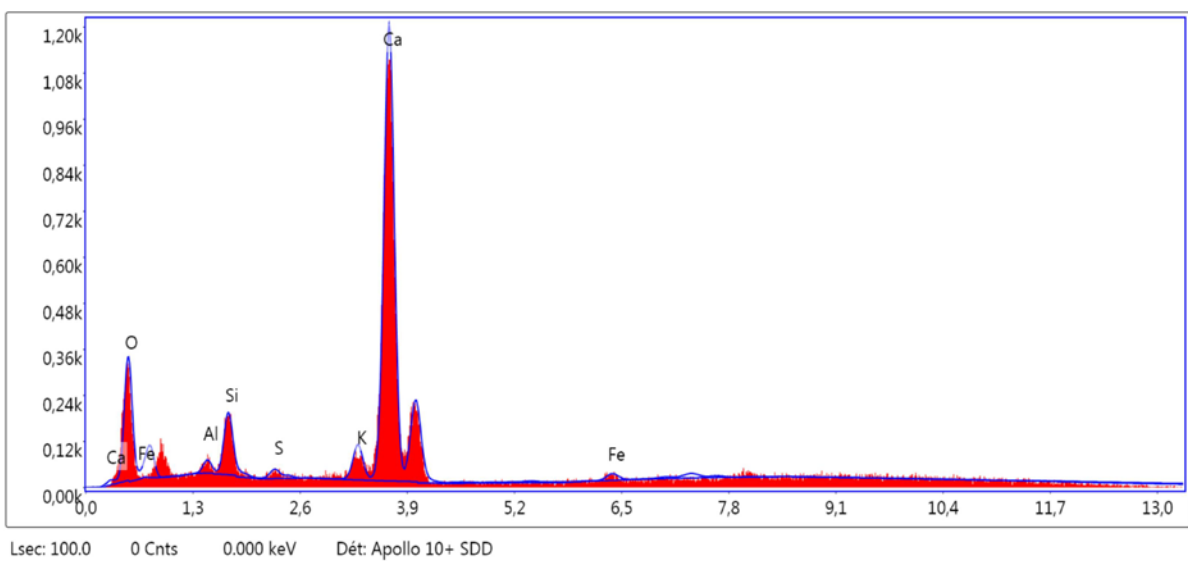


Figure 4.2 : (b) Spectre de dispersion en énergie (EDX) des échantillons béton valorisés 5%.

Elément	% de masse	% atomique	Intensité totale	Erreur %	Kratio	Z	A	F
O K	53.50	73.60	40.80	11.55	0.0758	1.0631	0.1332	1.0000
AlK	0.82	0.67	4.48	23.89	0.0042	0.9486	0.5457	1.0044
SiK	3.22	2.53	21.95	8.50	0.0213	0.9698	0.6773	1.0065
S K	0.45	0.31	3.14	32.99	0.0037	0.9504	0.8456	1.0172
K K	2.26	1.27	13.69	11.92	0.0210	0.9004	0.9775	1.0554
CaK	38.42	21.10	189.45	2.07	0.3484	0.9171	0.9841	1.0042
FeK	1.33	0.52	3.06	35.65	0.0108	0.8187	0.9668	1.0316

Figure 4.2 :(c) Tableau des valeurs du Spectre de dispersion en énergie (EDX) des échantillons béton valorisés 5%.

Discussion :

Nous constatons une modification de la morphologie après l'ajout de 5 % du déchet de béton, ce résultat est principalement dû à une structuration et une organisation des fibrilles en structure lamellaire. (A. Sivakumar et al. 2007) , (N. Banthia et al .2006),(M.A. Sanjuh et al. 1997). [83-84-85].

Nous constatons l'apparition de deux nouveaux pics dus à la présence du fer, pour les intensités totales nous remarquons une augmentation très significative des pics dû à l'oxygène à l'aluminium et au silicium ainsi que le soufre et le calcium, ce résultats est dû à un changement dans la composition centésimale des éléments constituant l'échantillon par la suite au renforcement.

❖ Pour échantillons : Béton valorisés 10%.

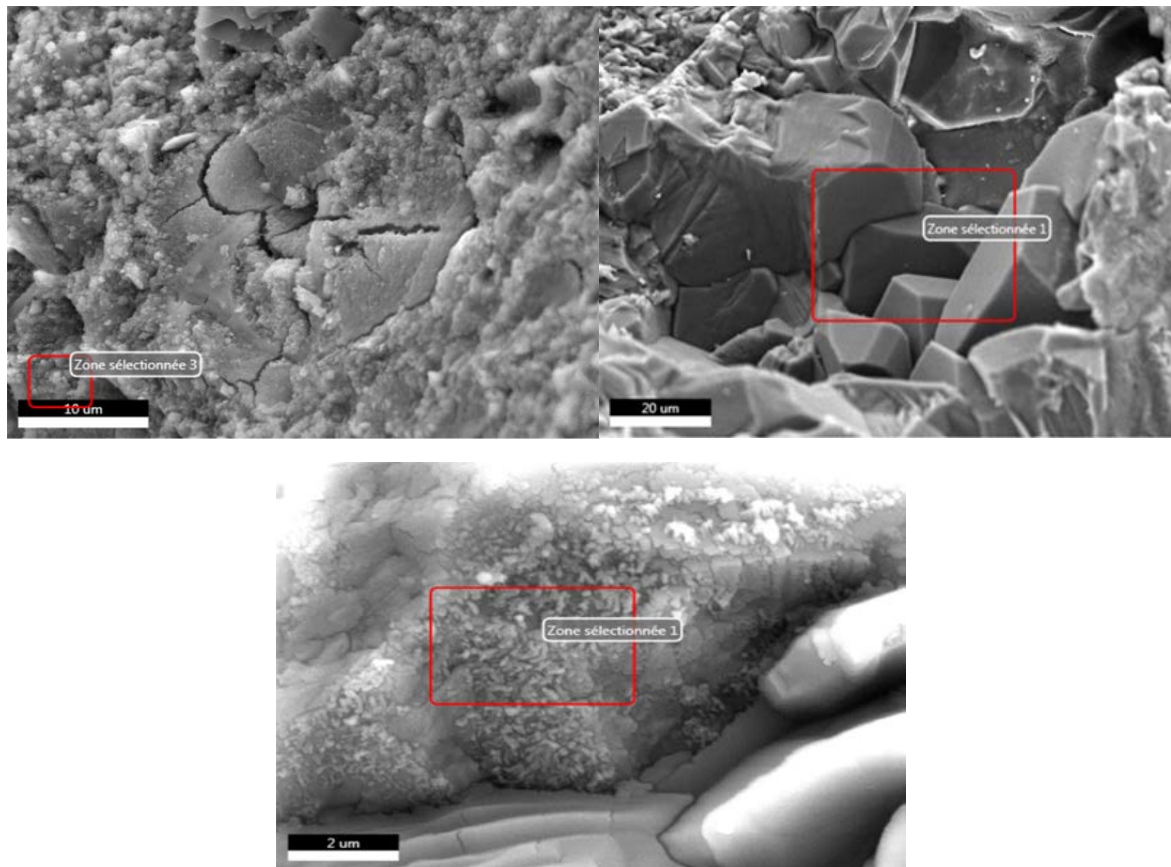


Figure 4.3 : (a) Micrographies électroniques à balayage des échantillons béton valorisés 10%.



Figure 4.3 : (b) Spectre de dispersion en énergie (EDX) des échantillons béton valorisés 10%.

Elément	% de masse	% atomique	Intensité totale	Erreur %	Kratio	Z	A	F
O K	54.98	75.19	3143.14	9.81	0.0756	1.0608	0.1297	1.0000
AlK	0.32	0.26	133.82	10.69	0.0017	0.9465	0.5535	1.0043
SiK	0.67	0.52	348.59	5.77	0.0045	0.9676	0.6886	1.0071
CaK	44.03	24.03	16559.11	1.26	0.4061	0.9150	1.0056	1.0030

Figure 4.3 :(c) tableau des valeurs du Spectre de dispersion en énergie (EDX) de l'échantillon béton valorisés 10%.

Discussion :

La structure organisée est clairement illustrée dans le deuxième cliché MEB de la zone sélectionnée de l'échantillon on voit que l'organisation en structure ordonnée augmente avec le pourcentage des impuretés ajoutées ce qui est bien claire dans le deuxième et le troisième cliché : des motifs de forme bien déterminée qui résultent des interactions entre les atomes et les ions de l'impureté et ceux du béton renforcé (H. Paqueton et al. 2006) (belarouf et al. 2021) [86-87] .

D'après le spectre XRDES on constate une grande abondance du calcium et de l'oxygène ainsi que de l'oxyde de calcium et des traces de l'aluminium et du silicium. Et cela peut s'expliquer par la richesse d'oxygène.

Des impuretés en calcium et en oxygène (oxyde de calcium CaO), et c'est cet oxyde de calcium qui est le responsable de la structuration des cristaux en fibrilles et en blocs lamellaires, ce qui fournit au béton une résistance mécanique et une dureté de plus.

❖ Pour échantillons : Béton valorisés 15%.

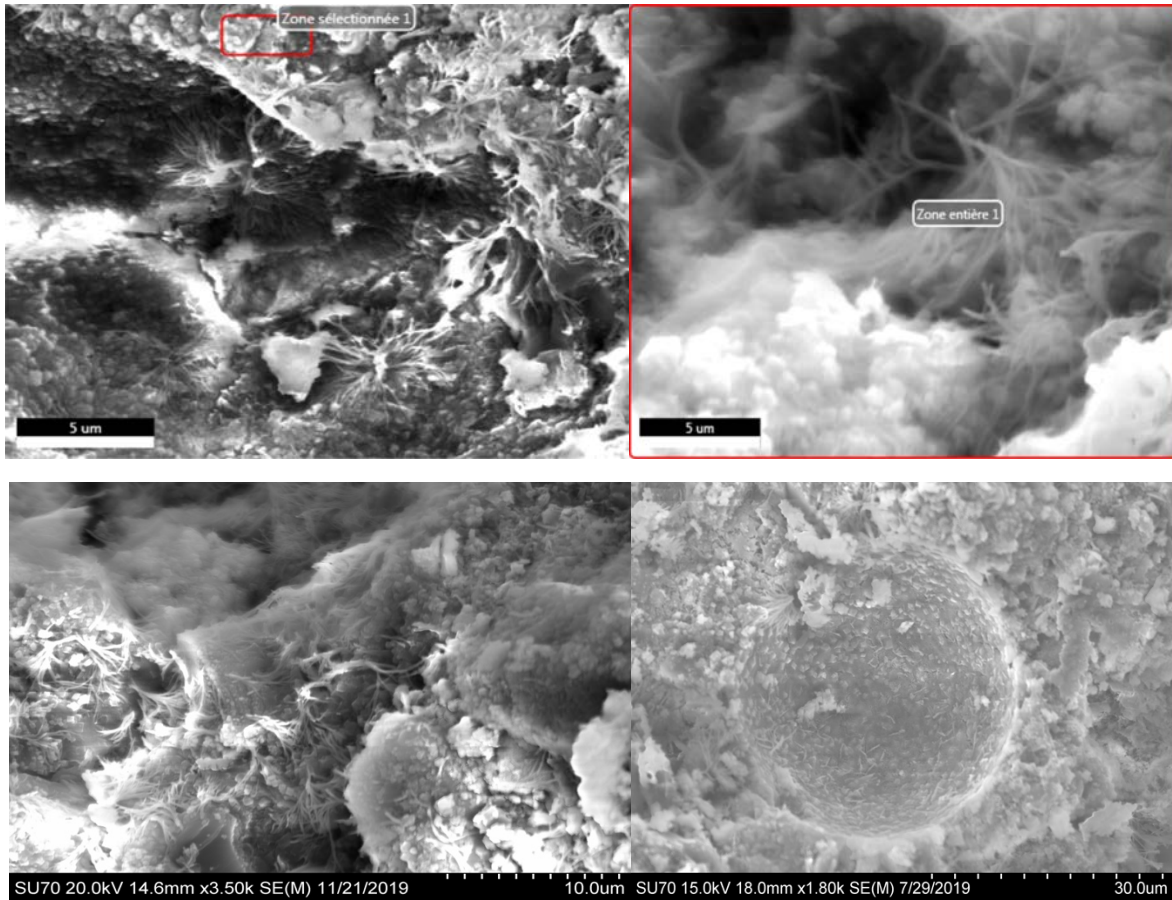


Figure 4.4 : (a) Micrographies électroniques à balayage des échantillons béton valorisés 15%.

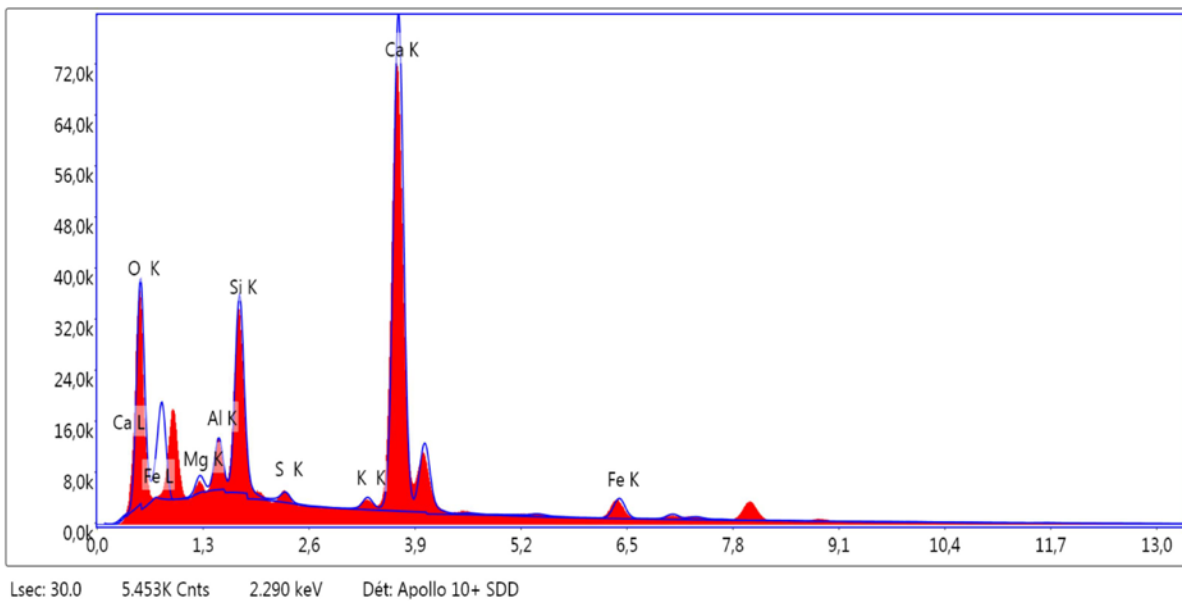


Figure 4.4 : (b) Spectre de dispersion en énergie (EDX) des échantillon béton valorisés 15%.

Elément	% de masse	% atomique	Intensité totale	Erreur %	Kratio	Z	A	F
O K	55.05	73.73	15207.80	9.41	0.0978	1.0589	0.1679	1.0000
MgK	0.99	0.87	1195.46	8.62	0.0041	0.9804	0.4202	1.0025
AlK	2.29	1.82	3629.49	6.01	0.0123	0.9445	0.5655	1.0043
SiK	7.40	5.64	14050.89	4.47	0.0489	0.9655	0.6808	1.0052
S K	0.39	0.26	714.82	8.04	0.0030	0.9461	0.8144	1.0141
K K	0.55	0.30	906.00	5.35	0.0050	0.8963	0.9615	1.0504
CaK	30.39	16.25	41226.15	1.43	0.2737	0.9128	0.9806	1.0067
FeK	2.94	1.13	1888.77	3.06	0.0243	0.8147	0.9783	1.0342

Figure 4.4 : (c) tableau des valeurs du Spectre de dispersion en énergie (EDX) de l'échantillon béton valorisés 15%.

Discussions :

La structure fibrillaire augmente avec le pourcentage des impuretés ce qui conduit à la formation de lamelles et de granules fournissant ainsi une structure cristalline organisée au matériau.

La structure chimique du matériau est riche en calcium et en oxyde de calcium par la suite du renforcement, nous constatons aussi l'apparition de magnésium et du fer, le pourcentage de silicium et de l'aluminium est augmenté d'une manière significative.

❖ Pour échantillons : Béton valorisés 20%.

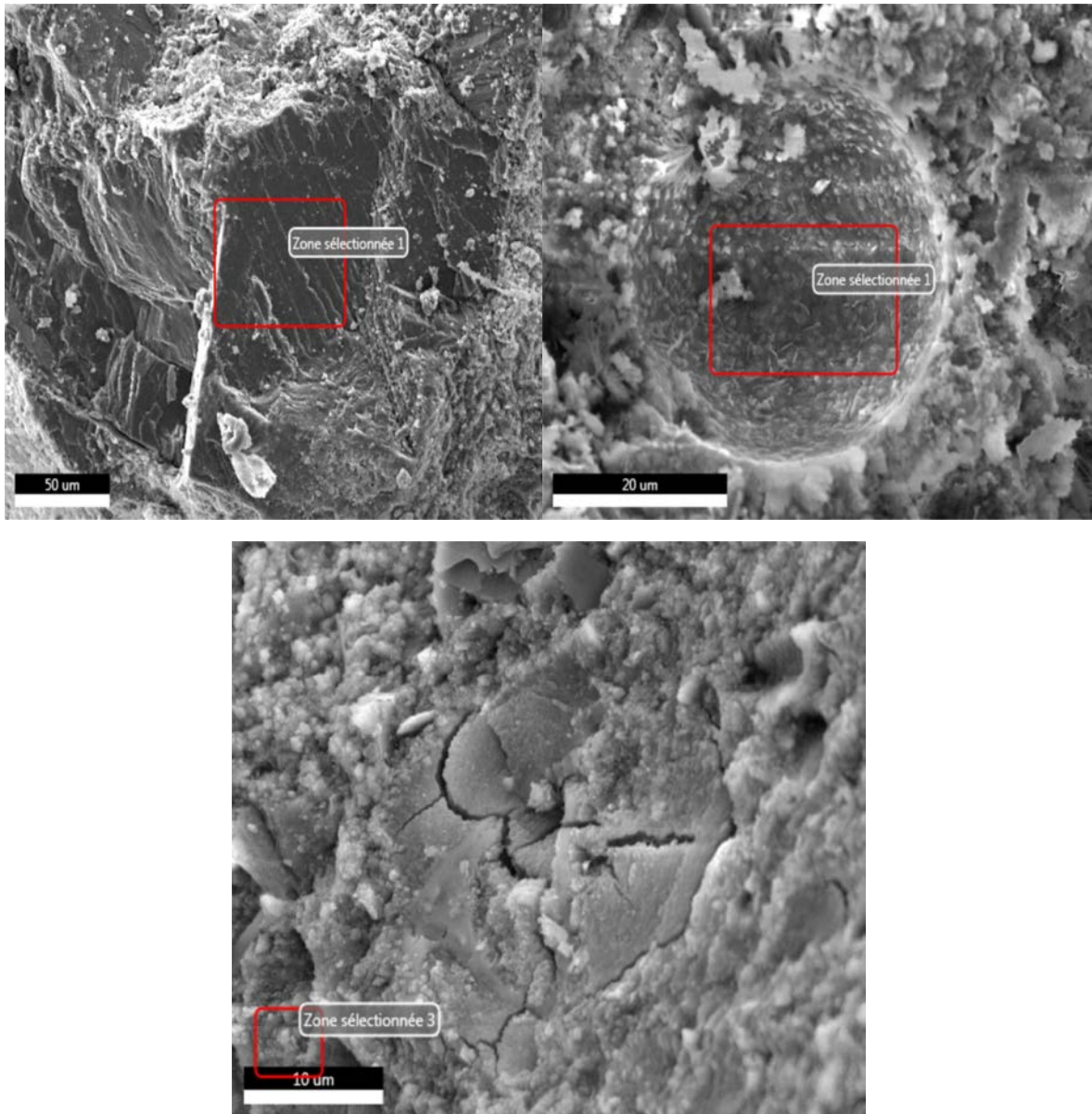


Figure 4.5 : (a) Micrographies électroniques à balayage des échantillons béton valorisés 20%.

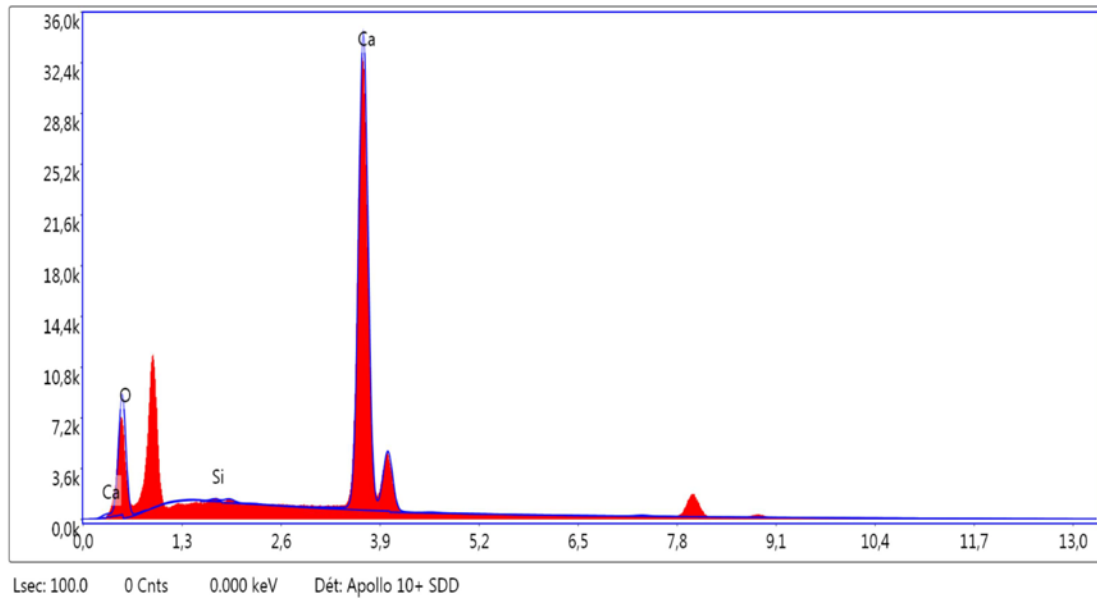


Figure 4.5 :(b) Spectre de dispersion en énergie (EDX) des échantillons béton valorisés 20%.

Elément	% de masse	% atomique	Intensité totale	Erreur %	Kratio	Z	A	F
O K	56.33	76.35	1018.75	9.98	0.0778	1.0592	0.1304	1.0000
SiK	0.12	0.09	19.49	30.06	0.0008	0.9661	0.6856	1.0073
CaK	43.55	23.56	5218.29	1.33	0.4022	0.9135	1.0076	1.0030

Figure 4.5 :(c) tableau valeurs du Spectre de dispersion en énergie (EDX) de l'échantillon béton valorisés 20%.

Discussions :

La structure granulaire de matériau parait clairement dans les clichés du MEB, cette structure granulaire offre une solidité et une dureté supplémentaire au matériau due au renforcement du matériau par 20% des impuretés.

Par l'ajout de 20% on constate toujours l'enrichissement du matériau par le calcium ainsi que par l'oxyde de calcium, l'extinction des éléments comme le fer, le magnésium ainsi l'aluminium au changement de la composition chimique du matériau de renfort lors de la préparation du matériau composite (béton plus déchet du béton).

1.2. Résultats de la Diffraction des rayons X (DRX)

❖ Pour les échantillons : Béton de référence

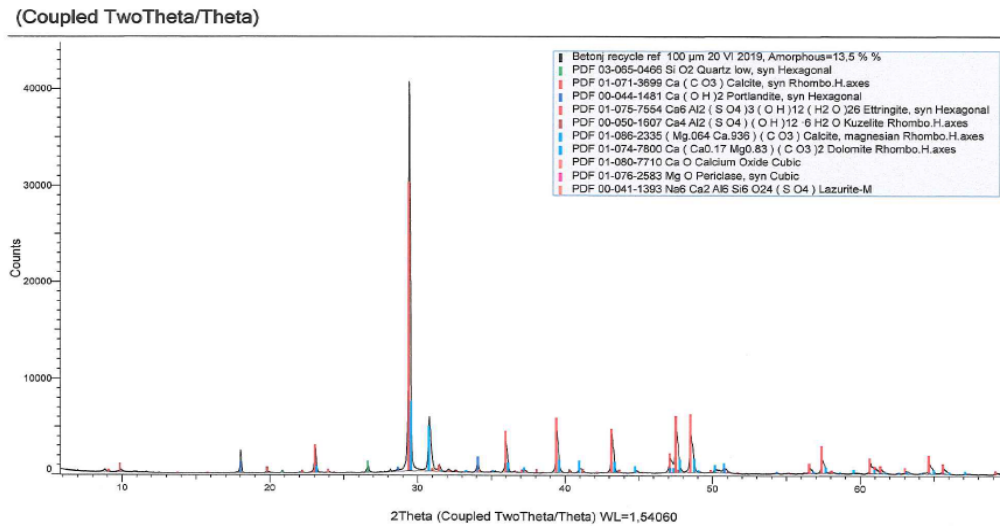
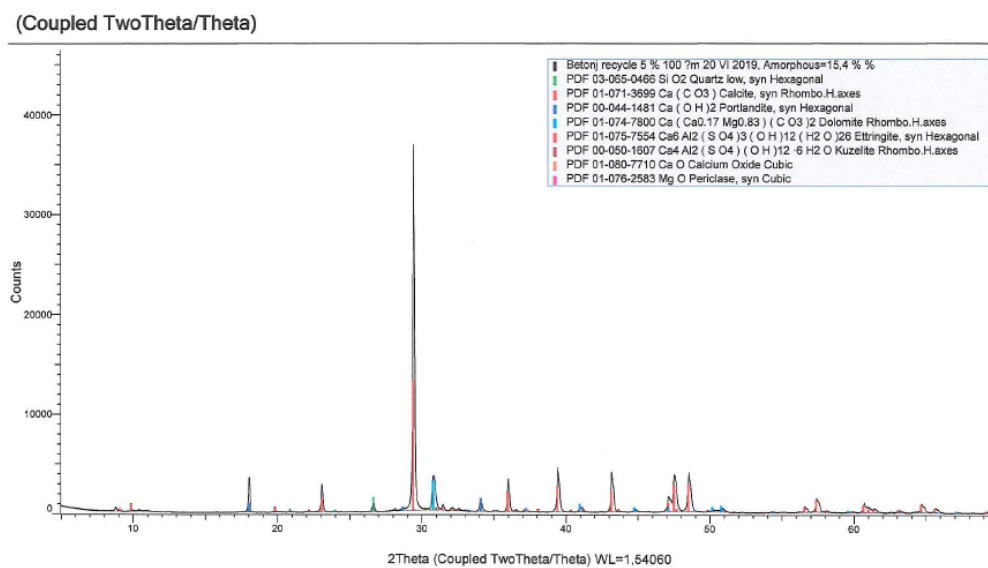


Figure 4.6: Diffractogramme des rayons x des échantillons du béton de référence

❖ Pour les échantillons : Béton valorisés 5%.

Figure 4.7 : Diffractogramme des rayons x des échantillons béton a 5 % valorisés



❖ Pour les échantillons : Béton valorisés 10%

(Coupled TwoTheta/Theta)

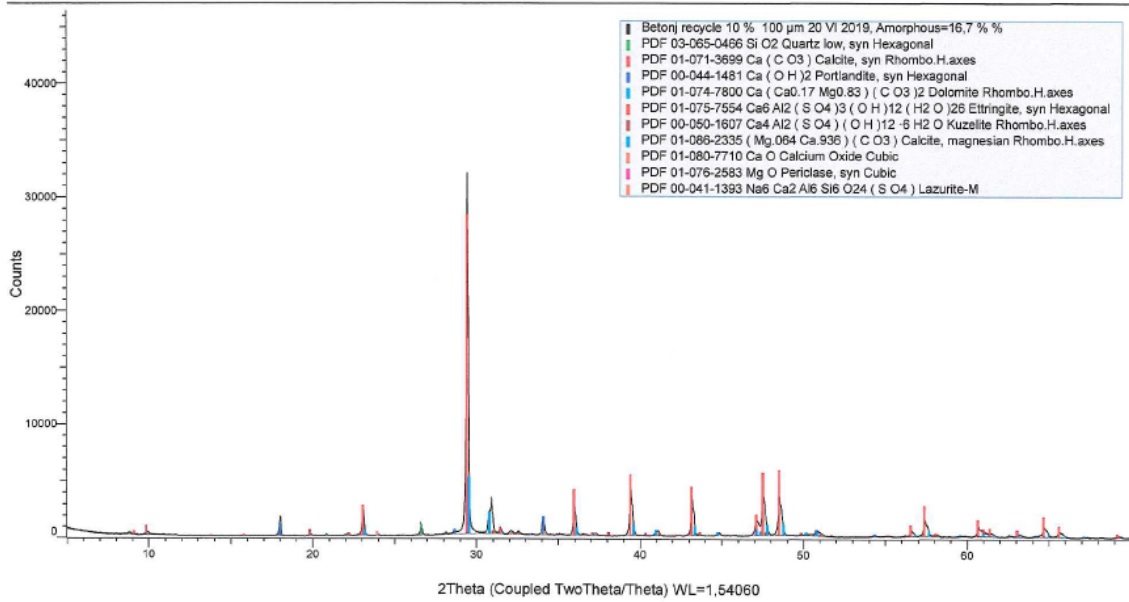


Figure 4.8 : Diffractogramme des rayons x des échantillons béton a 10 % valorisés

❖ Pour échantillons : Béton valorisés 15%.

(Coupled TwoTheta/Theta)

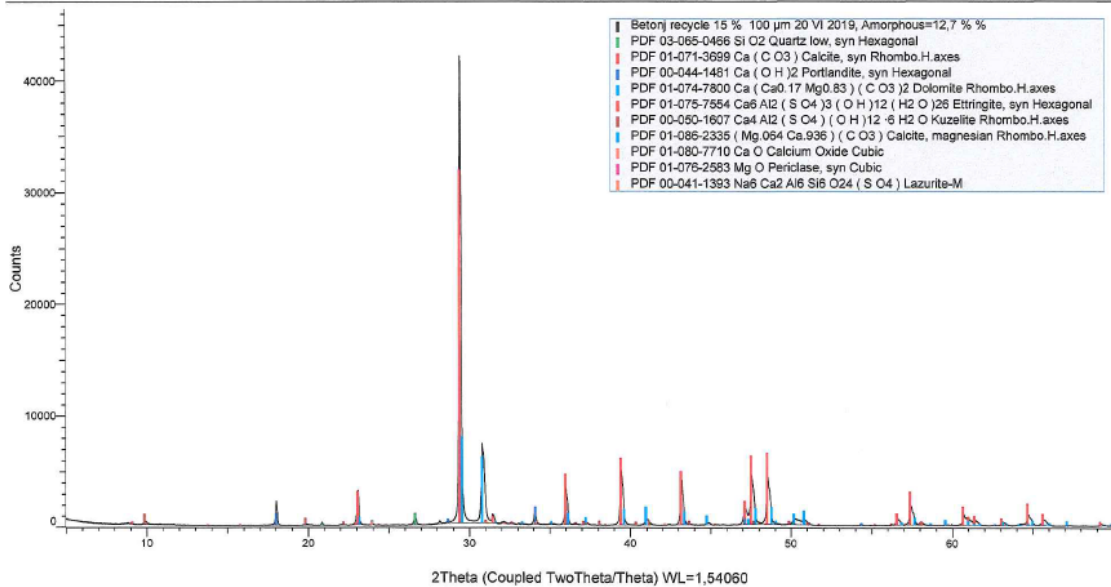


Figure 4.9 : Diffractogramme des rayons x d'échantillons béton a 15 % valorisés

❖ Pour échantillons : Béton valorisés 20%.

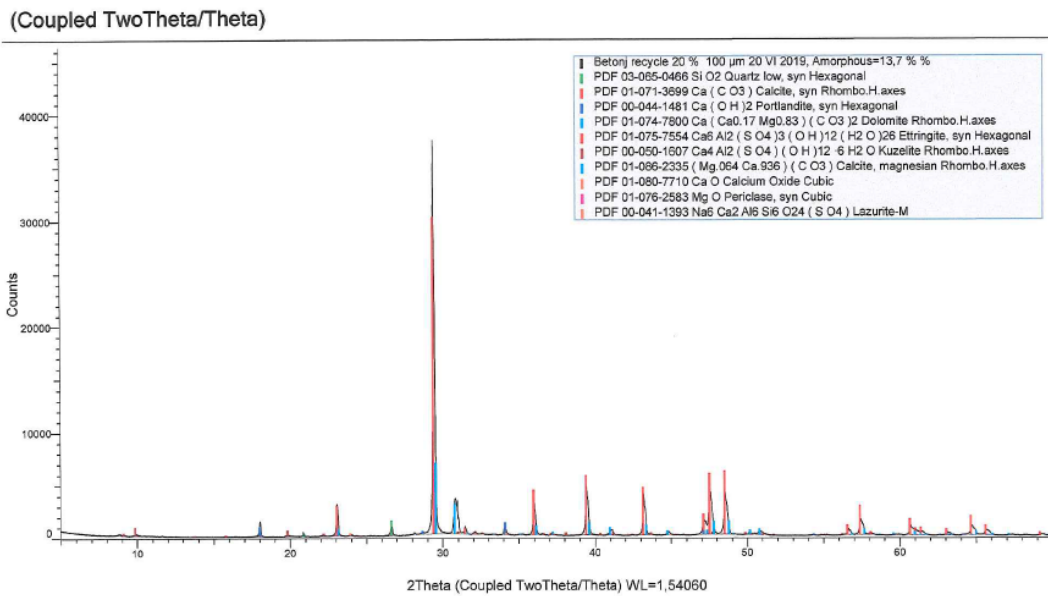


Figure 4.10 : Diffractogramme des rayons x des échantillons béton a 20 % valorisés

Discussions :

les diffractogrammes ci-dessus (figures 4.6 ; 4.7 ; 4.8 ; 4.9 ; 4.10) indiquent les différents spectres de la diffraction des rayons X des échantillons étudiés, l'analyse des diffractogrammes obtenus montre la présence de calcite (CaCO_3), de la silice quartz (SiO_2) et de l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Le quartz est le minéral prédominant dans les sables naturels et recyclés. Quelques pics de Calcite (CaCO_3) sont identifiés dans les spectres en raison de la présence du ciment hydraté. Dans l'agrégat naturel (un sable) le pic de calcite peut être attribué à la présence de coquillages. Tous les agrégats présentent une structure cristalline et cela peut être déduit de la présence des raies et des pics bien déterminés, ce qui révèle la structure périodique et ordonnée des agrégats.

Les diffractogrammes indiquent aussi la présence de la Dolomite $\text{Ca Mg} (\text{CO}_3)_2$, ainsi que minoritairement L'ettringite $\text{Ca}_6\text{Al}_2 (\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$, Kuzelite $\text{Ca}_4\text{Al}_2 (\text{SO}_4) (\text{OH})_{12} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ et Lazurite $\text{Na}_6 \text{Al}_6 \text{Si}_6 \text{O}_{24}(\text{SO}_4)$.

Les changements dans la composition minéralogiques dans du béton normal et du béton valorisé avec différents pourcentages ont été explorés par XRD, tous les spectres obtenus révèlent la présence des espèces suivantes avec un petit changement de pourcentage différent d'un spectre à autre :

- Portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$; - L'ettringite $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$;
- Calcite CaCO_3 . - Quartz SiO_2 - L'ettringite $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$
- Kuzelite $\text{Ca}_4\text{Al}_2(\text{SO}_4)(\text{OH})_{12} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ - Oxyde de Calcium CaO - Periclase MgO

Auxquels on attribue Le pic le plus intense - le pic majeur vers $29,4^\circ 2\theta$ pour les 5 échantillons et d'autres raies secondaires importantes qui sont détectées aux angles de $30,8^\circ$ et 39° et $47,5^\circ$ et $48,5^\circ 2\theta$.

Le spectre obtenu indique donc l'augmentation de l'ordre et la prédominance de la structure cristalline avec le pourcentage des impuretés ajoutées.

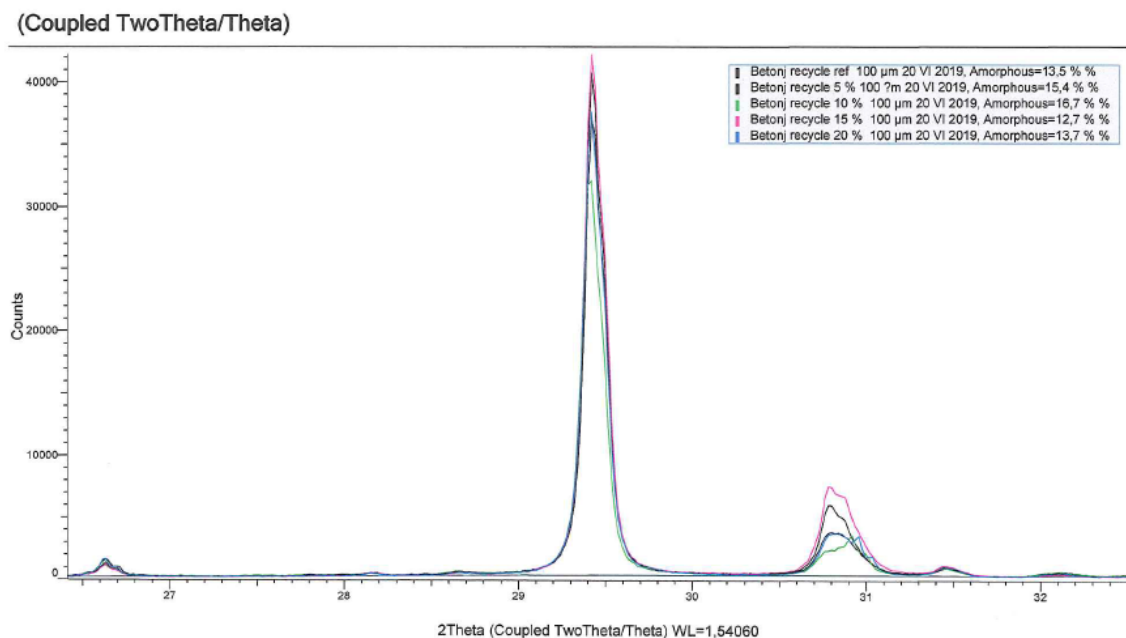


Figure 4.11 : les spectres Diffractogramme des rayons x pour les 5 échantillons

1.3. Résultats de la Spectrométrie de fluorescence X

Des analyses de spectrométrie de fluorescence aux rayons X ont été effectuées sur les échantillons étudiés. Les résultats globaux sont présentés dans (les tableaux 4.1 ; 4.2 ; 4.3 ; 4.4 ; 4.5) ci-dessous:

Principaux éléments (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , P_2O_5 , en% poids) ont été déterminés par XRF

L'analyse du XRF pour les échantillons montre que les concentrations les plus élevées sont liées au CaO, avec 76,37% à 81,38%, dont l'origine est associée aux granulats naturels de béton et SiO₂, 9,009 % à 11,85 %, et CaO, 6, 53% à 8,43%, qui est associé aux liants.

Les résultats XRF présentent également MgO et Fe₂O₃, qui peuvent être présent sous forme de carbonates. Al₂O₃ est aussi présent à des concentrations variant de 3,21% à 4,14% en raison de la présence de céramiques rouges et de sol et, en raison de la présence de feldspath et de ciment dans le résidu CDW. Un moyen SO₃ concentration de 0,76% est probablement dû à la présence de plâtre dans le résidu .Le montant de K₂O trouvé dans le résidu peut induire une réaction alcali - silice dans le béton.

Tableau 4.1 : Résultats de la Spectrométrie de fluorescence X mesurées expérimentalement pour un béton référence

Béton valorisés
Le 25 VI 2019 Reference

Formula	Z	Concentration	Éléments préparés	Net Int.	Stat. Error	Couche analysée	Crystal
CaO	20	79,33	56,7	1666	0,10%	10,1um	LiF200
SiO ₂	14	9,865	4,61	79,4	0,45%	1,57um	PET
Al ₂ O ₃	13	3,61	1,91	30,45	0,73%	1,08um	PET
Fe ₂ O ₃	26	2,499	1,75	78,59	0,46%	9,2um	LiF200
MgO	12	2,399	1,45	28,7	0,55%	0,72um	XS.55
K ₂ O	19	0,761	0,632	24,29	0,83%	7,8um	LiF200
SO ₃	16	0,675	0,271	13,1	1,12%	2,90um	Ge
P ₂ O ₅	15	0,273	0,119	2,515	2,78%	2,02um	PET
TiO ₂	22	0,25	0,15	2,051	3,20%	3,7um	LiF200
Na ₂ O	11	0,195	0,145	0,9185	3,95%	0,44um	XS-55
SrO	38	0,0753	0,0637	23,97	1,16%	81um	LiF200
MnO	25	0,0649	0,0503	1,507	4,46%	7,4um	LiF200
Normalisation	99,9972						

Tableau 4.2 : Résultats de la Spectrométrie de fluorescence X mesurées expérimentalement pour un béton 5% recyclé

Béton valorisés
On 25 VI 2019

5 % recyclés

Formula	Z	Concentration	Éléments préparés	Net int.	Stat.error	Couche analysée	Crystal
CaO	20	77,85	55,6	1642	0,10%	10um	LiF200
SiO2	14	11,28	5,27	91,62	0,42%	1,58um	PET
Al2O3	13	3,85	2,04	32,93	0,70%	1,09um	PET
Fe2O3	26	2,642	1,85	84,69	0,44%	9,3um	LiF200
MgO	12	1,95	1,18	23,61	0,62%	0,72um	XS-55
SO3	16	0,768	0,308	14,79	1,0S%	2,85um	Ge
K2O	19	0,673	0,558	21,32	0,89%	7,6um	LiF200
P2O5	15	0,359	0,157	3,284	2,38%	2,00um	PET
TiO2	22	0,258	0,155	2,159	3,08%	3,7um	LiF200
Na2O	11	0,144	0,107	0,6868	4,92%	0,44um	XS-55
Cl	17	0,0793	0,0793	1,897	3,79%	4,0um	PET
SrO	38	0,079	0,0668	25,57	1,09%	82um	LiF200
MnO	25	0,0576	0,0446	1,365	4,81%	7,5um	LiF200
Normalization		99,9899					

Tableau 4.3 : Résultats de la Spectrométrie de fluorescence X mesurées expérimentalement pour un béton 10% recyclé

Béton valorisés
On 25 VI 2019

10 %
recycles

Formula	Z	Concentration	Élément Préparés	Net Int.	Stat. Error	Couche analysés	Crystal
CaO	20	76,37	54,6	1617	0,10%	9,8um	LiF200
SiO2	14	11,85	5,54	96,49	0,41%	1,58um	PET
Al2O3	13	4,14	2,19	35,62	0,68%	1,10um	PET
Fe2O3	26	2,896	2,03	94,48	0,42%	9,4um	LiF200
MgO	12	2,055	1,24	25,01	0,60%	0,72um	XS-55
SO3	16	0,863	0,346	16,57	0,99%	2,82um	Ge
K2O	19	0,79	0,655	25	0,82%	7,6um	LiF200
P2O5	15	0,367	0,16	3,352	2,35%	1,98um	PET
TiO2	22	0,279	0,167	2,378	2,94%	3,8um	LiF200
Na2O	11	0,19	0,141	0,9111	4,02%	0,45um	XS-55
SrO	38	0,0813	0,0687	26,69	1,06%	83um	LiF200
MnO	25	0,0656	0,0508	1,582	4,26%	7,6um	LiF200
Cl	17	0,0462	0,0462	1,102	5,72%	4,0um	PET
Normalization		99,9931					

Tableau 4.4 : Résultats de la Spectrométrie de fluorescence X mesurées expérimentalement pour un béton 15% recyclé

Béton recycles 15 %
On 25 VI 2019 recycles

Formula	Z	Concentration	Éléments préparés	Net int.	Stat.error	Couche analysés	Crystal
CaO	20	81,38	58,2	1719	0,10%	10,4um	LiF200
SiO2	14	9,009	4,21	72,99	0,47%	1,58um	PET
Al2O3	13	3,21	1,7	27,09	0,78%	1,08um	PET
MgO	12	2,279	1,37	27,26	0,57%	0,71um	XS-55
Fe2O3	26	2,217	1,55	68,77	0,49%	9,1um	LiF200
SO3	16	0,647	0,259	12,75	1,14%	2,94um	Ge
K2O	19	0,604	0,501	19,52	0,93%	7,9um	LiF200
P2O5	15	0,206	0,09	1,927	3,26%	2,05um	PET
TiO2	22	0,189	0,113	1,529	3,82%	3,6um	LiF200
Na2O	11	0,125	0,0926	0,5872	5,54%	0,44um	XS-55
SrO	38	0,072	0,0609	22,7	1,19%	80um	LiF200
MnO	25	0,0615	0,0476	1,406	4,68%	7,3um	LiF200
Normalzation		99,9995					

Tableau 4.5 : Résultats de la Spectrométrie de fluorescence X mesurées expérimentalement pour un béton 20% recyclés

Béton valorises
On 25 VI 2019 20 % recycles

Formula	Z	Concentration	Élément préparés	Net int.	Stat. error	Couche analysés	Crystal
CaO	20	79,93	57,1	997,2	0,13%	10,2um	LiF200
SiO2	14	10,05	4,7	51,71	0,56%	1,58um	PET
Al2O3	13	3,44	1,82	16,02	1,02%	1,09um	PET
Fe2O3	26	2,522	1,76	54,3	0,55%	9,2um	LiF200
MgO	12	1,93	1,16	12,91	0,67%	0,71um	XS-55
SO3	16	0,677	0,271	13,1	1,12%	2,9um	Ge
K2O	19	0,637	0,529	11,12	1,23%	7,8um	LiF200
P2O5	15	0,266	0,116	1,634	3,36%	2,03um	PET
TiO2	22	0,234	0,14	1,184	4,07%	3,7um	LiF200
Na2O	11	0,159	0,118	0,3905	4,97%	0,44um	XS-55
SrO	38	0,0815	0,0689	18,26	1,17%	81um	LiF200
MnO	25	0,0673	0,0521	1,065	4,83%	7,4um	LiF200
Normalization		99,9938					

Discussions :

Les spectres de la fluorescence X des échantillons étudiée indiquent une abondance de l'oxyde de calcium et le silicate (Quartz) ce qui révèle une composition chimique similaire à celle du sable naturel, après la valorisation par les impuretés il n'y a pas de changement significatif dans la composition minéralogique du béton. Nous constatons aussi une présence minoritaire de l'oxyde d'aluminium, de l'oxyde de fer II et de l'oxyde de magnésium ainsi que des traces du trioxyde de soufre, d'oxyde de potassium, du dioxyde de titane....

1.4. Résultats de la diffusion de chlorure

Il est à noter que la diffusion dans la littérature représente la propagation des ions de chlorure dans le matériau poreux (C. Andrade .2002) [88]. Cette caractéristique permet de quantifier la profondeur atteinte par le gaz dans le béton ainsi la diffusion est obtenue (S. Erdogdua et al .2004) [89].

Les tableaux 4.6 (a.b.c.d.e) et 4.7 (a.b.c.d.e) présentent le coefficient de diffusion pour les échantillons mesuré pour 28 et 91 jours.

Les essais de diffusion sont nécessaires au béton pour évaluer sa durabilité. En effet, l'exposition du béton aux chlorures, résultent une dégradation de la matrice solide due à un ensemble de mécanismes physiques et chimiques correspondant à l'instabilité des phases hydrates et/ou modification de la matrice cimentaire engendrant une conséquence commune l'abaissement du pH de la solution interstitielle. De plus, les ions agressifs tels les chlorures, s'ils atteignent une concentration suffisante les armatures de béton armé, peuvent initier leur corrosion (Kevin Diatto .2016) [90].

A titre de comparaison des résultats ont été présentés dans le graphique (fig4.12). La plus grande valeur de diffusion des ions de chlorure a été enregistrée dans le béton valorisé à 10%. Ensuite nous avons remarqué une chute des valeurs de la diffusion qui a fini par atteindre $27,6 \cdot 10^{-12}$ (m²/s) pour le béton valorisé à 20%. Ce dernier présente une diffusion inférieure à celle du béton normal et donc en termes de durabilité le béton valorisé à 20% représente une bonne diffusion.

Tableau 4.6/a : La Diffusion calculée pour chaque type en moyennant pour les 3 échantillons (28 Jours) BN

Age 28 jour	U(Volts) 20		t(heures) 24		Epaisseur (mm) 50	
Echantillon	BN /1		BN /2		BN/3	
i_0 mA	64,1		71,2		71,2	
T_0 °C	24		23		23	
i_f mA	58,8		53,5		53,3	
T_f °C	25		24		24	
T_{moy}	24,5		23,5		23,5	
	X_d	$D_{diff.mig}$	X_d	$D_{diff.mig}$	X_d	$D_{diff.mig}$
	30,22	21,7742244014	26,9	19,15731128	28,72	20,55335571
	34,41	25,0147552651	32,38	23,36965099	29,8	21,3832224
	34,38	25,0147552651	36,02	26,18069891	29,21	20,92974127
	24,06	17,0382972124	31,40	22,61448551	25,64	18,19274867
	34,23	24,8752749264	36,77	26,76101071	34,49	24,99800554
	25,55	18,1802543820	28,46	20,35372929	23,13	16,2765191
	36,39	26,5504925700	31,84	22,953446928	30,75	22,11402998
$X_{d_{moy}}$	31,32		31,97		28,82	
$D \cdot 10^{-12}$ m^2/S	22,6		23,1		20,6	
D_{moy}	22,1					

Tableau 4.6/b : La Diffusion calculée pour chaque type en moyennant pour les 3 échantillons (28 Jours) BV5%

Age 28 jour	U(Volts)		t(heures)		Epaisseur (mm) 50	
	20		24			
Echantillon	Bv 5% /1		Bv 5% /2		Bv 5% /3	
i₀ mA	78,9		66,3		66,3	
T₀ °C	24		23		23	
i_f mA	65,2		56,6		56,6	
T_f °C	23		22		22	
T_{moy}	23,5		22,5		22,5	
	X_d	D_{diff.mig}	X_d	D_{diff.mig}	X_d	D_{diff.mig}
	35,00	16,7457816788	37,47	17,93116229	37,41	17,90104205
	29,45	13,9607814054	35,14	16,76234824	36,17	17,27881399
	38,34	13,9607814054	38,15	18,27260325	33,15	15,76556739
	31,12	14,7974865876	31,12	14,75028884	35,12	16,75232335
	36,93	17,7169229362	39,69	19,04638193	36,71	17,54972337
	33,17	15,8261573929	36,17	17,27881399	33,17	15,77557809
	39,19	18,8556319299	39,85	19,126814283	38,14	18,26758103
X_d_{moy}	34,74		36,80		35,70	
D 10⁻¹² m²/S	16,6		17,6		17,0	
D_{moy}	17,1					

Tableau 4.6/c : La Diffusion calculée pour chaque type en moyennant pour les 3 échantillons (28 Jours) B10%

Age 28 jour	U(Volts)		t(heures)		Epaisseur (mm) 50	
	30		24			
Echantillon	Bv 10% /1		Bv 10% /2		Bv 10% /3	
i₀ mA	78,9		78,6		78,6	
T₀ °C	24		23		23	
i_f mA	69,1		68,7		68,9	
T_f °C	24		23		23	
T_{moy}	24		23		23	
	X_d	D_{diff.mig}	X_d	D_{diff.mig}	X_d	D_{diff.mig}
	32,00	15,2631768434	35,17	16,80433074	43,83	21,16395652
	42,31	20,4629676157	43,83	21,16395652	43,17	20,83096387
	40,01	20,4629676157	39,17	18,81528987	44,85	21,6787933
	38,80	18,6889650071	42,85	20,66955253	39,17	18,81528987
	43,35	20,9892394676	40,35	19,40945527	39,85	19,1576415
	42,85	20,7361893055	42,01	20,24597362	37,17	17,80917425
	42,01	20,3112108284	44,17	21,335540535	39,01	18,73475615
X_{d moy}	40,19		41,08		41,01	
D 10⁻¹² m²/S	19,4		19,8		19,7	
D_{moy}	19,6					

Tableau 4.6/d : La Diffusion calculée pour chaque type en moyennant pour les 3 échantillons (28 Jours) B15%

Age 28 jour	U(Volts)		t(heures)		Epaisseur (mm) 50	
	30		24			
Echantillon	Bv 15% /1		Bv 15% /2		Bv 15% /3	
i₀ mA	59,0		56,4		58,0	
T₀ °C	24		23		23	
i_f mA	46,3		43,9		45,3	
T_f °C	23		22		22	
T_{moy}	23,5		22,5		22,5	
	X_d	D_{diff.mig}	X_d	D_{diff.mig}	X_d	D_{diff.mig}
	30,08	14,2762822685	29,18	13,78161554	29,73	14,05607236
	29,73	14,1009822157	30,08	14,23079672	30,6	14,49048541
	32,89	14,1009822157	38,60	18,49863456	34,08	16,231222
	33,17	15,8261573929	36,71	17,54972337	33,18	15,7805835
	35,01	16,7508102417	31,93	15,15520449	38,4	18,39816865
	34,18	16,3335595527	35,40	16,89268434	32,17	15,27523012
	31,52	14,9980708058	38,87	18,634282519	38,89	18,64433138
X_{d moy}	32,37		34,40		33,86	
D 10⁻¹² m²/S	15,4		16,4		16,1	
D_{moy}	16,0					

Tableau 4.6/e : La Diffusion calculée pour chaque type en moyennant pour les 3 échantillons (28 Jours) B20%

Age 28 jour	U(Volts)		t(heures)		Epaisseur (mm) 50	
	30		24			
Echantillon	Bv 20% /1		Bv 20% /2		Bv 20% /3	
i₀ mA	79,4		75,3		75,4	
T₀ °C	21		21		21	
i_f mA	93,3		89,5		91,3	
T_f °C	24		23		23	
T_{moy}	22,5		22		22	
	X_d	D_{diff.mig}	X_d	D_{diff.mig}	X_d	D_{diff.mig}
	31,19	14,7852709887	28,17	13,25679631	32,14	15,21133245
	30,04	14,2108255070	35,09	16,71040393	30,68	14,48396104
	30,14	14,2108255070	28,31	13,32646434	30,31	14,2997671
	31,18	14,7802734156	32,15	15,24077401	29,15	13,7226793
	29,17	13,7766266759	29,15	13,74466586	31,4	14,84255658
	32,14	15,2602256675	31,14	14,73666303	28,01	13,15613662
	29,15	13,7666490929	30,31	14,322707593	31,89	15,08672161
X_{d moy}	30,43		30,62		30,51	
D 10⁻¹² m²/S	14,4		14,5		14,4	
D_{moy}	14,4					

Tableau 4.7/a : La Diffusion calculée pour chaque type en moyennant pour les 3 échantillons (90 Jours) BN

Age 90 jour	U(Volts)		t(heures)		Epaisseur (mm) 50	
	30		24			
Echantillon	BN /1		BN/2		BN/3	
i₀ mA	56,4		61,2		58,9	
T₀ °C	18		20		20	
i_f mA	57,9		58,2		60,2	
T_f °C	23		24		24	
T_{moy}	20,5		22		22	
	X_d	D_{diff.mig}	X_d	D_{diff.mig}	X_d	D_{diff.mig}
	36,15	17,1577194491	30,17	14,25291261	32,14	15,23578081
	35,17	16,6695696387	34,17	16,25018082	34,17	16,25018082
	33,17	16,6695696387	32,14	15,23578081	31,18	14,75661995
	35,18	16,6745491289	34,18	16,25518163	34,18	16,25518163
	31,18	14,6856388676	35,17	16,75043728	31,18	14,75661995
	35,14	16,6546313726	35,17	16,75043728	35,14	16,73542452
	36,15	17,1577194491	34,18	16,255181632	33,17	15,75028311
X_{d moy}	34,59		33,60		33,02	
D 10⁻¹² m²/S	16,4		16		15,7	
D_{moy}	16					

Tableau 4.7/b: La Diffusion calculée pour chaque type en moyennant pour les 3 échantillons (28 jours) BV 5%

Age 90 jour	U(Volts)		t(heures)		Epaisseur (mm) 50	
	30		24			
Echantillon	Bv 5% /1		Bv 5% /2		Bv 5% /3	
i₀ mA	60,5		60,9		60,0	
T₀ °C	17		18		17	
i_f mA	64		40,7		64,2	
T_f °C	23		23		23	
T_{moy}	20		20,5		20	
	X_d	D_{diff.mig}	X_d	D_{diff.mig}	X_d	D_{diff.mig}
	32,72	15,4257213941	33,56	15,86832664	32,14	15,23578081
	34,15	16,1357240829	29,15	13,67869616	34,15	16,25018082
	31,15	16,1357240829	32,14	15,16242523	30,18	14,75661995
	35,17	16,6426064193	30,17	14,18442657	30,18	16,25518163
	30,17	14,1615910954	36,15	17,15771945	31,18	14,75661995
	32,13	15,1330061984	30,18	14,18938696	35,17	16,73542452
	30,18	14,1665432537	30,17	14,184426571	30,17	15,75028311
X_{d moy}	32,24		31,65		31,88	
D 10⁻¹² m²/S	15,2		14,9		15	
D_{moy}	15					

Tableau 4.7/c: La Diffusion calculée pour chaque type en moyennant pour les 3 échantillons (28 jours) BV 10%

Age 90 jour	U(Volts)		t(heures)		Epaisseur (mm) 50	
	30		24			
Echantillon	Bv 10% /1		Bv 10% /2		Bv 10% /3	
i₀ mA	42,9		41,6		42,6	
T₀ °C	22		22		22	
i_f mA	52,2		36,4		36,4	
T_f °C	23		23		23	
T_{moy}	22,5		22,5		22,5	
	X_d	D_{diff.mig}	X_d	D_{diff.mig}	X_d	D_{diff.mig}
	26,17	12,2821398190	24,84	11,62108392	24,79	11,59625171
	27,01	12,7001426416	26,01	12,20256261	26,01	12,20256261
	28,17	12,7001426416	27,55	12,96905049	30,05	14,21581825
	28,15	13,2680066806	30,05	14,21581825	23,17	10,79250123
	30,57	14,4755002258	26,97	12,68022942	29,69	14,0361073
	24,17	11,2884545806	23,17	10,79250123	25,15	11,77507583
	29,69	14,0361072974	25,15	11,775075825	30,17	14,2757345
X_{d moy}	27,70		26,25		26,92	
D 10⁻¹² m²/S	13,0		12,3		12,7	
D_{moy}	12,7					

Tableau 4.7/d: La Diffusion calculée pour chaque type en moyennant pour les 3 échantillons (28 jours) BV 15%

Age 90 jour	U(Volts)		t(heures)		Epaisseur (mm) 50	
	30		24			
Echantillon	Bv 15% /1		Bv 15% /2		Bv 15% /3	
i₀ mA	34,4		48,1		42,6	
T₀ °C	19		20		20	
i_f mA	59,2		48,3		36,4	
T_f °C	24		24		24	
T_{moy}	21,5		22		22	
	X_d	D_{diff.mig}	X_d	D_{diff.mig}	X_d	D_{diff.mig}
	26,18	12,2480140037	22,67	10,52807709	22,67	11,59625171
	20,77	9,5746329118	23,18	10,78035654	20,77	12,20256261
	24,1	9,5746329118	21,14	9,772299001	21,14	14,21581825
	20,15	9,2695277359	22,17	10,28091186	23,17	10,79250123
	23,99	11,1636131884	26,87	12,61033695	20,41	14,0361073
	20,41	9,3974388851	20,21	9,313736642	22,15	11,77507583
	25,77	12,0447934506	24,17	11,270547383	30,17	14,2757345
X_{d moy}	23,05		22,92		22,93	
D 10⁻¹² m²/S	10,7		10,6		10,7	
D_{moy}	10,7					

Tableau 4.7/e: La Diffusion calculée pour chaque type en moyennant pour les 3 échantillons (90 jours) BV 20%

Age 90 jour	U(Volts)		t(heures)		Epaisseur (mm) 50	
	30		24			
Echantillon	Bv 20% /1		Bv 20% /2		Bv 20% /3	
i₀ mA	45,1		54,1		45,6	
T₀ °C	21		20		20	
i_f mA	39,6		49,0		36,4	
T_f °C	24		24		24	
T_{moy}	22,5		22		22	
	X_d	D_{diff.mig}	X_d	D_{diff.mig}	X_d	D_{diff.mig}
	15,60	7,0627890947	19,00	8,718141407	19,6	9,013326796
	21,37	9,9014384496	12,65	5,616872238	13,77	6,160251894
	19,4	9,9014384496	19,03	8,732893401	21,14	9,772299001
	21,07	9,7531493750	12,64	5,612029257	11,17	4,901953145
	21,58	10,0052798180	20,27	9,34330122	12,64	5,612029257
	20,19	9,3185591272	13,17	5,868922397	19,40	8,914897954
	21,89	10,1586270714	11,67	5,143047960	15,60	7,051797283
X_{d moy}	20,16		15,49		16,19	
D 10⁻¹² m²/S	9,3		7,0		7,3	
D_{moy}	7,9					

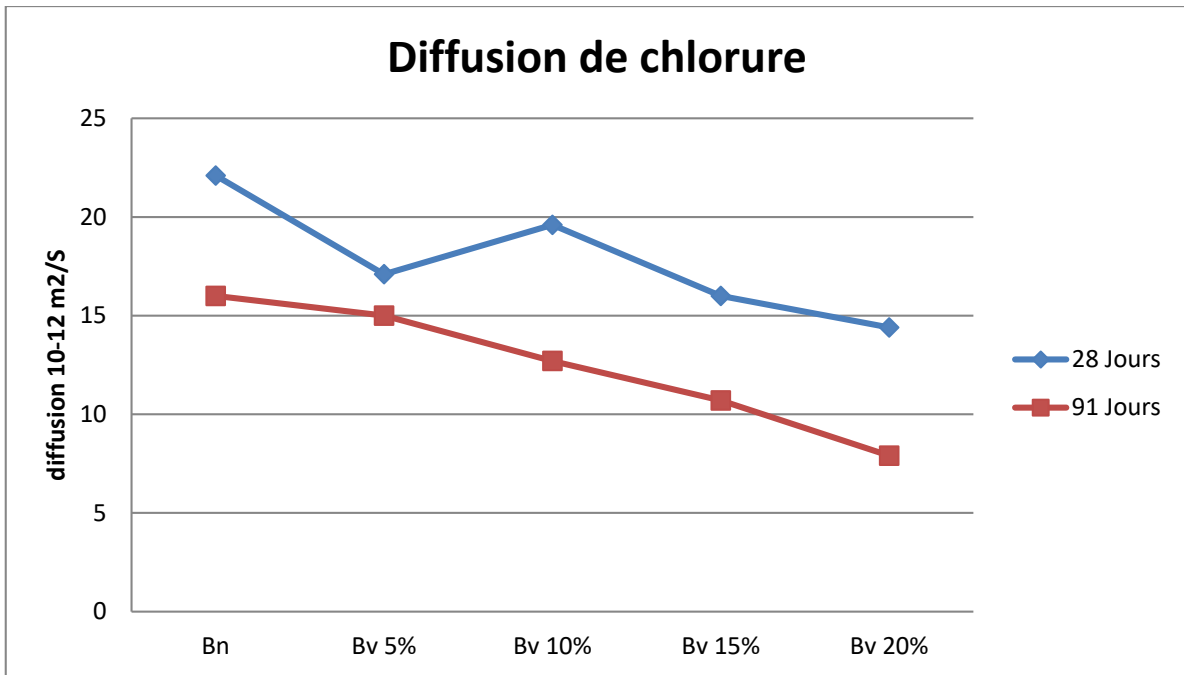


Figure 4.12: résultats du test du coefficient de diffusion du chlorure (28 jours et 91 jours)

2. Caractérisation thermo-physique

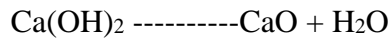
2.1. Résultats des Analyses Thermiques Différentielles couplées à l'analyse thermogravimétrique (ATD-ATG -DSC)

L'analyse thermique différentielle (ATD) est une technique qui permet d'observer la variation de la température de l'échantillon (gradient de la température en fonction du temps). En général, une différence de température est indiquée par le potentiel électrique (μV). La technique thermo-gravimétrique (TGA) est utilisée pour mesurer la réduction de la masse d'un échantillon par rapport à la température. La décomposition thermique de différentes phases dans un matériau est identifiée par l'analyse DTA, alors que la perte de poids due à la décomposition est simultanément mesurée en profondeur TGA. Les thermo-grammes TGA/DTA des échantillons béton normale. Béton a 5pr valorisé jusqu'à 20 pr ont été analysés (figure 4.13 ; 4.14 ; 4.15 ; 4.16 ; 4.17).

Pour l'échantillon de béton de référence les pics de flux thermique sont essentiellement liés aux températures de changement de phase des différents hydrates de la pâte de ciment puisque la majorité des granulats est généralement stable jusqu'à 700°C. Les deux premiers pics observés sur la courbe se coïncident au niveau des températures de 75°C et 150°C. Ces pics endothermiques indiquent principalement le départ de l'eau des constituants de certains hydrates les CSH et l'ettringite. Alors que la dégradation de l'ettringite et de gel CSH est

associée à ces deux pics car l'eau chimiquement liée commence à s'évaporer du béton dans cette gamme de température. La déshydratation de l'ettringite est confirmée avant 160°C, par la suite un petit pic endothermique est observé. Ce pic à la température de 175°C indique la déshydratation des monocarboaluminate de calcium hydraté $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCO}_3\cdot 11\text{H}_2\text{O}$.

Un pic endothermique important apparaît à la température de 460°C, il indique la décomposition de la portlandite en chaux libre selon la réaction.



Notons ici, que la portlandite est un composé important dans une pâte du ciment. Elle est issue de l'hydratation des minéraux principaux dans le ciment : C_2S et C_3S . Plusieurs chercheurs comme Noumowé. N.A. (1995) [91], etc. ont fixé un intervalle de la température de la dégradation de la portlandite entre 450°C et 550°C. La décomposition de CSH et de la portlandite traduit, donc, la dégradation de la résistance à la compression du béton lorsqu'il est exposé à une température qui dépasse les 400°C. Nous concluons donc que la perte de masse est essentiellement due à la déshydratation des hydrates de la pâte de ciment, les CSH, l'ettringite, monocarboaluminate de calcium hydraté et la portlandite. Cette perte présente environ 4.42% de la masse initiale de l'échantillon. Plusieurs auteurs, parmi eux H. Fares. (2009), Noumowé .N.A.(1995) et T.Belkacem [91-92-93] ont montré l'effet de températures supérieures à 600°C sur le comportement du béton. Ils ont montré qu'à une température comprise entre 600-700°C, les CSH se décomposent et se transforment en une nouvelle forme de silicates bicalciques ($-\text{C}_2\text{S}$) et entre les températures 700-900°C, il ya la décomposition des granulats et des fillers calcaires. Celle-ci est accompagnée d'une libération de CO_2 .

Pour les autres échantillons, une présence remarquable est observée, pour les mêmes pics, de CSH, l'ettringite, portlandite et de silicates bicalciques avec une différence faibles de perte de masse.

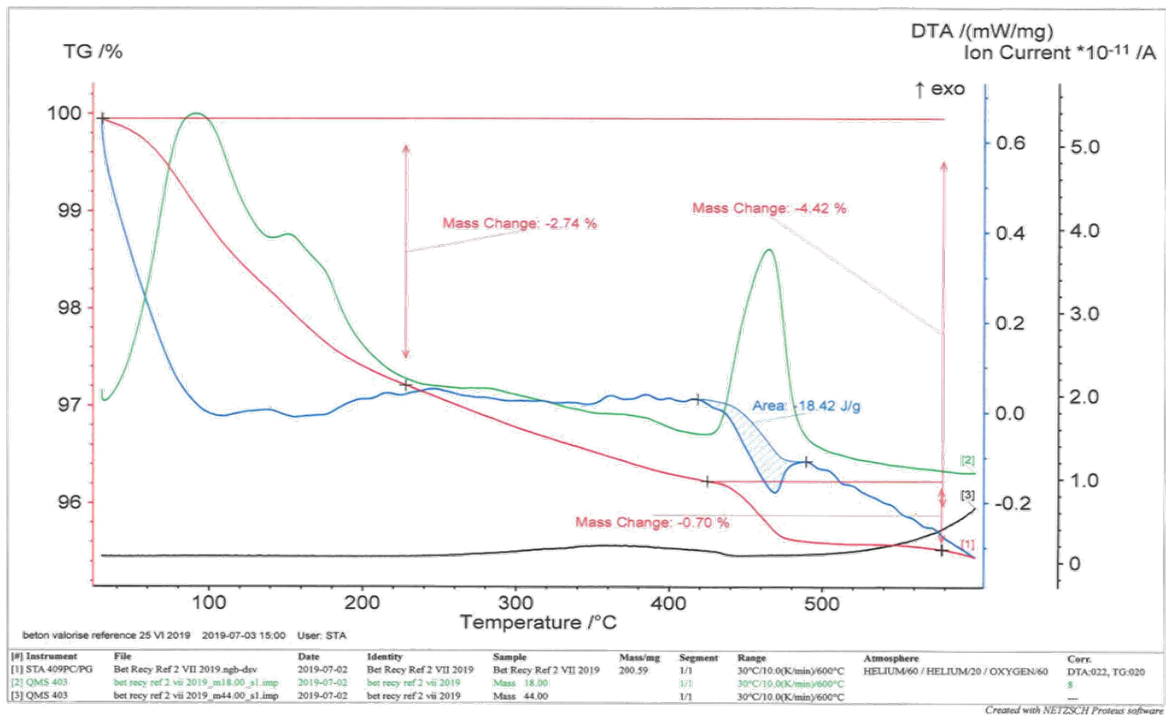


Figure 4.13: résultats d'analyse ATD ATG et DSC pour (BN)

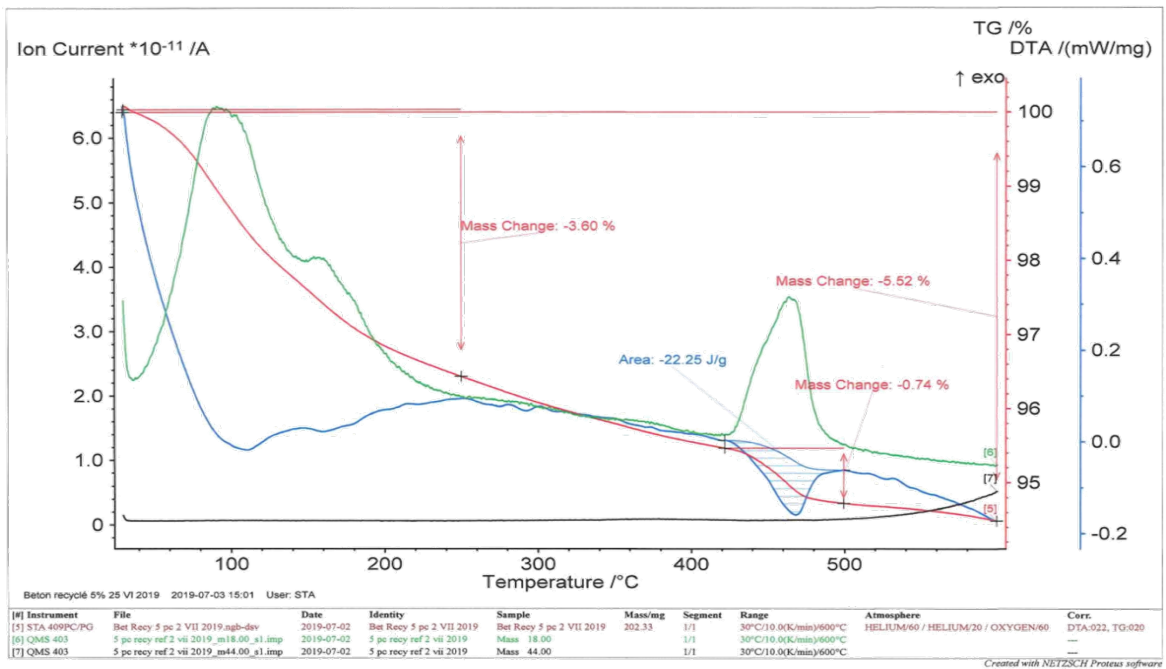


Figure 4.14: résultats d'analyse ATD ATG et DSC pour (BV5%)

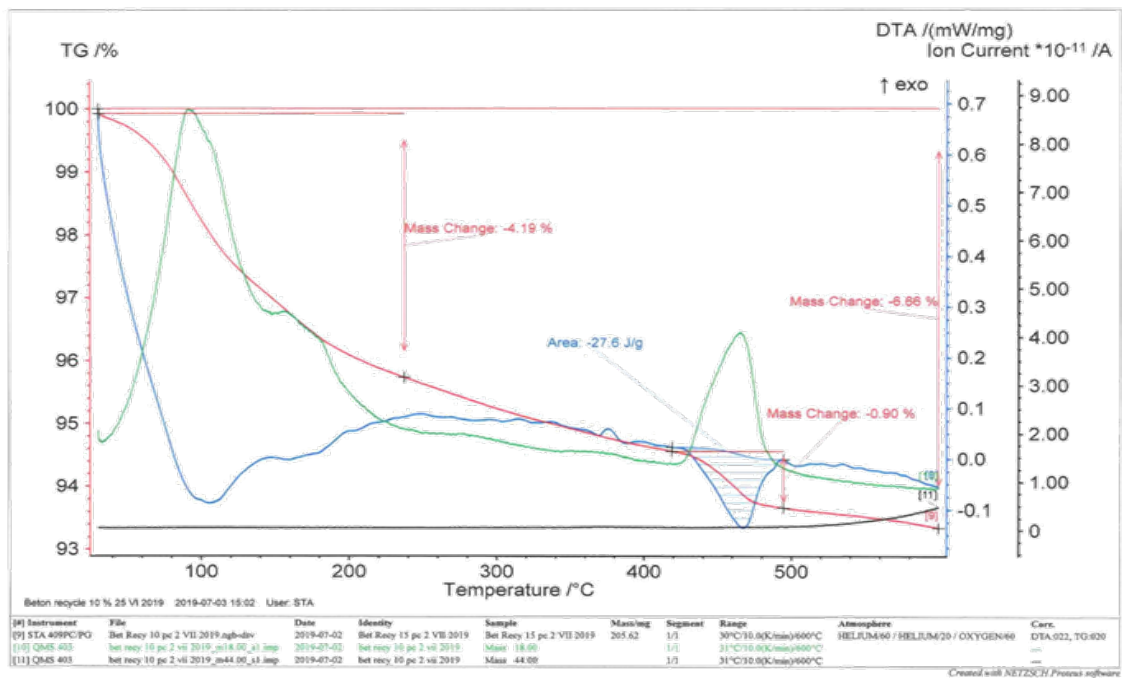


Figure 4.15: résultats d'analyse ATD ATG et DSC pour (BV10%)

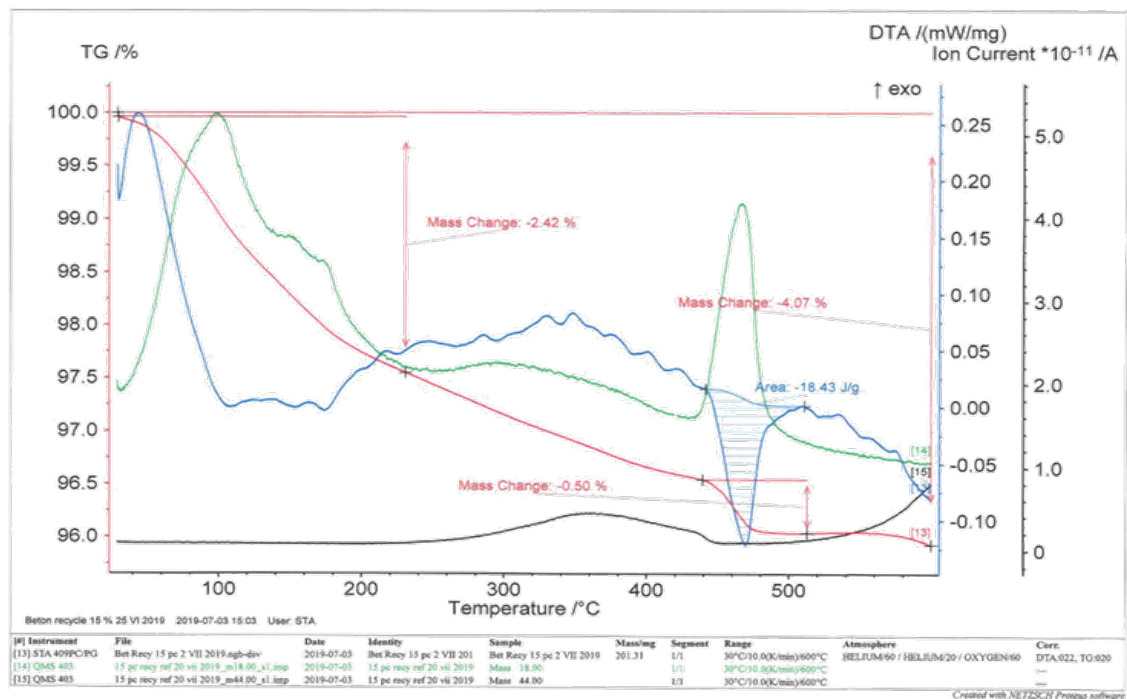


Figure 4.16: résultats d'analyse ATD ATG et DSC pour (BV15%)

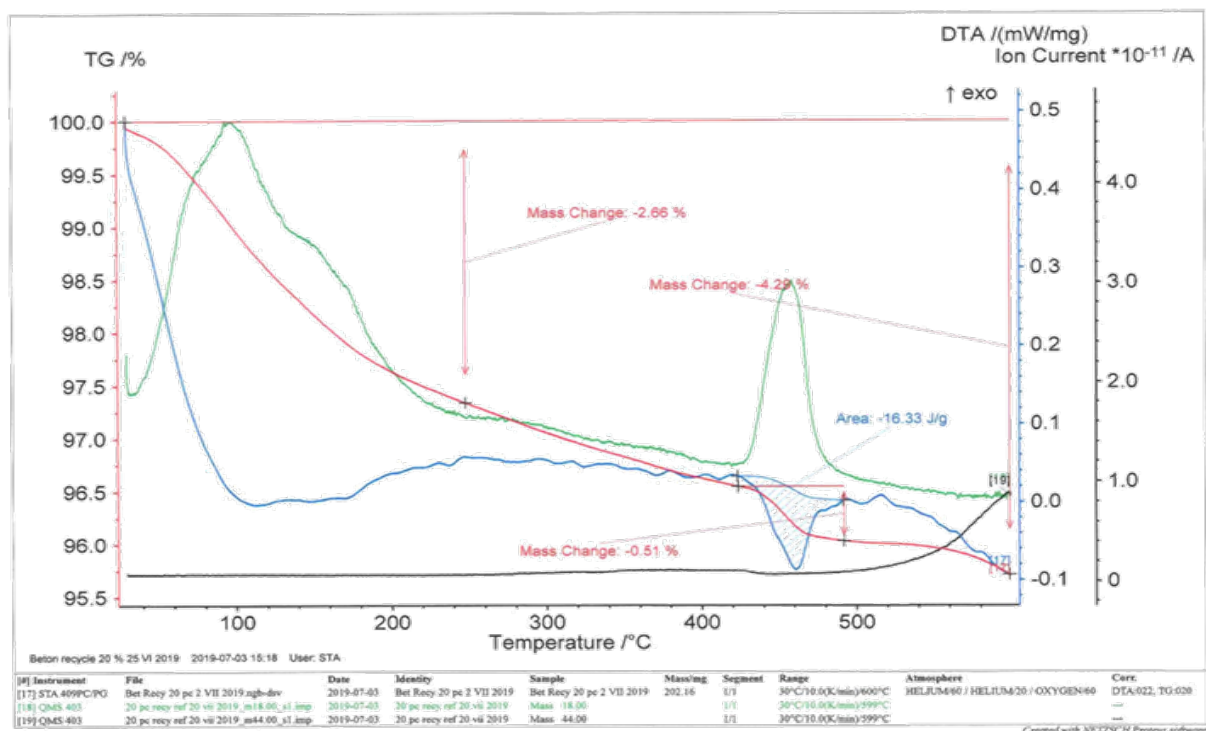


Figure 4.17: résultats d'analyse ATD ATG et DSC pour (BV20%)

2.2. Résultat de la conductivité thermique

Le tableau 4.8 montre le dosage d'agrégat recyclé utilisé pour les échantillons testés et les conditions de mesure :

Tableau 4.8 : le dosage d'agrégat recyclé et les données utilisées

Les échantillons	BN	BN 5 %	BN 10 %	BN 15 %	BN 20 %
% dosage des agrégats recyclés	0 %	5 %	10 %	15 %	20 %
Power(w)	2		2	2	2
Heating time (s)	400		400	400	400
Mesure time(s)	500		500	500	500

Les conductivités mesurées expérimentalement plusieurs fois dans la gamme de 20 ° C à 50 ° C et les résultats finaux du test sont présentés dans le tableau 4.9:

Tableau 4.9 : Les Valeurs de la conductivité thermique mesurée expérimentalement

Teneur en agrégats recyclés	20°	30°	40°	50°
BN	$\lambda = 1.808$ (w/m.k)	$\lambda = 1.559$ (w/m.k)	$\lambda = 1.552$ (w/m.k)	$\lambda = 1.483$ (w/m.k)
B 5%	$\lambda = 1.888$ (w/m.k)	$\lambda = 1.712$ (w/m.k)	$\lambda = 1.580$ (w/m.k)	$\lambda = 1.519$ (w/m.k)
B 10%	$\lambda = 1.860$ (w/mk)	$\lambda = 1.627$ (w/m.k)	$\lambda = 1.432$ (w/m.k)	$\lambda = 1.283$ (w/m.k)
B 15%	$\lambda = 1.868$ (w/m.k)	$\lambda = 1.717$ (w/m.k)	$\lambda = 1.432$ (w/m.k)	$\lambda = 1.417$ (w/m.k)
B 20 %	$\lambda = 1.641$ (w/m.k)	$\lambda = 1.638$ (w/m.k)	$\lambda = 1.486$ (w/m.k)	$\lambda = 1.423$ (w/m.k)

Dans ces résultats expérimentaux du test des propriétés de la conductivité thermique du béton recyclé, y compris les différents taux de remplacement des granulats recyclés dans le béton sont présentés et discutés.

Les conclusions suivantes sont tirées:

1. La capacité thermique du béton avec granulats recyclés est similaire à la capacité thermique du béton avec granulats naturels. La capacité thermique du béton dépend mutuellement de la conductivité thermique du béton.

2. La conductivité thermique du béton avec granulats naturels est différente de la conductivité thermique du béton avec granulats recyclés. L'utilisation d'agrégats recyclés en remplacement d'agrégats naturels dans le béton diminue la conductivité thermique. La diminution de la conductivité thermique du béton de granulats recyclés dépend du taux de remplacement des granulats recyclés dans le béton. Avec l'augmentation du taux de remplacement des granulats recyclés, la conductivité thermique du béton de granulats recyclés diminue.

3. La diminution de la conductivité thermique du béton dépend également de la qualité des granulats recyclés. Les résultats des tests ont montré que l'utilisation d'agrégats recyclés en remplacement d'agrégats naturels dans le béton entraîne une légère amélioration de la conductivité thermique. La capacité thermique du béton avec granulats recyclés est similaire à la capacité thermique du béton avec granulats naturels. Enfin, on peut dire que selon les propriétés thermiques, le béton de granulats recyclés peut être utilisé dans les mêmes applications que le béton classique.

4. L'effet de la température sur la conductivité thermique diminue avec l'augmentation de la température de l'air ambiant de (20 °C à 50°C) pour les 5 échantillons béton normal et béton avec granulats recyclés.

P. Morabito. (1989) [94] et Sungchul Yang. (2003) [95] et María Fenollera. (1944) [96] ont également signalé que la conductivité thermique diminue linéairement avec la température de l'échantillon de béton.

2.3. Résultat de la chaleur spécifique

Il s'agit de la chaleur qu'un matériau peut stocker par rapport à son volume. C'est la quantité de chaleur qui peut augmenter la température de 1°C d'un mètre cube de matériau.

L'étude expérimentale de la chaleur spécifique relative au volume a été menée pour chaque contenu d'agrégat recyclé et ce pour une température donnée. Les résultats de l'étude sont présentés dans le tableau ci-dessous. (Tableau 4.10).

Table 4.10: Les valeurs expérimentales de la chaleur volumique spécifique en pourcentage de l'agrégat recyclé à différentes températures

Teneur en agrégats recyclés	C (T = 20°C)	C (T = 30°C)	C (T = 40°C)	C (T = 50°C)
0%	2302 (J/K.m3)	2094 (J/K.m3)	2243(J/K.m3)	2144(J/K.m3)
5%	2300 (J/K.m3)	2177 (J/K.m3)	2144(J/K.m3)	2050(J/K.m3)
10%	2498 (J/K.m3)	2513 (J/K.m3)	2212(J/K.m3)	2147(J/K.m3)
15%	2700 (J/K.m3)	2596 (J/K.m3)	2351(J/K.m3)	2281(J/K.m3)
20%	2147 (J/K.m3)	2405 (J/K.m3)	1944(J/K.m3)	2057(J/K.m3)

2.4. Résultat de la diffusivité thermique

Les valeurs suivantes sont obtenues pour la diffusivité thermique D (m²/s) pour chaque teneur en agrégats recyclés pour une température donnée (tableau 4.11).

Tableau 4.11: les valeurs de la diffusivité thermique en fonction du pourcentage à différentes températures

Teneur en agrégats recyclés	D (T = 20 ⁰ C)	D (T = 30 ⁰ C)	D (T=40 ⁰ C)	D (T=50 ⁰ C)
0%	7,85 E-04	7,44 E-04	6,92 E-04	6,91 E-04
5%	8,20 E-04	7,86 E-04	7,37 E-04	7,40 E-04
10%	7,44 E-04	6,48E-04	6,47E-04	5,97E-04
15%	6,91 E-04	6,61 E-04	6,09 E-04	6,21 E-04
20%	7,64 E-04	6,81 E-04	7,64 E-04	6,91 E-04

La diffusivité thermique du matériau dépend de l'épaisseur des différentes couches du matériau et du temps de diffusion (Tableau 4.11). Les valeurs de la diffusivité thermique sont obtenues par calcul à partir des mesures de la conductivité thermique et de la chaleur spécifique du matériau. A partir des courbes de variation de la diffusivité thermique en fonction du pourcentage de granulats recyclés, nous pouvons constater qu'elle diminue avec la composition des granulats recyclés de 0 à 20°, et de 20 degrés à 50 degrés de température puisqu'elle est directement proportionnelle à la conductivité thermique et inversement proportionnelle à C, elle va donc diminuer avec la composition des granulats recyclés.

2.5. Résultat de l'effusivité thermique

Les valeurs suivantes sont obtenues pour l'effusivité thermique E (J / m².K.s^{1/2}) pour chaque teneur en cuivre pour une température donnée (tableau 4.12) à partir des mesures expérimentales de λ et C.

Tableau 4.12: valeurs de l'effusivité thermique en fonction du pourcentage à différentes températures

Teneur en agrégats recyclés	E (T = 20°C)	E (T = 30°C)	E (T = 40°C)	E (T = 50°C)
0%	6,45E+01	5,71 E+01	5,90 E+01	5,63 E+01
5%	6,58 E+01	6,10E+01	5,82E+01	5,58E+01
10%	6,81 E+01	6,39 E+01	5,62 E+01	5,24 E+01
15%	7,10 E+01	6,67 E+01	5,80 E+01	5,68 E+01
20%	5,93 E+01	6,27 E+01	5,37 E+01	5,41 E+01

L'effusivité thermique diminue rapidement avec la composition des agrégats recyclés en raison de sa dépendance directe de la conductivité thermique et de la densité thermique spécifique (Tableau 4.12).

2.6. Effet de la température sur les paramètres thermo-physique

Les résultats expérimentaux pour l'effet de la température sur la mesure de la conductivité thermique y compris les différentes températures sont présentés pour les 3 pourcentages qui sont importants 0,10 ,20 (%) du taux de remplacement des agrégats recyclés dans le béton, (figure 4.18 ; 4.19 .4.20 ; 4.21)

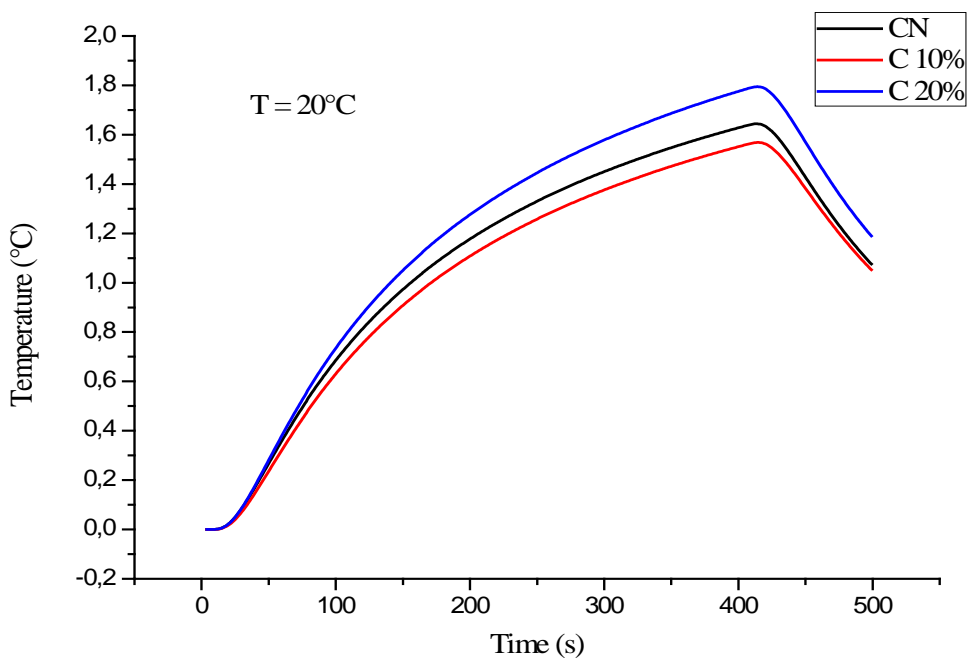


Figure 4.18 résultats expérimentaux de la température en fonction du temps a $T = 20^\circ$ de BN, B20 %, B10 %.

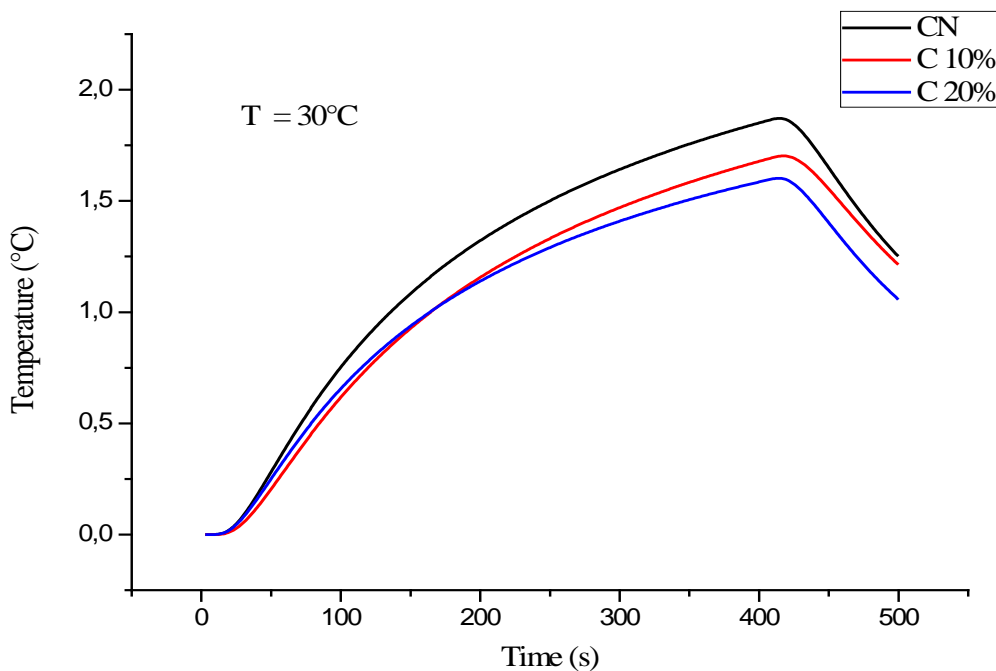


Figure 4.19: résultats expérimentaux de la température en fonction du temps a $T = 30^\circ$ de BN, B20 %, B10 %.

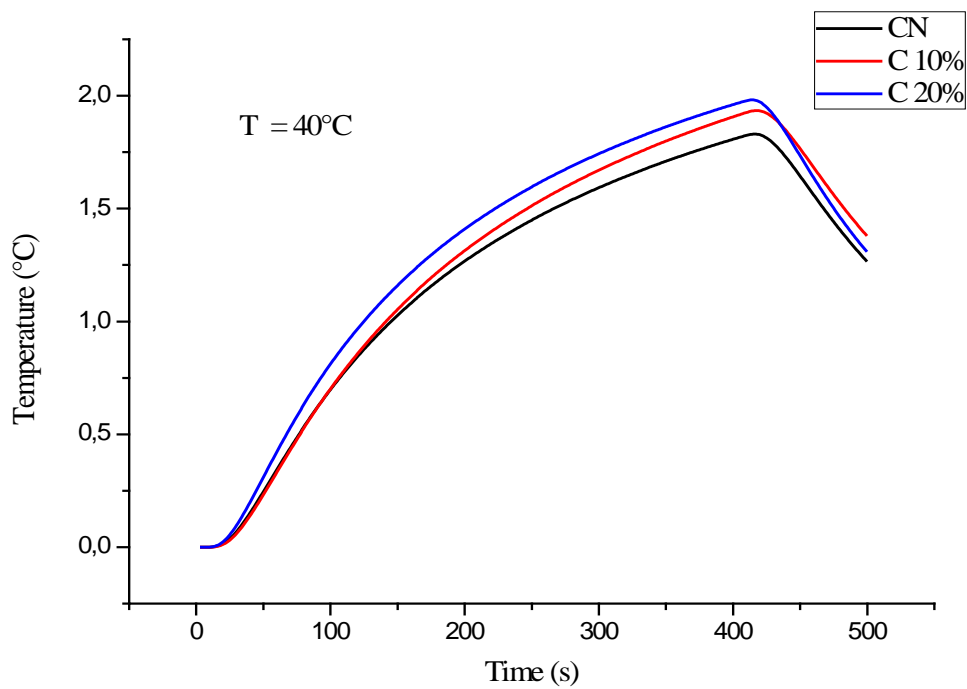


Figure 4.20: résultats expérimentaux de la température en fonction du temps a T = 40 ° de BN, B20 %, B10 %.

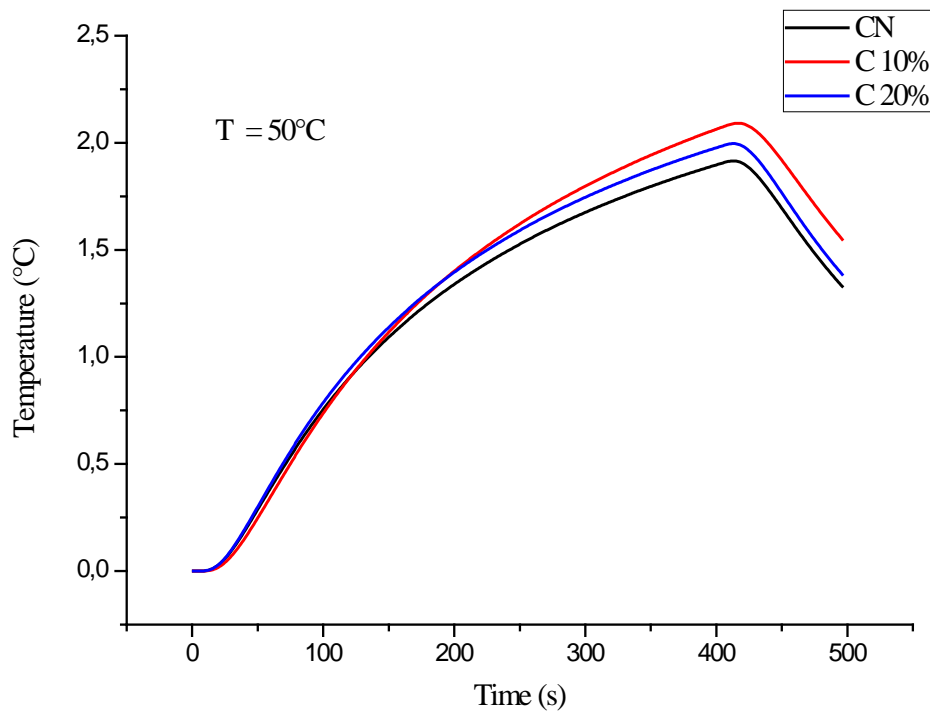


Figure 4.21: résultats expérimentaux de la température en fonction du temps a T = 50 ° de BN, B20 %, B10 %.

Discussion :

Dans la figure 4.18 : à la température de 20 °C :

Pour l'échantillon 1 BN (Béton Normale), la température pendant l'essai a augmenté lentement jusqu'à ce que son maximum soit atteint au bout d'un temps égal à $t_{(max)} = 413,5$ s. Après $t = 413,5$ s, la température diminue. Même cas pour l'échantillon 2 (Béton 10%), avec une température maximale $t_{(max)} = 414,5$ s et aussi pour l'échantillon 3 (béton 20%), avec une température maximale au temps $t_{(max)} = 414$ s.

Dans la figure 4.19 : à la température de 30 °C :

Pour l'échantillon 1 BN, (béton Normale) la température pendant l'essai augmente lentement jusqu'à ce que son maximum atteigne au bout d'un temps égal à $t_{(max)} = 414,5$ s. Après $t = 414,5$ s, la température diminue. Même cas pour l'échantillon 2. Béton (10%), avec une température maximale au Temps de $t_{(max)} = 414,5$ s. et aussi pour l'échantillon 3 béton 20%, avec une température maximale au Temps de $t_{(max)} = 414$ s.

Dans la figure 4.20 : à la température de 40 °C :

Pour l'échantillon 1 BN, (béton normale) la température pendant l'essai a augmenté lentement jusqu'à ce que son maximum atteigne au bout d'un temps de $t_{(max)} = 416$ s. Après 416 s, la température diminue. Même cas pour l'échantillon 2. Béton 10%, avec une température maximale au temps de $t_{max} (s) = 417,5$. et aussi pour l'échantillon 3 béton 20%, avec une température maximale de 414 s.

Dans la figure 4.21, à la température de 50 °C :

Pour l'échantillon 1 BN, béton normale la température pendant l'essai a augmenté lentement jusqu'à ce que son maximum atteigne au bout d'un temps maximum de $t_{max} (s) = 416$. Après 416 s, la température diminue. Même cas pour l'échantillon 2. Béton 10%, avec une température maximale au temps de $t_{max} (s) = 419,5$. et aussi pour l'échantillon 3 béton 20%, avec une température maximale de 416 s.

- ❖ Effet de la conductivité thermique en fonction de la température à différentes compositions de granulats recyclés.

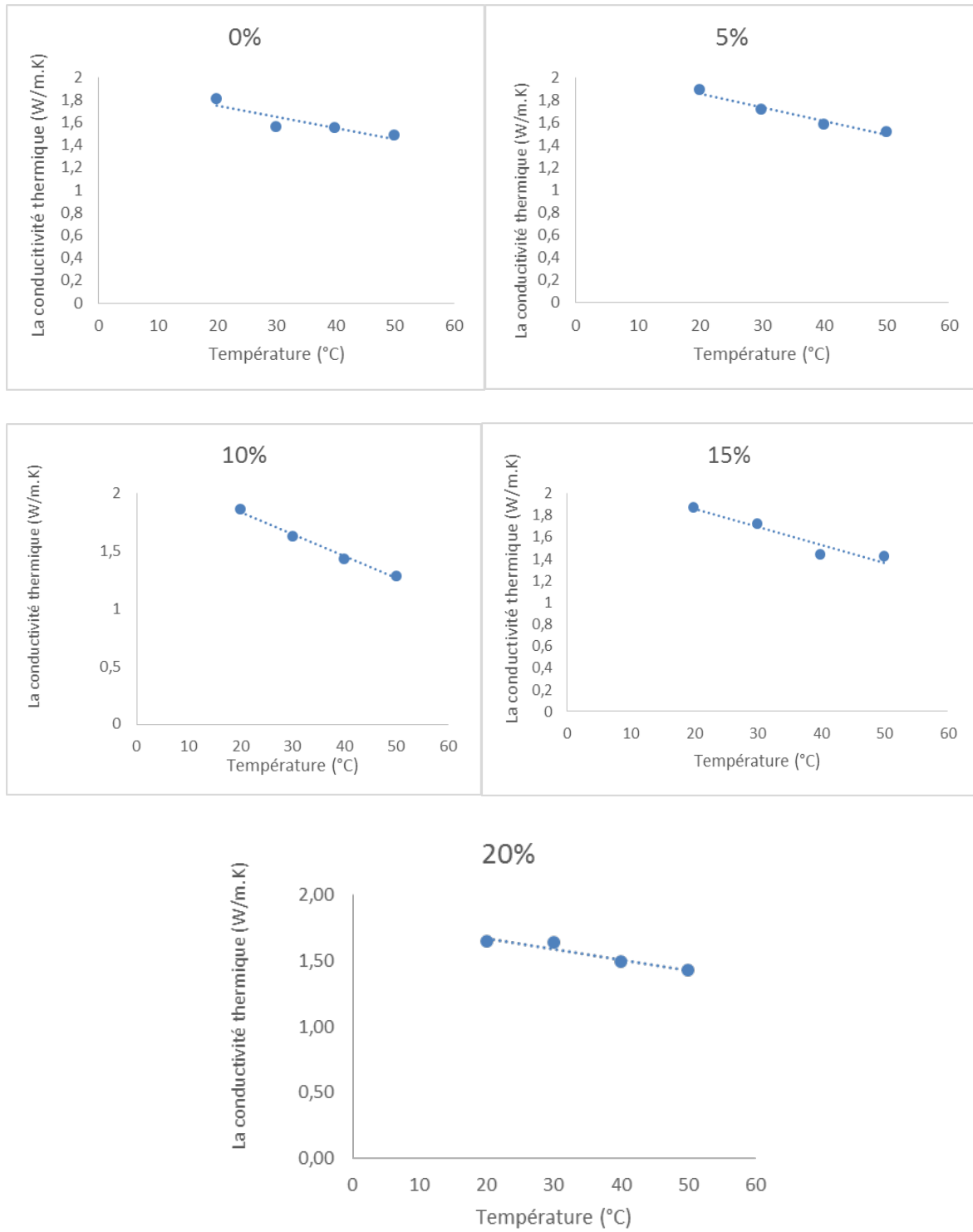
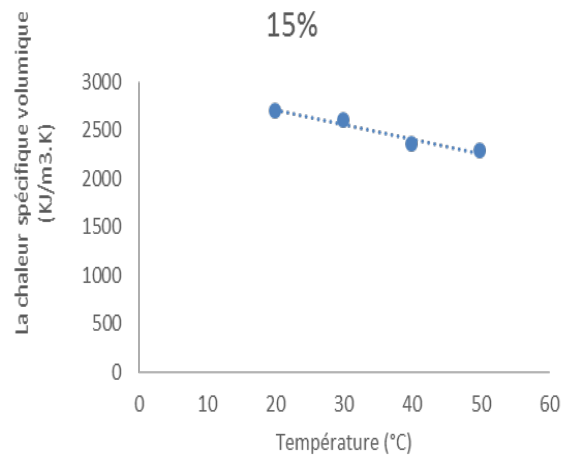
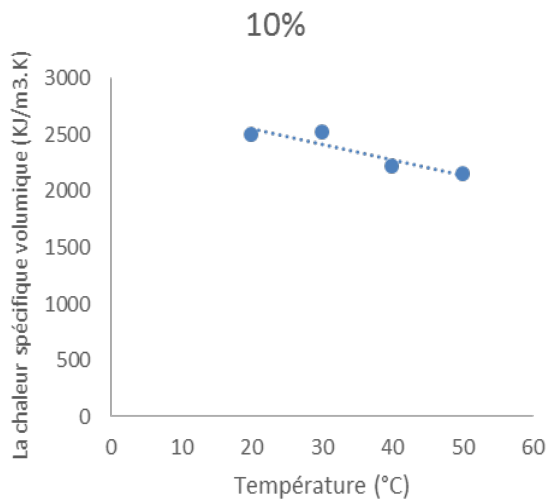
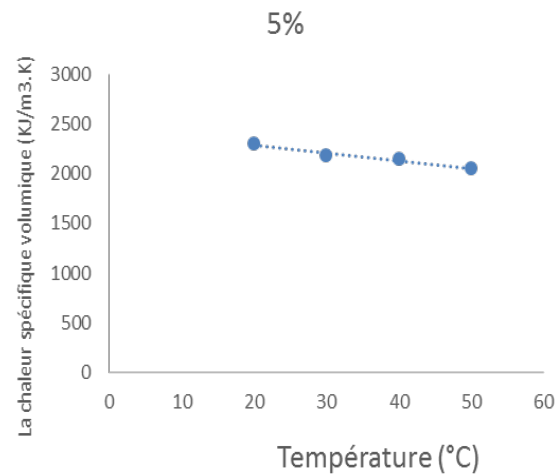
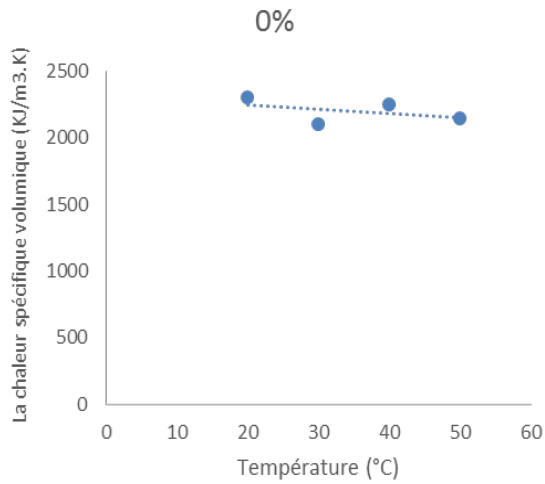


Figure 4.22 : Variation de la conductivité thermique en fonction de la température à différentes compositions de granulats recyclés

Pour le comportement de la conductivité thermique du matériau en fonction de la température (Fig. 4.22), nous avons constaté d'après nos mesures expérimentales qu'elle diminue avec l'augmentation de la température, et ce parce que la conductivité thermique équivalente est inversement proportionnelle à la température

- ❖ Effet de la chaleur spécifique en fonction de la température à différentes compositions de granulats recyclés.



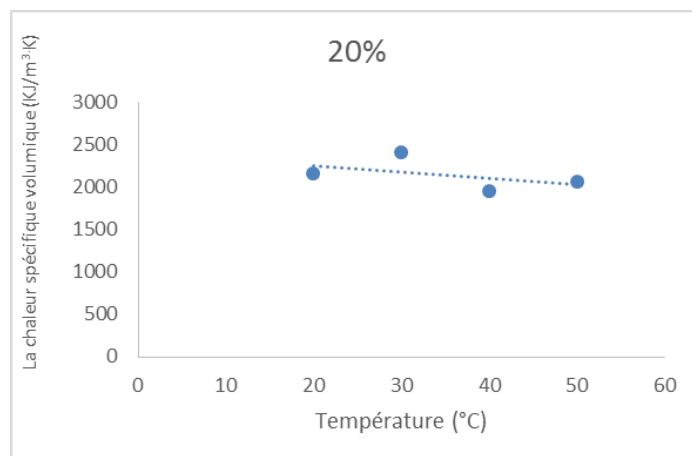
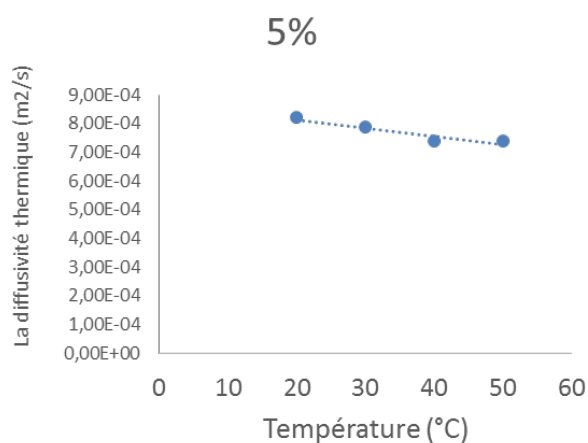
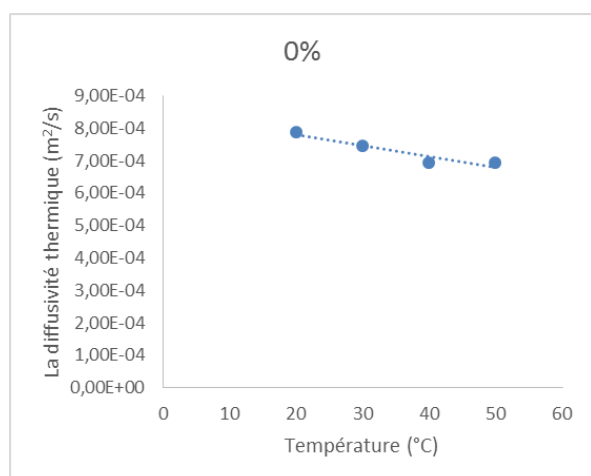


Figure 4.23 : Variation de la chaleur spécifique en fonction de la température

Selon des mesures expérimentales (Figure 4.23), la chaleur spécifique diminue avec la température car elle est inversement proportionnelle à celle-ci et qu'elle suit le même comportement de la conductivité thermique.

- ❖ Effet de la diffusivité thermique en fonction de la température à différentes compositions de granulats recyclés.



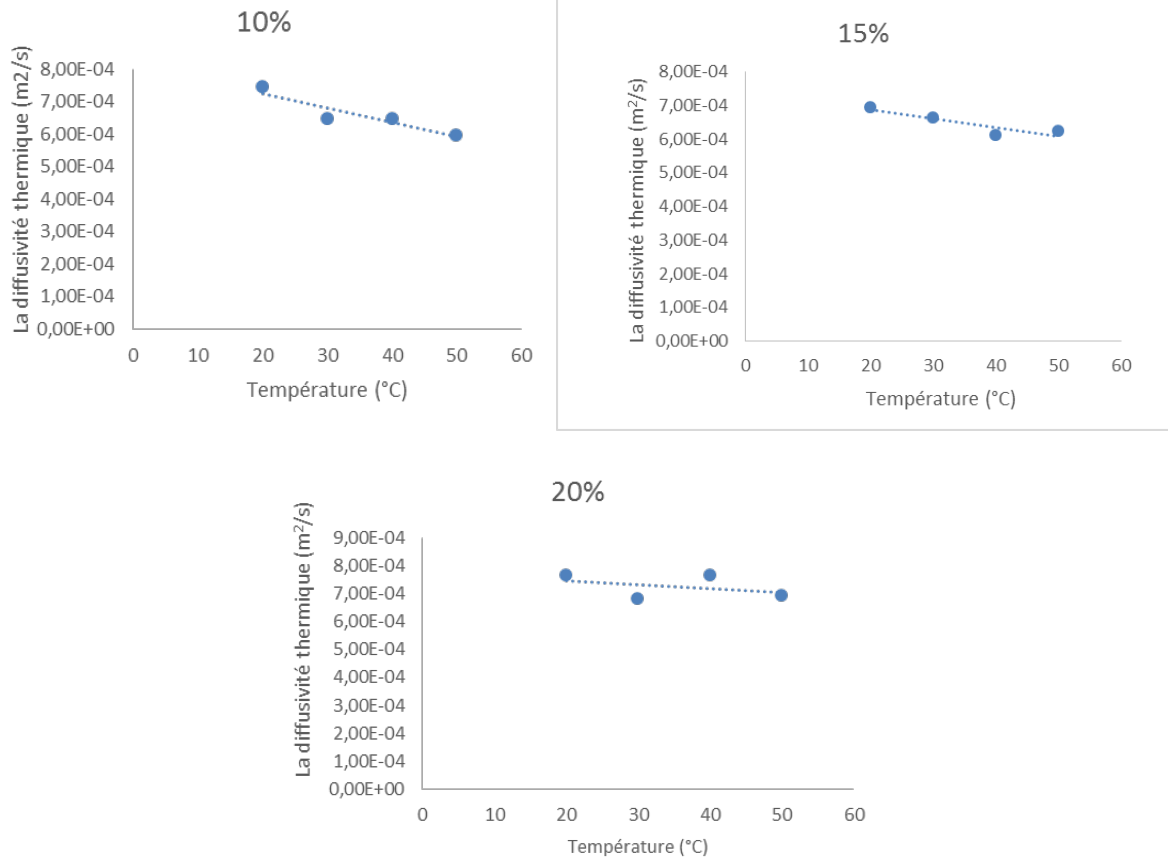


Figure 4.24 : Variation de la diffusivité thermique en fonction de la température

Selon le graphique de la diffusivité thermique en fonction de la température (Figure 4.24), nous pouvons remarquer qu'elle diminue avec la température, car le taux de diminution de la conductivité thermique avec la température est rapide par rapport au taux de diminution de la chaleur spécifique avec T, ce qui entraîne la diminution de D avec T.

- ❖ Effet de l'effusivité thermique en fonction de la température à différentes compositions de granulats recyclés.

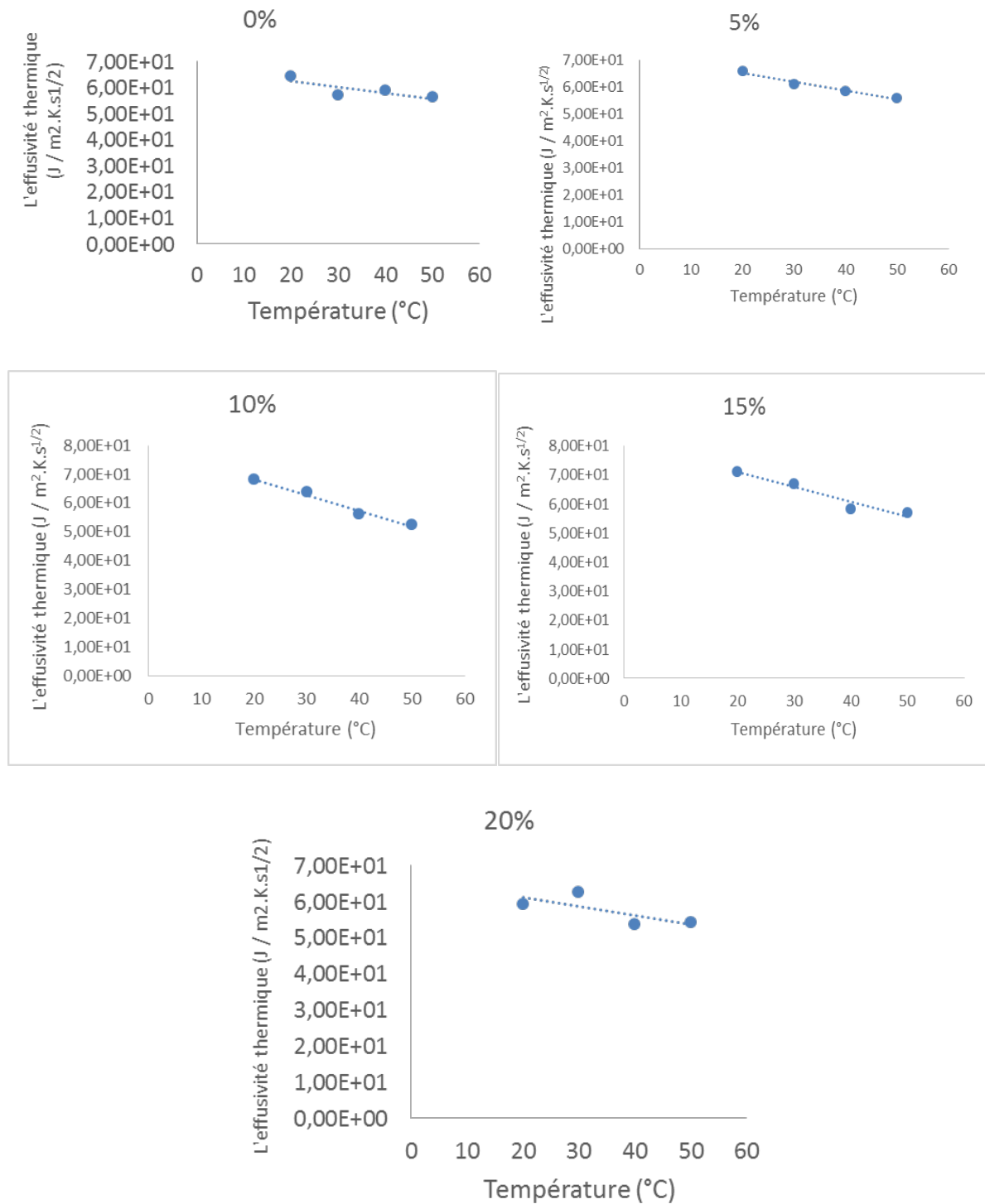


Figure 4.25 : Variation de l'effusivité thermique en fonction de la température

Selon les graphiques de la variation de l'effusivité thermique (Figure 4.25), nous pouvons constater qu'elle diminue considérablement avec la température puisque la conductivité thermique et la densité de chaleur spécifique diminuent en même temps.

3. Caractérisation mécanique et Pétro-physique

3.1. Résultats de la Résistance à la compression

La résistance à la compression du béton est généralement considérée comme la propriété la plus précieuse du point de vue des propriétés mécaniques, car elle donne généralement une image globale de la qualité du béton et est directement liée à d'autres propriétés. Les résultats du test de compression au 7^{ème} jour et 28^{ème} jour sont présentés sur le Tableau (4.13). La valeur de la résistance à la compression caractéristique est exigée aux 28 jours mesurés sur des cylindres de 150 mm de diamètre sur 300 mm de longueur (NM 10.1.008 2009) [97]. D'après le graphique (figure 4.26), le remplacement progressif du déchet à la place du sable entraîne une augmentation dans la valeur de la résistance à la compression comparée à celle du béton normal qui est considéré comme référence. En effet, le Bv5% et Bv10% présente une résistance à la compression moyenne de 25MPA. Au-delà de 15% de la masse de sable en déchets valorisés une augmentation de la résistance à la compression est remarquable avec un pourcentage de 16% pour 15% de déchets valorisés et 18% d'augmentation pour 20% de déchets valorisés. Une étude a été menée par un groupe de chercheur en remplaçant le sable dédié à la production de béton par le bloc de béton broyé présentant des caractéristiques similaires dont la granulométrie. Les résultats de cette étude ont montré que le nouveau matériau de synthèse possède une F_c supérieure à celle du béton de référence pour 30% de bloc de béton valorisé (K Muthusamy.2018) [98] analogiquement nos résultats ont prouvé que, effectivement, une augmentation de la F_c a été remarquée en remplaçant le sable par le bloc de béton broyé, présentant également une granulométrie similaire.

Tableau 4.13 : Détails des échantillons pour l'essai de la compression (7 jours et 28 jours)

Echantillon	7 Jours		28 Jours	
	Résistance à la compression de chaque échantillon σ_i (MPa)	Moyenne de la résistance σ (MPa)	Résistance à la compression de chaque échantillon σ_i (MPa)	Moyenne de la résistance σ (MPa)
BN	18,34	18	27,36	25
	16,46		23,72	
	18,54		22,65	
Bv 5%	15,85	17	24,30	25
	15,76		25,00	
	18,40		25,34	
Bv 10%	17,68	18	23,23	25
	19,53		27,78	
	17,13		23,78	
Bv 15%	20,90	20	28,62	29
	20,74		29,17	
	21,19		29,48	
Bv 20%	20,80	20	29,99	29,5
	19,90		29,38	
	20,30		29,88	

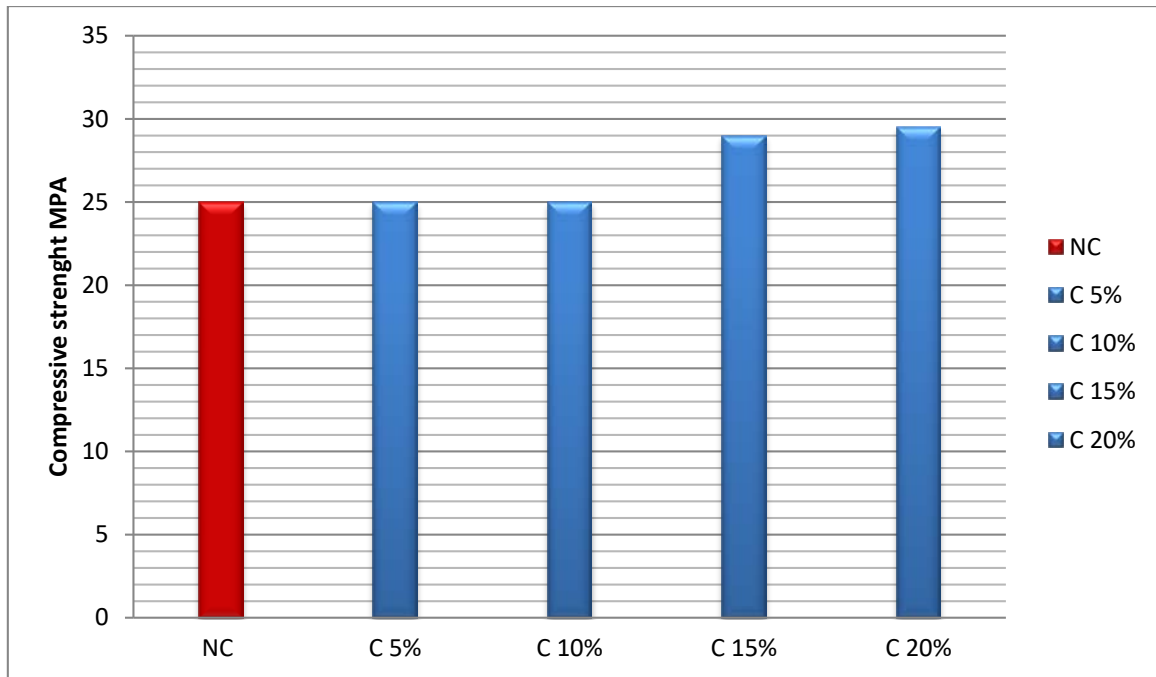


Figure 4.26 : Résistance à la compression des échantillons à 28 jours

3.2. Résultats de la porosité

Résultats de la porosité accessible à l'eau:

La porosité a été calculée pour chaque type en moyennant les porosités de 3 échantillons de chaque type. Les analyses ont été effectuées aux 28 et 90 jours. Les résultats sont présentés dans les tableaux 4.14 et 4.15. La porosité accessible à l'eau est un paramètre de premier ordre dans l'évaluation et la prévision de la durabilité. C'est en effet un indicateur de la qualité du matériau. Il va de soi que la porosité est le nombre de pores dans un matériau ; pour le béton il est nécessaire de rappeler les différents types de pores caractérisés par leur diamètre qui sont présentés dans la figure (4.27). La mise à l'échelle va de droite à gauche et couvre des diamètres allant de 10 mm à 1 Å. (Ralejs Tepfers .2012) [99].

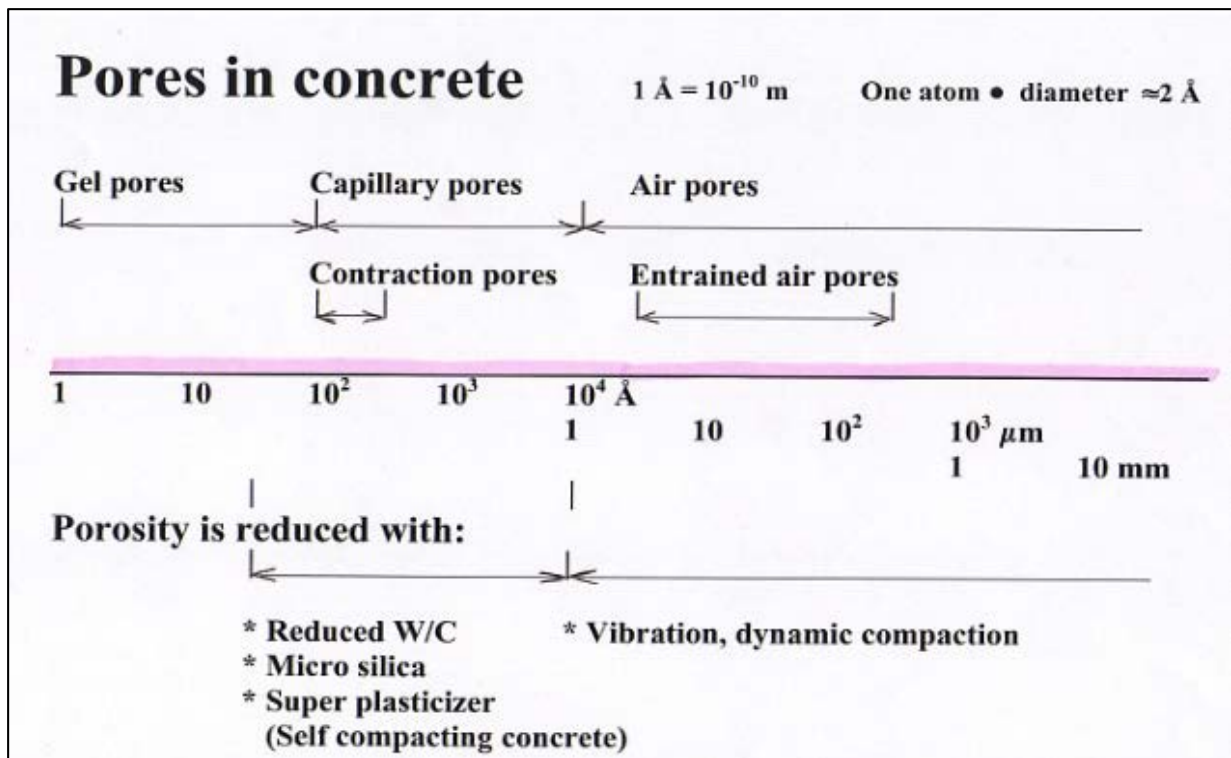


Figure 4.27 : différents types de pores

Les tableaux (4.14 et 4.15) permettent de bien visualiser l'influence de la composition du béton en matériau valorisé sur la porosité. La valeur de la porosité reste la même pour 5% et 10% au-delà de 15% elle augmente : 14,9% de pores pour le béton de type 15% et 14,7% de pores pour le béton de type 20%. Donc à ce niveau une valorisation de 20% de bloc de béton nous permet d'obtenir une bonne porosité du matériau comparable à celle du béton de référence. Une étude a été effectuée sur la mesure de porosité d'un béton comprenant une composition de matériaux broyés valorisés ; les résultats ont affichés des valeurs de porosité supérieure à celle de cette suivante étude Ayda S et al.(2013) [100]. On peut considérer que les échantillons valorisés sont plus au moins compacte ; et ce en comparant leurs porosité avec celle du béton normal.

Le test de durabilité présente des valeurs de porosité supérieur ce qui permet de conclure que la compacité du béton diminue. La porosité du béton 15% et 20% est tout de même proche de celle de l'échantillon de 28 jours avec une différence de 0,8%.

Tableau 4.14 : La porosité calculée pour chaque type en moyennant pour les 3 échantillons (28 jour)

28 Jour	B_N/1	B_N/2	B_N/3
M eau	541,63	526,25	543,33
M air	931,66	905,26	936,85
M sec	871,23	850,00	879,00
Por %	15,5	14,6	14,7
Por_{moy} %	14,9		

28 Jour	B_v 5%/1	B_v 5%/2	B_v 5%/3
M eau	540,37	526,05	556,25
M air	923,68	900,88	954,38
M sec	869,25	845,51	893,52
Por %	14,2	14,8	15,3
Por_{moy} %	14,8		

28 Jour	B_v 10%/1	B_v 10%/2	B_v 10%/3
M eau	518,63	514,13	523,40
M air	907,63	899,56	914,61
M sec	850,28	843,48	855,09
Por %	14,7	14,5	15,2
Por_{moy} %	14,8		

28 Jour	B_v 15%/1	B_v 15%/2	B_v 15%/3
M eau	553,11	550,90	556,49
M air	935,98	940,31	958,89
M sec	877,16	884,31	898,53
Por %	15,4	14,4	15,0
Por_{moy} %	14,9		

Type de béton	B_v 20%/1	B_v 20%/2	B_v 20%/3
M eau	530,08	300,34	349,46
M air	926,60	515,83	610,13
M sec	865,34	481,15	569,55
Por %	14,4	15,1	14,6
Por_{moy} %	14,7		

Tableau 4.15 : La porosité calculée pour chaque type en moyennant pour les 3 échantillons (90 jour)

90 Day	BN/1	BN/2	BN/3
M eau	550,92	579,27	557,45
M air	936,32	990,18	960,20
M sec	877,15	923,10	889,84
Por %	15,4	16,3	17,5
Por moy %	16.4		

90 Day	Bv5%/1	Bv5%/2	Bv5%/3
M eau	553,40	555,21	567,43
M air	947,26	944,46	965,52
M sec	880,89	884,14	903,12
Por %	16,9	15,5	15,7
Por moy %	16.0		

90 Day	Bv10%/1	Bv10%/2	Bv10%/3
M eau	520,57	531,05	544,48
M air	902,12	914,44	938,69
M sec	839,88	853,20	876,76
Por %	16,3	16,0	15,7
Por moy %	16.0		

90 Day	Bv15%/1	Bv15%/2	Bv15%/3
M eau	561,29	501,14	554,99
M air	960,73	855,70	951,57
M sec	898,80	853,20	888,81
Por %	15,5	15,7	15,8
Por moy %	15.7		

90 Day	B20%/1	B20%/2	B20%/3
M eau	531,83	542,77	540,96
M air	953,77	938,71	940,57
M sec	890,80	876,60	874,30
Por %	14,9	15,7	16,6
Por moy %	15,7		

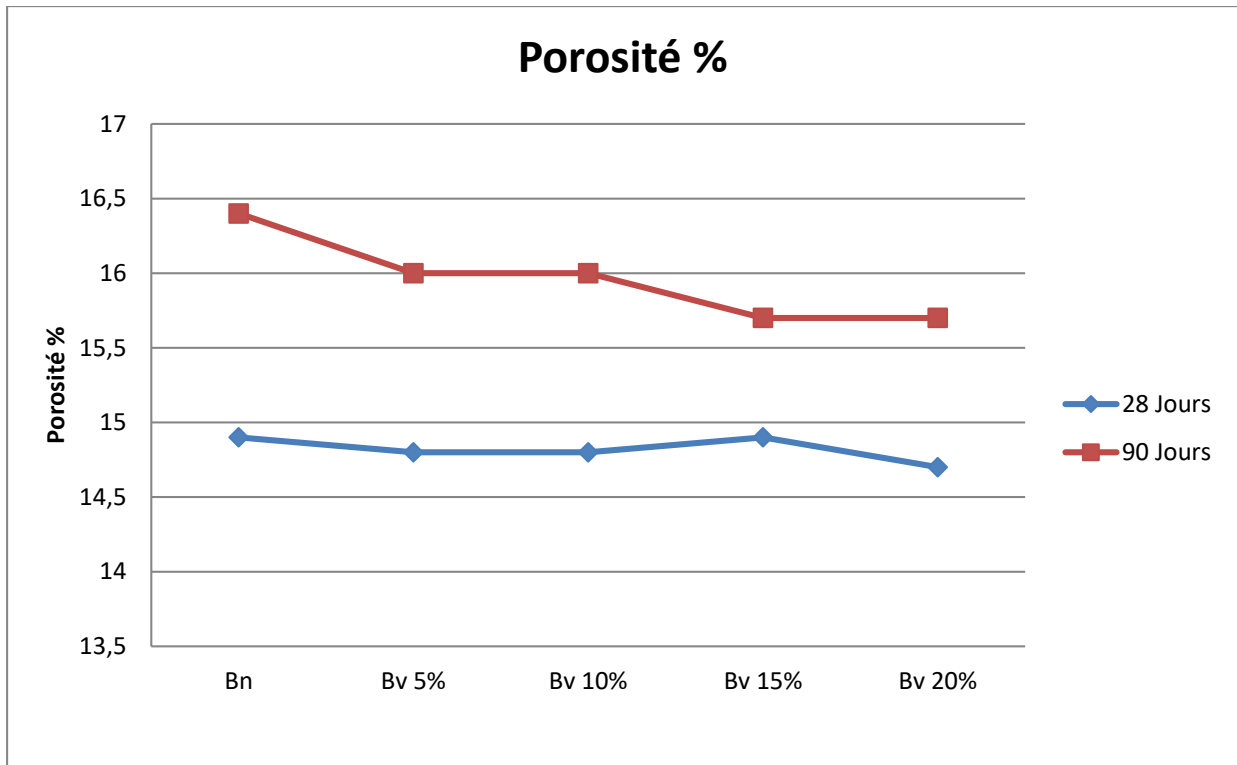


Figure 4.28: résultats du test de la porosité (28 et 91 Jour)

Conclusion

Le béton recyclé broyé a été utilisé pour remplacer partiellement le sable dans le nouveau béton. Jusqu'à 20 % en poids du contenu total a été remplacé par le matériau recyclé.

Pour le béton 20%, la porosité diminue et la résistance à la compression augmente ; ceci est comparé aux normes en vigueur et montre que les C20% ont de bonnes caractéristiques thermomécaniques.

- ❖ La baisse de la porosité du béton à 20 % entraîne également une baisse de la diffusion des chlorures et explique la valeur maximale de la résistance à la compression pour C20 %
- ❖ Le remplacement du sable par du béton recyclé améliore la résistance mécanique et réduit la diffusion des chlorures. Le béton à 20% de sable recyclé permet d'obtenir des caractéristiques intéressantes en termes de durabilité et de fiabilité. En effet, le béton 20% a une résistance à la compression de 29,5 MPa, une diffusion des chlorures de $14.410-12 \text{ m}^2/\text{S}$ et une porosité de 14,7%. Il ressort que pour 20% des paramètres du béton étudiés, ses performances mécaniques sont meilleures par rapport à des pourcentages plus faibles. Il serait intéressant d'étudier des remplacements encore plus importants.
- ❖ À 91 jours, la porosité et la diffusion des chlorures diminueront, ce qui signifie que le remplacement du sable dans le béton recyclé réduit le risque de corrosion par rapport au béton normal.

Chapitre V. Modélisation numérique

Introduction

Le but de ce chapitre est d'utiliser la modélisation numérique basée sur la reformulation des équations de conservation sur chaque élément du maillage. (Recktenwald .2011), (Guermond. J.L.2002), (Alexei Stoukov.2012) [101-102-103], Les résultats sont présentés dans ce chapitre ainsi la validité du modèle numérique se basera sur la confrontation des résultats numériques avec ceux de l'expérimentation. Avant d'aborder la résolution théorique et numérique de ce modèle, nous allons décrire plus précisément le principe et les objectifs de cette modélisation.

1. Principe de la modélisation

La modélisation des phénomènes de transfert en milieux poreux s'inspire directement des méthodes classiques de la mécanique des milieux continus pour rechercher les expressions locales des lois de conservation .Toutefois, cette approche ne peut pas être mise en pratique en raison de la complexité de la géométrie de l'espace poreux, il convient, en général, d'effectuer un changement d'échelle, dont l'étape essentielle consiste à définir un volume élémentaire représentatif, permettant d'établir une équivalence entre le milieu poreux et un milieu continu fictif. Par opposition avec l'échelle du milieu continu classique, dite microscopique, l'échelle du milieu continu fictif équivalent est dite macroscopique.

1.1. Méthode des différences finis

La méthode des différences finies consiste à discrétiser les équations continues aux nœuds d'un maillage prédéfini en calculant chaque dérivée partielle à l'aide de séries de Taylor tronquées pour obtenir des équations linéaires reliant la valeur de mêmes inconnues aux nœuds voisins. L'écriture de cette transformation pour tous les nœuds du maillage conduit à un système algébrique dont la solution permet d'obtenir la distribution du potentiel \vec{A} et V dans le domaine d'étude. De mise en œuvre simple, cette méthode s'adapte mal aux dispositifs de géométrie complexe à cause de « la rigidité » du maillage. De passage d'un milieu physique à un autre (fer-air) et de non-linéarités (saturation...), nécessite un traitement spécifique.

1.2. Méthode des éléments finis

Le principe fondamental de la méthode des éléments finis réside dans le découpage du domaine d'étude en domaines élémentaires de dimension finie et à représenter le potentiel \vec{A} et V par une approximation polynomiale dans chacune de ces régions ; ensuite, l'erreur due à l'approximation doit être minimisée (Jean-Baptiste.2010) [104]. Parmi différentes formulations possibles, la méthode dite de Rayleigh-Ritz qui base sur l'expression qui représente l'énergie électromagnétique de la méthode de Galerkin.

1.3. Méthode des volumes finis

La méthode des volumes finis est une technique de discrétisation qui convertit les équations de conservation aux dérivées partielles en équations algébriques qui peuvent être résolues numériquement. La technique des volumes de contrôle consiste dans l'intégration des équations aux dérivées partielles sur chaque volume de contrôle pour obtenir les équations discrétisées qui conservent toutes les grandeurs physiques sur un volume de contrôle (vc), Le volume de contrôle de type rectangulaire nous permet de modéliser les phénomènes électromagnétiques que pour des géométries simples, elle consiste à subdiviser le domaine d'étude en volumes élémentaires, de forme simple, adjacents chaque volume est délimité par, deux interfaces, dans le cas monodimensionnel (e,v), quatre interfaces dans le cas bidimensionnel chaque volume entoure un nœud (A. Quarteroni.2008) [105].

2. Construction du modèle

2.1. Schéma du dispositif

L'échantillon étudié est un cylindre en béton. Il a un diamètre de 5 cm x 3,23 cm de hauteur (Figure 5.1).

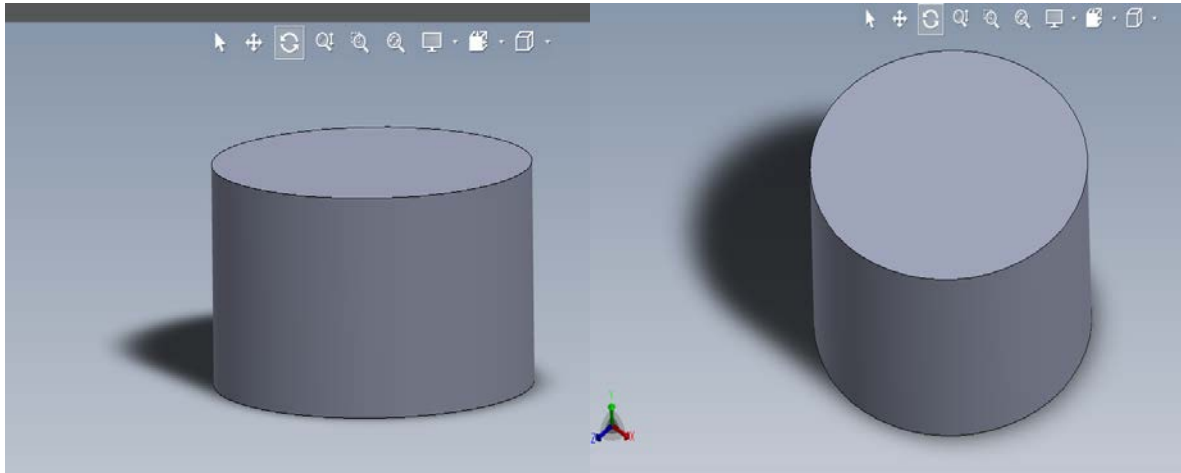


Figure 5.1 : schéma du modèle étudié

3. Formulation mathématique

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons exclusivement au transfert thermique par conduction, ainsi nous négligerons les autres modes de transfert.

3.1. Mise en équation du problème

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (5.1)$$

D'après les hypothèses posées sur l'équation de l'énergie dans le cylindre figure 5.1 s'écrivant selon la forme suivante :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{1}{r} \left(\frac{\partial}{\partial r} (r \nabla T) \right) + \lambda \frac{\partial}{\partial z} (\nabla T) \quad (5.2)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{1}{r} \left(\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) \right) + \lambda \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (5.3)$$

L'équation d'énergie s'écrit par Eq :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{1}{r} \left(\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right) + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (5.4)$$

Avec k = la conductivité thermique

3.2. Projection cylindrique

3.2.1. Formulation mathématique du problème

Le transfert d'énergie dans le matériau en coordonnées cylindriques bidimensionnelles est régi par l'équation de chaleur suivante:

$$\rho C p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{1}{r} \left(\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right) + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (5.6)$$

3.2.2. Conditions initiales

Les conditions aux limites appropriées, dans notre cas, soit: (pour $r=0$ et $r=R$)

Pour la résolution des équations précédemment établies, on ajoute les conditions aux limites appropriées.

Pour :

$$r=0 \quad -K \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0$$

$$r=R \quad -k \frac{\partial T}{\partial r} = \delta \varepsilon (T^4 - T_{\infty}^4) + h(T - T_{\infty})$$

4. Méthode de résolution

4.1. Introduction

Nous avons présenté ici les équations traduisant la conservation de l'énergie. Ces équations n'admettent pas de solutions analytiques. Pour cela, nous avons opté à l'utilisation de la méthode des volumes finies pour la discrétisation du système d'équations. Le système algébrique issu de cette discrétisation est résolu à l'aide de la méthode implicite balayage et Gauss – Seidel. (Gilbert. J. Ch.) (Ciarlet. P. G. 1982) [106-107].

Ces méthodes nécessitent deux étapes importantes : maillage et discrétisation

- le maillage : il consiste à diviser le domaine en plusieurs intervalles réguliers appelés volumes de contrôle.
- La discrétisation : lors de cette étape les équations sont intégrées dans les volumes de contrôle. (Zienkiewicz. O. C. 2005) et (Raviart P.A. 2004) [108-109].

4.2. Maillage

Notre domaine d'étude est découpé suivant la figure suivante :

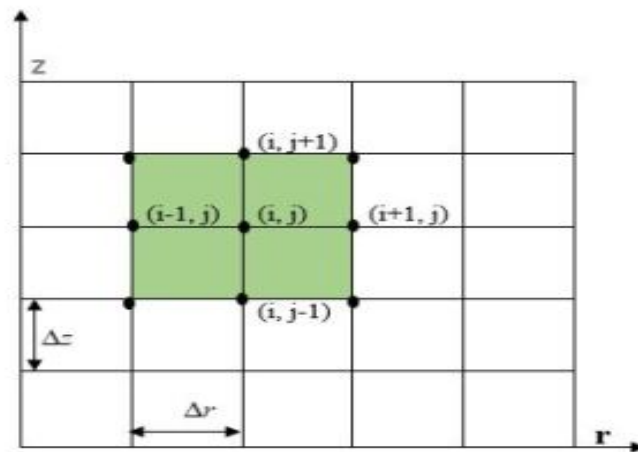


Figure 5.2 : Le maillage de calcul structuré à 2D

Où i est l'indice de discrétisation suivant l'axe radial r puis j est l'indice de discrétisation suivant l'axe z .

Par la suite, nous allons adopter les maillages suivants :

$$r(i) = (i - 1)\Delta r$$

$$z(j) = (j - 1)\Delta z$$

4.3. Discrétisation

La forme intégrale de l'équation de la chaleur en coordonnées cylindrique est donnée par :

$$\rho C p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{1}{r} \left(\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right) + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (5.7)$$

D'où

$$\iint \rho C p \frac{\partial T}{\partial t} dv dt = \iint \frac{k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) dv dt + \iint k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} dv dz \quad \text{Ou} \quad dv = 2\pi r dr dz$$

$$\iint \rho C p \frac{\partial T}{\partial t} r dr dz dt = \iint \frac{k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) r dr dz dt + \iint k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} r dr dz dt \quad (5.8)$$

$$\rho C p (T_p^e - T_p^o) \left(\frac{r_e^2}{2} - \frac{r_\theta^2}{2} \right) \Delta z = k \left(\left(r_e \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_e - r_\theta \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_\theta \right) \right) \Delta z \Delta t + k \left(\frac{r_e^2}{2} - \frac{r_o^2}{2} \right) \left(\left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_n - \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_s \right) \Delta t \quad (5.9)$$

$$\rho C p (T_p^e - T_p^o) \left(\frac{r_e^2}{2} - \frac{r_o^2}{2} \right) \Delta z = k \left(r_e \frac{T_E - T_p}{\delta r} - r_\theta \frac{T_p - T_o}{\delta r} \right) \Delta z \Delta t + k \left(\frac{r_e^2}{2} - \frac{r_o^2}{2} \right) \left(\frac{T_N - T_p}{\delta z} - \frac{T_p - T_s}{\delta z} \right) \Delta t \quad (5.10)$$

De nombreuses méthodes ont été développées pour résoudre l'équation de transfert irradiatif (RTE) dans des configurations cylindriques multidimensionnelles.

Dans cette simulation, nous avons opté pour la méthode des volumes finis, la méthode implicite Balayage et la méthode Gauss – Seidel (Hammoumi, A et al .2010) [110].

L'équation de la chaleur (Eq. (5.7)) peut être exprimée sous la forme suivante:

$$T_p \left(\rho C p \Delta z \left(\frac{r_e^2}{2} - \frac{r_\theta^2}{2} \right) + \left(\frac{k}{\delta r} r_e + \frac{k}{\delta r} r_\theta \right) \Delta z \Delta t + \frac{2k}{\delta z} \left(\frac{r_e^2}{2} - \frac{r_\theta^2}{2} \right) \Delta t \right) = T_E \left(\frac{k}{\delta r} r_e \Delta z \Delta t \right) + T_o \left(\frac{k}{\delta r} r_\theta \Delta z \Delta t \right) + T_N \left(\frac{k}{\delta z} \left(\frac{r_e^2}{2} - \frac{r_\theta^2}{2} \right) \Delta t \right) + T_s \left(\frac{k}{\delta z} \left(\frac{r_e^2}{2} - \frac{r_\theta^2}{2} \right) \Delta t \right) + \rho C p \left(\frac{r_e^2}{2} - \frac{r_\theta^2}{2} \right) \Delta z \quad (5.11)$$

L'équation algébrique finale est donnée par l'expression suivante:

$$a_p T_p = a_E T_E + a_o T_o + a_N T_N + a_S T_S + b \quad (5.12)$$

Avec :

$$a_E = \frac{k}{\delta r} r_e \Delta z \Delta t$$

$$a_o = \frac{k}{\delta r} r_\theta \Delta z \Delta t$$

$$a_N = \frac{k}{\delta z} \left(\frac{r_e^2}{2} - \frac{r_\theta^2}{2} \right) \Delta t$$

$$a_S = \frac{k}{\delta z} \left(\frac{r_e^2}{2} - \frac{r_\theta^2}{2} \right) \Delta t$$

$$\dot{a}_p = \rho C_p \Delta z \left(\frac{r_e^2}{2} - \frac{r_\theta^2}{2} \right)$$

$$b = \dot{a}_p T_p$$

$$a_p = \dot{a}_p + a_E + a_o + a_N + a_S$$

On applique les conditions aux limites spatiales initiales :

$$\text{Pour } r=0 \quad -k \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0$$

$$\int_{V_c} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} r \, dr \, dz \, dt = \int_{V_{c/2}} \frac{k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) r \, dr \, dz \, dt + \iint_{V_{c/2}} k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} r \, dr \, dz \, dt$$

(5.13)

$$\begin{aligned} \rho C_p (T_p - T_p^o) \left(\frac{r_e^2 - r_p^2}{2} \right) \Delta z &= k \left(r_e \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_e - r_p \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_p \right) \Delta z \Delta t + \\ &k \left(\frac{r_e^2 - r_p^2}{2} \right) \left(\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_n - \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_s \right) \Delta t \end{aligned} \quad (5.14)$$

$$T_p \left(\rho C_p \left(\frac{r_e^2 - r_p^2}{2} \right) \Delta z + k \frac{r_e}{\delta r} \Delta z \Delta t + \frac{2k}{\delta z} \left(\frac{r_e^2 - r_p^2}{2} \right) \Delta t \right) = T_E \left(k \frac{r_e}{\delta r} \Delta z \Delta t \right) + T_0(0) + T_N \left(\frac{k}{\delta z} \left(\frac{r_e^2 - r_p^2}{2} \right) \Delta t \right) + T_S \left(\frac{k}{\delta z} \left(\frac{r_e^2 - r_p^2}{2} \right) \Delta t \right) + \rho C_p \left(\frac{r_e^2 - r_p^2}{2} \right) \Delta z T_p^0 \quad (5.15)$$

L'équation algébrique finale est donnée par l'expression suivante:

$$a_p T_p = a_E T_E + a_N T_N + a_S T_S + b \quad (5.16)$$

Avec :

$$a_E = \frac{k}{\delta r} r_e \Delta z \Delta t$$

$$a_N = \frac{k}{\delta z} \left(\frac{r_e^2 - r_p^2}{2} \right) \Delta t$$

$$a_S = \frac{k}{\delta z} \left(\frac{r_e^2 - r_p^2}{2} \right) \Delta t$$

$$a_p = \dot{a}_p + a_E + a_N + a_S$$

$$b = \dot{a}_p T_p$$

$$\dot{a}_p = \rho C_p \Delta z \left(\frac{r_e^2 - r_p^2}{2} \right)$$

Pour $r=R$

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} = \delta \varepsilon (T^4 - T_\infty^4) + h(T - T_\infty)$$

$$\iint_{V_{c/2}} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} r dr dz dt = \iint_{V_{c/2}} k \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) dr dz dt + \iint_{V_{c/2}} k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} r dr dz dt \quad (5.17)$$

$$\rho C_p (T_p - T_p^0) \left(\frac{r_p^2 - r_o^2}{2} \right) \Delta z = k \left(r_p \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_p - r_o \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_o \right) \Delta z \Delta t + k \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_n - \frac{\partial T}{\partial z} \left(\frac{r_p^2 - r_o^2}{2} \right) \Delta t \quad (5.18)$$

$$\begin{aligned} & \rho C_p (T_p - T_p^0) \left(\frac{r_p^2 - r_o^2}{2} \right) \Delta z \\ &= -r_p \left(\sigma \varepsilon (T_p^4 - T_\infty^4) + h(T_p - T_\infty) \right) \Delta z \Delta t - k r_o \frac{T_p - T_\theta}{\Delta r} \\ &+ k \left(\frac{T_N - 2T_p + T_S}{\delta z} \right) \frac{r_p^2 - r_o^2}{2} \Delta t \end{aligned} \quad (5.19)$$

$$\begin{aligned}
& T_p \left(\rho C_p \left(\frac{r_p^2 - r_o^2}{2} \right) \Delta z + r_p (\sigma \varepsilon T_p^3 + h) \Delta z \Delta t + \frac{k r_\theta}{\delta r} \Delta z \Delta t + \frac{2k}{\delta z} \left(\frac{r_p^2 - r_o^2}{2} \right) \Delta t \right) \\
& = T_E(0) + T_0 \left(\frac{k r_\theta}{\delta r} \Delta z \Delta t \right) + T_N \left(\frac{k}{\delta z} \left(\frac{r_p^2 - r_o^2}{2} \right) \Delta t \right) + T_s \left(\frac{k}{\delta z} \left(\frac{r_p^2 - r_o^2}{2} \right) \Delta t \right) \\
& + \rho C_p T_p^0 \left(\frac{r_p^2 - r_o^2}{2} \right) \Delta z + r_p \Delta z \Delta t (\sigma \varepsilon T_\infty^4 + h T_\infty)
\end{aligned} \tag{5.20}$$

L'équation algébrique finale est donnée par l'expression suivante:

$$\text{Avec :} \quad a_p T_p = a_0 T_0 + a_N T_N + a_s T_s + b \tag{5.21}$$

$$a_N = \frac{k}{\delta z} \left(\frac{r_p^2}{2} - \frac{r_\theta^2}{2} \right) \Delta t$$

$$a_0 = \frac{k r_\theta}{\delta r} \Delta z \Delta t$$

$$a_s = \frac{k}{\delta z} \left(\frac{r_p^2}{2} - \frac{r_\theta^2}{2} \right) \Delta t$$

$$a_p = \dot{a}_p + a_0 + a_N + a_s + (\sigma \varepsilon T_p^3 + h) r_p \Delta z$$

$$b = \dot{a}_p T_p + (\sigma \varepsilon T_p^4 + h T_\infty) r_p \Delta z \Delta t$$

$$\dot{a}_p = \rho C_p - \frac{r_p^2 - r_o^2}{2}$$

5. Résultats est discussions

5.1. Introduction

La résolution du système d'équations sur notre matériau a pour le but de déterminer et comparer la variation de la température pour les 5 échantillons du Béton normal et du béton avec granulats recyclés, en fonction de temps dans différents températures de (20°C-50°C) Bien évidemment pour comparer les résultats numériques et expérimentaux

Nous citerons donc les résultats avec les valeurs les plus intéressantes : 0 -10-20 %

5.2. Données du programme

Dans le but de déterminer la variation de la température en fonction de temps.

Bien évidemment nous avons besoin d'entrée des données au logiciel qui sont :

- La valeur de conductivité thermique et chaleur spécifique mesurées expérimentalement (tableau 5.1).
- le dimensionnement d'échantillons cylindrique r et z 5cm x 3.23 cm.
- Les températures mesurées 20° jusqu'à 50°

Tableau 5.1 : Les données de la conductivités et chaleur spécifique utilisées dans le programme

	20°	30°	40°	50°
BN	K=1.808 (W/m.k) Cp=2302 (J/kg.k)	K=1.559 (W/m.k) Cp=2094 (J/kg.k)	K=1.552 (W/m.k) Cp=2243 (J/kg.k)	K=1.483 (W/m.k) Cp=2144 (J/kg.k)
B 10%	K=1.860 (W/m.k) Cp=2498 (J/kg.k)	K=1.627 (W/m.k) Cp=2513 (J/kg.k)	K=1.432 (W/m.k) Cp=2212 (J/kg.k)	K=1.283 (W/m.k) Cp=2147 (J/kg.k)
B 20 %	K=1.641 (W/m.k) Cp=2147 (J/kg.k)	K=1.638 (W/m.k) Cp=2405 (J/kg.k)	K=1.486 (W/m.k) Cp=1944 (J/kg.k)	K=1.423 (W/m.k) Cp=2057 (J/kg.k)

5.3. Résultats et interprétation

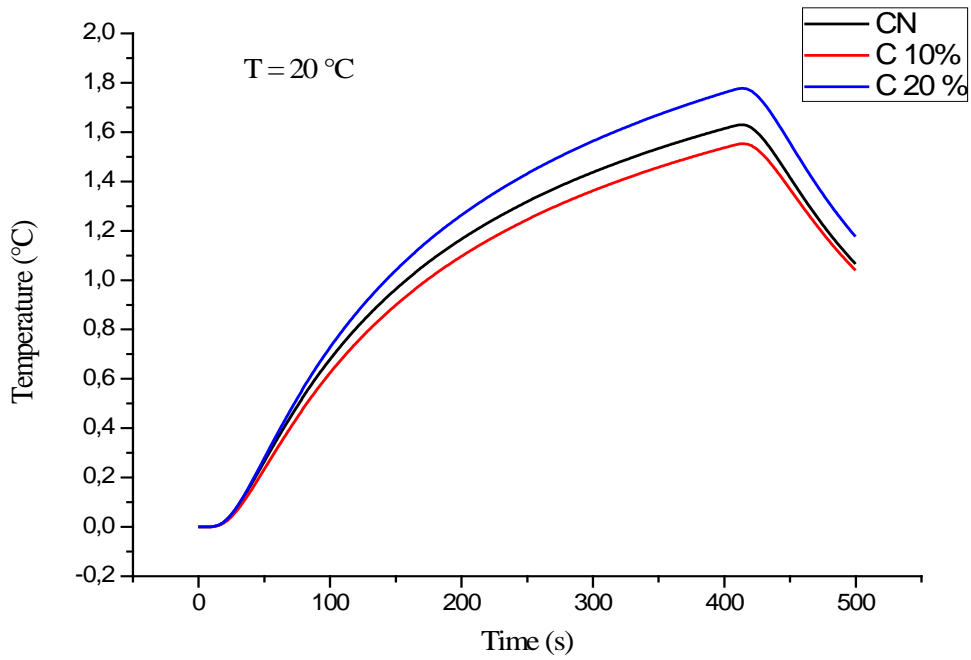


Figure 5.3: Résultats numériques à une température $T = 20^{\circ}\text{C}$ pour BN, B20%, B10%

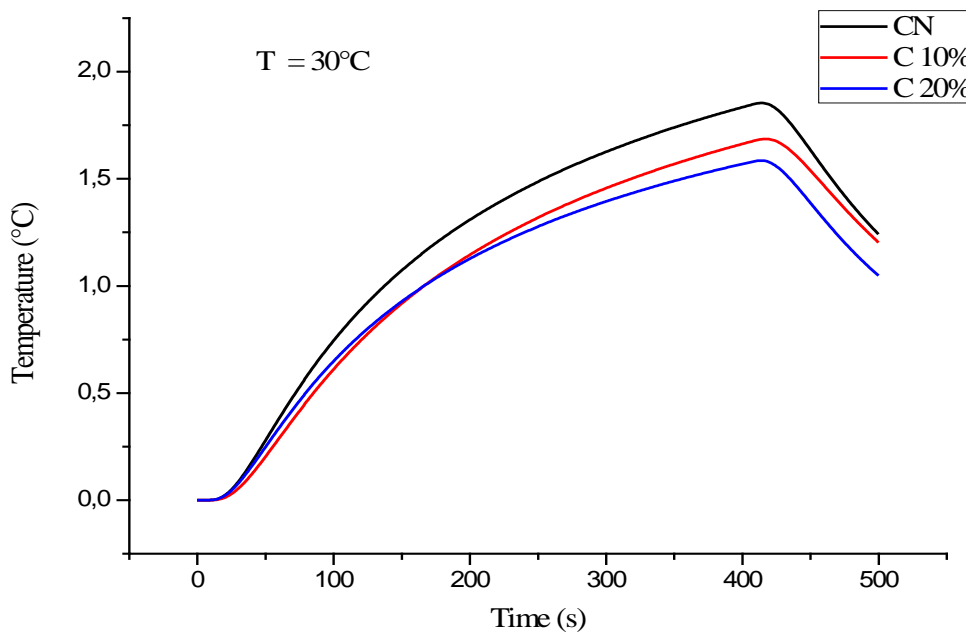


Figure 5.4: Résultats numériques à une température $T = 30^{\circ}\text{C}$ pour BN, B20%, B10%

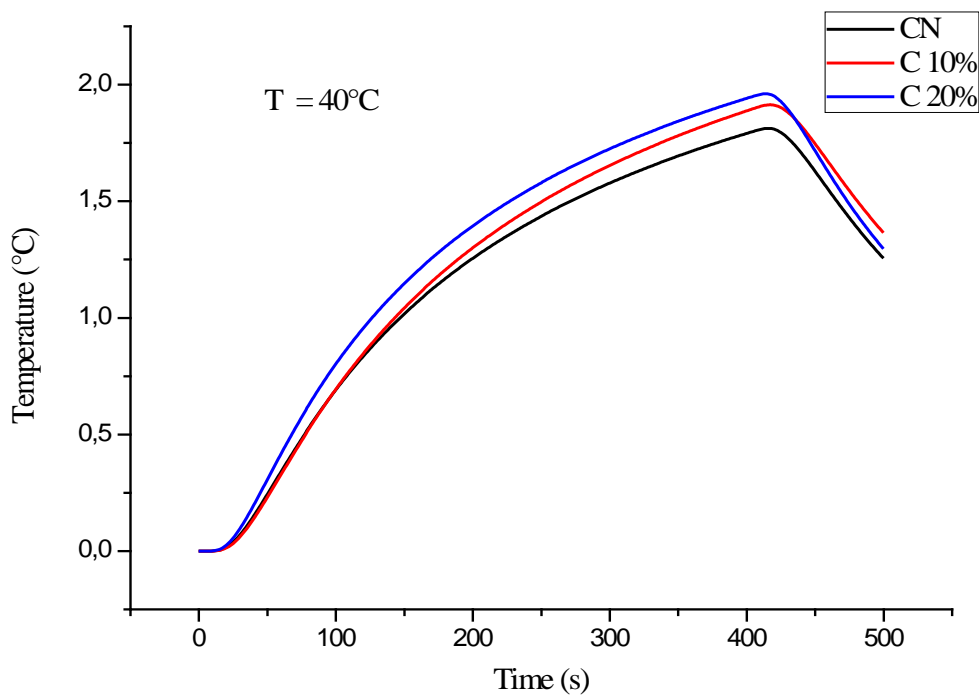


Figure 5.5: Résultats numériques à une température $T = 40^{\circ}\text{C}$ pour BN, B20%, B10%

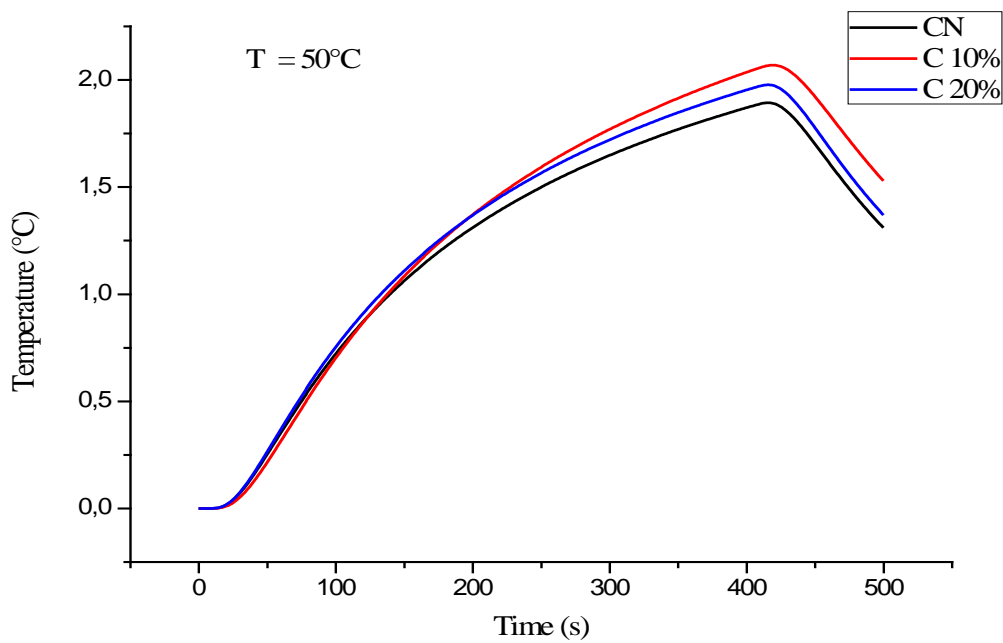


Figure 5.6: Résultats numériques à une température $T = 50^{\circ}\text{C}$ pour BN, B20%, B10%

Les figures (5.3 ; 5.4 ; 5.5 ; 5.6) montrent la variation de la température pour les échantillons du Béton normal et du béton avec granulats recyclés, en fonction de temps dans différents températures de 20 degrés à 50 degrés

Dans la figure 5.3 : à la température de 20 °C :

Pour l'échantillon 1 CN (Béton Normale), la température pendant l'essai a augmenté lentement jusqu'à ce que son maximum soit atteint au bout d'un temps égal à $t_{(max)} = 413,5$ s. Après $t = 413,5$ s, la température diminue. Même cas pour l'échantillon 2 (C 10%), avec une température maximale $t_{(max)} = 414,5$ s et aussi pour l'échantillon 3 (C 20%), avec une température maximale de $t_{(max)} = 414$ s.

Dans la figure 5.4 : à la température de 30 °C :

Pour l'échantillon 1 CN (béton Normale), la température pendant l'essai a augmenté lentement jusqu'à ce que son maximum atteint au temps au bout d'un temps égal à $t_{(max)} = 414,5$. Après 414,5 s, la température diminue. Même cas pour l'échantillon 2. (C 10%), avec une température maximale au Temps de $t_{(max)} = 414,5$ s. et aussi pour l'échantillon 3 (C 20%) d'échantillon, avec une température maximale de 414 s.

Dans la figure 5.5 : à la température 40 °C:

Pour l'échantillon 1 NC (béton normale), la température pendant l'essai a augmenté lentement jusqu'à ce que son maximum atteint au temps au bout d'un temps égal à 416 s. Après 416 s, la température diminue. Même cas pour l'échantillon 2. (C 10%), avec une température maximale de 417,5 s. et aussi pour l'échantillon 3 (C 20%) d'échantillon, avec une température maximale de 414 s.

Dans la figure 5.6 : à la température 50 °C:

Pour l'échantillon 1 NC (béton normale), la température pendant l'essai a augmenté lentement jusqu'à ce que son maximum atteint au bout d'un temps max égal à 416 s. Après 416 s, la température diminue. Même cas pour l'échantillon 2. (C 10%), avec une température maximale au temps de $t_{max} (s) = 419,5$ s et aussi pour l'échantillon 3 (C 20%) d'échantillon, avec une température maximale de 416 s.

5.4. Comparaison des résultats numériques et expérimentaux :

Dans le but de valider notre modèle, nous avons comparé nos résultats numériques aux résultats trouvés par d'autres résultats expérimentaux trouvés lors de l'essai de mesure de la conductivité thermique des échantillons solide de forme cylindrique.

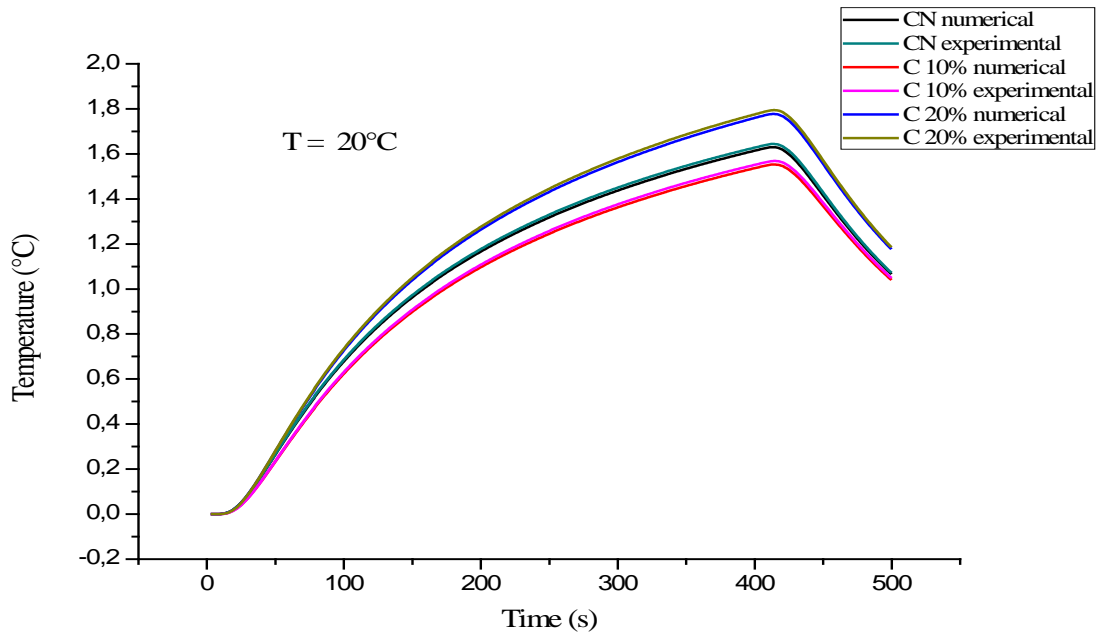
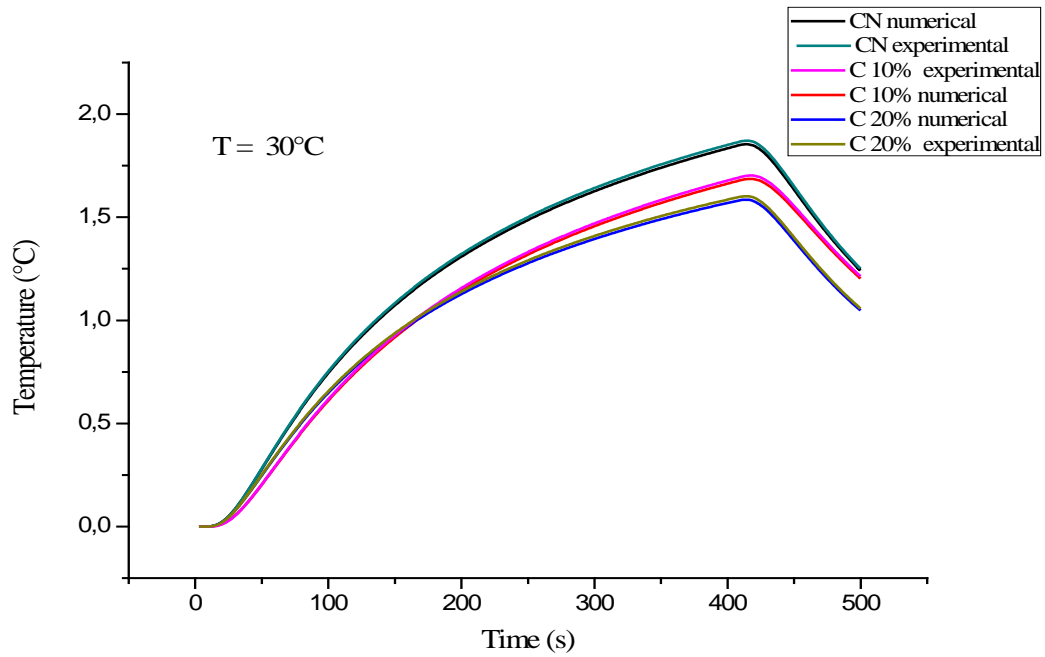
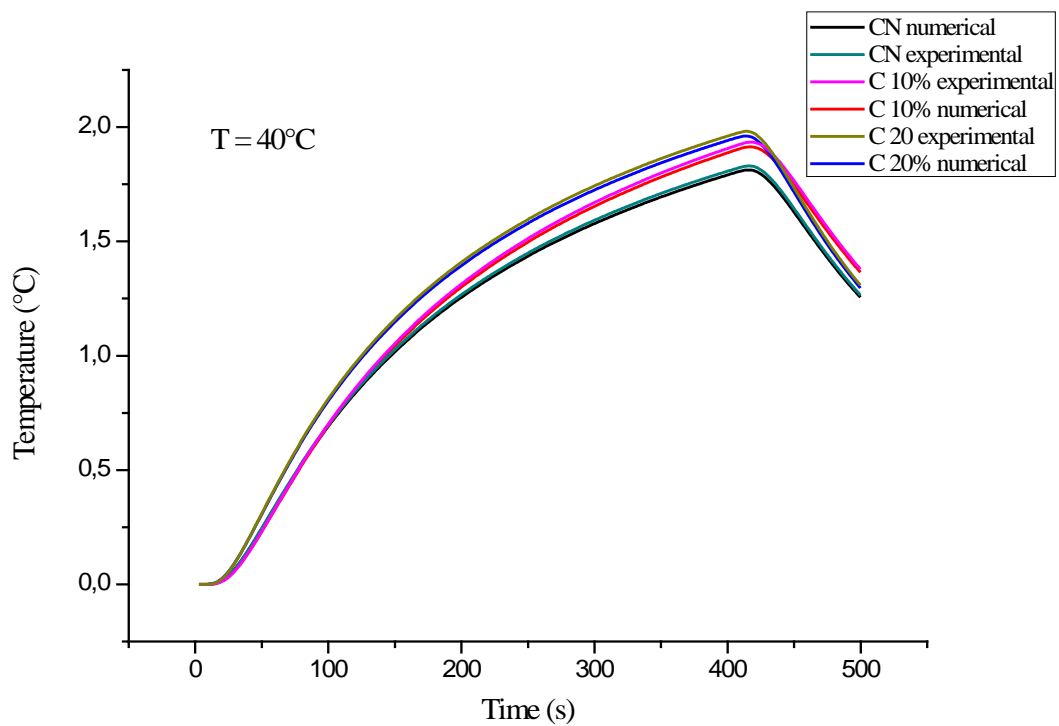


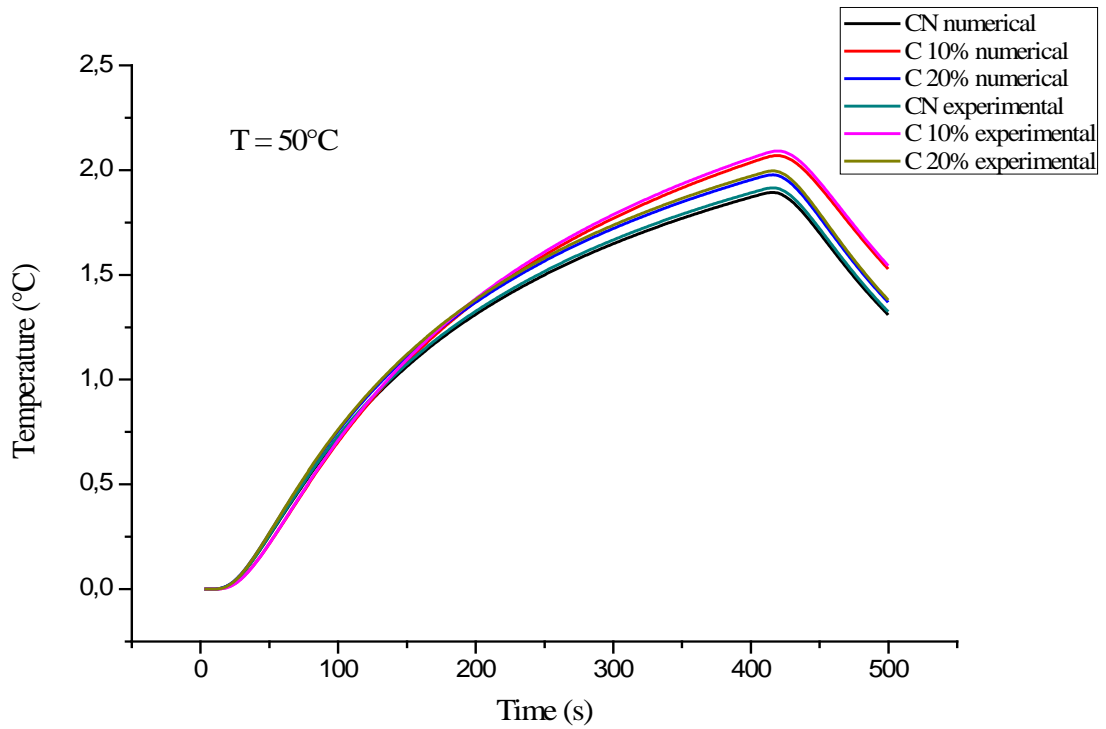
Figure 5.7: comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux de BN, B20%, B10%
Température en fonction du temps à T =20°C



**Figure 5.8: comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux de BN, B20%, B10%
Température en fonction du temps à $T = 30^{\circ}\text{C}$**



**Figure 5.9: comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux de BN, B20%, B10%
Température en fonction du temps à $T = 40^{\circ}\text{C}$**



**Figure 5.10: comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux de BN, B20%, B10%
Température en fonction du temps à T =50°C**

❖ Pour les trois échantillons et les différentes températures, les résultats numériques et expérimentaux sont en bon accord

Conclusion

Sur le plan numérique, nous avons pour objectif de réaliser un premier outil de calcul permettant de simuler du béton avec du pourcentage des déchets de construction et de démolition sous forme de cylindre.

En général, les profils des températures locales prédites montrent un bon accord avec les résultats expérimentaux. D'autre part, la taille des particules et la vitesse de chauffe sont des paramètres opératoires et ont une influence notable sur le changement de la température. L'application potentielle de ce modèle réside dans son emploi.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

1. Conclusions

D'une manière générale, ce travail a mis en évidence que l'incorporation des granulats recyclés issus de déconstruction de démolition dans le béton, à la place du sable naturel, engendrait des différences importantes dans les propriétés du béton, avec toutes les conséquences sur sa durabilité. En conclusion, la résistance en compression de tous ces bétons recyclés augmente avec l'augmentation de la quantité de granulats recyclés, et spécialement à partir de 15 % de sable recyclé. La porosité accessible à l'eau a diminué pour un ajout de 20% de granulats recyclés, en comparaison avec le béton de référence. Cette diminution de ce paramètre pétro physique a un effet sur une nette baisse de la diffusion de chlorures. Le remplacement du sable par le béton recyclé permet de réduire le risque de corrosion par rapport à un béton normal.

Par conséquent, nous remarquons qu'à un pourcentage de 20%, le béton à agrégats recyclés présente de bonnes performances mécaniques. Au contraire, ces performances sont médiocres pour des pourcentages faibles.

Les analyses chimiques et minéralogiques montrent que le béton à agrégats recyclés et de béton témoin possèdent approximativement les mêmes compositions chimiques et minéralogiques.

Les mesures des propriétés thermo-physiques montrent que la conductivité thermique augmente jusqu'à un pourcentage de 15 % et commence à diminuer par la suite. Par contre cette propriété diminue légèrement quand la température augmente pour l'intervalle 20 °C à 50°C.

Les propriétés thermiques du béton contenant des granulats de béton recyclé à différentes températures montrent que les résultats expérimentaux sont en bonne concordance avec les résultats numériques.

Cependant, la substitution des granulats naturels par des granulats recyclés partiellement dans un béton offre une nouvelle source d'approvisionnement et permet

d'économiser les matériaux et les carrières. Elle offre une bonne solution au problème de la gestion des déchets pour préserver l'environnement.

Ainsi, le recyclage de ce type de déchets peut procurer des économies sur plusieurs points :

- des économies monétaires car si on réutilise ces matériaux, on évite les coûts pour en disposer dans le cas où la collecte est organisée et proche de la zone de fabrication des nouveaux bétons;
- des économies sur le transport dans la mesure où on est capable de traiter les matériaux sur place ; par exemple, si on reconstruit une chaussée en béton de ciment, on peut, s'il s'agit de travaux d'envergure, amener les unités de concassage sur le site et concasser les matériaux sur place ;
- socialement, il est aussi souhaitable d'économiser nos ressources non renouvelables de granulats naturels en réutilisant dans la mesure du possible ce type de résidus.

2. Perspective

En perspective de ce travail, il est important de compléter cette étude par :

- L'analyse du comportement de ces bétons vis-à-vis d'autres paramètres mécanique (retrait et du fluage).
- La durabilité de ces bétons recyclés est à analyser comme la carbonatation. Rappelant que la diffusion des chlorures a été déjà traité dans ce travail;
- Une optimisation multi-objective pour évaluer le type, la taille et la proportion optimale des granulats en fonction de l'ouvrage étudié et sa zone de construction et analyse de prix.
- Augmenter le taux de valorisation au Maroc de 20 % et plus.
- Influence de la teneur en eau sur les paramètres mécaniques et thermique sont en cours de réalisation au laboratoire
- Étudier Le comportement à haute température des bétons de granulats recyclés.
- Des études théoriques et expérimentales pour les bétons à haute performance ainsi que d'autres types de béton spécial apporterait également une autre perspective à ce travail.

Références Bibliographiques

- [1] Stratégie Énergétique Nationale Horizon 2030. Efficacité énergétique. Royaume du Maroc. Ministère de l'énergie ; des mines de l'eau et de l'environnement.
- [2] AMEE, Agence Marocaine pour l'Efficacité Énergétique (2015). "Stratégie de formation en efficacité énergétique dans le bâtiment". *And planetary science letters*, 6, 359–368.
- [3] Faucheux S. et Noël J.-F., (1995), Économies des ressources naturelles et de l'environnement. Paris : Armand Colin.
- [4] (AIE) 2018. Global Report Global alliance for building and construction Bilan Mondial 2018 Prepared by the International Energy Agency : Vers un secteur des bâtiments et de la construction à émission zéro, efficace et résilient.
- [5] RECORD. Déchets de démolition et déconstruction : gisements, caractérisations, filières de traitement et valorisation. 2011. 166 p.
- [6] KOESTEN J. Grands principes de la réglementation relative à la gestion des déchets du BTP. In : Journée technique « Déchets du BTP ». CEREMA, 2015. p. 1 - 20.
- [7] Nayana . A.Y. , S. Kavitha, Evaluation of c02 emissions for green concrete with high volume slag, recycled aggregate, recycled water, *Int. J. Civ. Eng. Technol.* 8 (2017) 703–708
- [8] De Canio S., (2009), the political economy of global carbon emissions reductions. *Ecological Economics*, 68 (3), 915-924.

- [9] Mañà i reixach, f, gonzàlez i barroso, j.,sagrera i cuscó, a. Plan de gestión de residuos en las obras de construcción y demolición; programa life. Dirección general de medio ambiente; institut de tecnologia de la construcció de catalunya, barcelona, 2000.
- [10] Xu Feng Literature Review of Recycled Concrete Aggregate. Applied Mechanics and Materials Vols 638-640 (2014) pp 1162-1165 (2014) Trans Tech Publications, Switzerland.
- [11] Yasser El-Husseini Ibrahim Durability and Structural Performance of Recycled Aggregate Concrete: a Review Vol 10, No 3 (2019) The International Review of Civil Engineering (IRECE).
- [12] Meyer, C. (2009). "The greening of the concrete industry." Cem.Concr.Compos., 31(8), 601–605.
- [13] Bravo, M., de Brito, J., Pontes, J., and Evangelista, L. (2015). "Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants." J. Clean. Prod., 99, 59–74.
- [14] Vivian W.Y. Tam, MahfoozSoomro, Ana Catarina Jorge Evangelista A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017) Construction and Building Materials 172 (2018) 272–292.
- [15] Krishan PareekSrishtiSaha, Nayan Gupta and PurnachandraSaha Effect of Recycled Aggregate on Mechanical and Durability Properties of Concrete. International Journal of Structural and Civil Engineering Research Vol. 8, No. 2, May 2019.
- [16] M.U. Hossain, C.S. Poon, I.M.C. Lo, J.C.P. Cheng, Comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources by LCA, Resour. Conserv. Recycl. 109 (2016) 67–77.
- [17] J. Yang , Q. Du , Y. Bao Béton avec agrégat de béton recyclé et briques d'argile concassées Construire Mater constr , 25 (4) (2011) , p. 1935 – 1945 .

- [18] MCS Nepomuceno , RAS Isidoro , JPG Catarino . Évaluation des performances mécaniques du béton fabriqué avec des granulats grossiers céramiques recyclés à partir de déchets de briques industrielles Constr Mater Construire, 165 (2018) , pp. 284 – 294.
- [19] JS González, FL Gayarre , CLC Pérez , PS Ros , MAS López. Influence des granulats de brique recyclés sur les propriétés du béton de structure pour la fabrication de poutres précontraintes préfabriquées Constr Mater Construire , 149 (2017) , pp. 507 – 514.
- [20] M. Nematzadeh , J. Dashti , B. Ganjavi. Optimisation du comportement en compression du béton contenant des agrégats de briques réfractaires recyclés fins avec du ciment d'aluminate de calcium et des fibres d'alcool polyvinylique exposés à un environnement acide Construire Mater constr , 164 (2018) , pp. 837 – 849.
- [21] A. Lotfy , M. Al-Fayez Évaluation de la performance du béton de structure à l'aide d'agrégats de béton recyclé grossier et fin de qualité contrôlée Cem Compos Les degrés , 61 (2015) , pp. 36 – 43.
- [22] A. Devenny , FM Khalaf L'utilisation de brique concassée comme agrégat grossier dans le béton Maçonnerie Int , 12 (3) (1999) , pp. 81 - 84.
- [23] FM Khalaf , AS DeVenny Recyclage des gravats de maçonnerie démolis sous forme d'agrégats grossiers dans le béton: revue J Mater Civ Eng , 16 (4) (2004) , pp. 331 – 340.
- [24] AS DeVenny . FM Khalaf , Propriétés des agrégats de brique d'argile neufs et recyclés pour une utilisation dans le béton J Mater Civ Eng , 17 (4) (2005) , pp. 456 – 464.
- [25] F. Debieb , S. Kenai L'utilisation de briques concassées grossières et fines comme agrégat dans le béton Construire Mater constr , 22 (5) (2008) , pp. 886 – 893.
- [26] Y. C, engel (1998) "Heat transfert, a practical approach", Mc Graw Hill. Incropera, DeWitt : Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 5th Edition, Wiley.

- [27] C. Medina , W. Zhu , T. Howind , MI Sánchez De Rojas , M. Frías . Influence des granulats recyclés mixtes sur les propriétés physico-mécaniques du béton recycléJ Clean Prod , 68 (1) (2014) , pp. 216 – 225.
- [28] Long Li, BaoJian Zhan ↑, Jianxin Lu, Chi Sun Poon, Systematic evaluation of the effect of replacing river sand by different particle size ranges of fine recycled concrete aggregates (FRCA) in cement mortars Construction and Building Materials 209 (2019) 147–155.
- [29] Alzouhayli K, Mokbel T. "Experimental Study on the Recycled Aggregate Concrete". Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies- Engineering Sciences Series 2014; 36(2): 253-266.
- [30] Salehlamein F R, Solikin M, Sri Sunarjono I. "Effect of Recycled Coarse Aggregate on Concrete Properties". International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology 2015; 4 (1):19060-19068
- [31] AL-Luhybi A S. "Studying the Effect of Adding Marble and Porcelain Waste on Mechanical Properties of Concrete Containing Recycled Aggregate". Engineering and Technology Journal 2017; 35: 668-674.
- [32] Duan Z H, Poon C S. "Properties of Recycled Aggregate Concrete Made with Recycled Aggregates with Different Amounts of Old Adhered Mortars". Materials and Design 2014; 58:1-24.
- [33] J. Thomas, N. N. Thaickavil, and P. M. Wilson, "Strength and durability of concrete containing recycled concrete aggregates," Journal of Building Engineering, vol. 19, pp. 349–365, 2018.
- [34] M. Maslehuddin, M. M. Al-Zahrani, M. Ibrahim, M. H. Al-Mehthel, and S. H. Al-Idi, "Effect of chloride concentration in soil on reinforcement corrosion," Construction and Building Materials, vol. 21, no. 8, pp. 1825–1832, 2007.

- [35] K. P. Verian, W. Ashraf, and Y. Cao, "Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 133, pp. 30–49, 2018.
- [36] Xiao, J.; Song, Z.; Zhang, F. An experimental study on thermal conductivity of concrete. *J. Build. Mater.* 2010, 13, 17–21.
- [37] Díez Ramírez, F.; Muñoz, F.; López, E.; Polanco, A. Thermal evaluation of structural concretes for construction of biodigesters. *Energy Build.* 2013, 58, 310–318.
- [38] Marie, I. Thermal conductivity of hybrid recycled aggregate—Rubberized concrete. *Constr. Build. Mater.* 2017, 133, 516–524.
- [39] Benazzouk, A.; Douzane, O.; Mezreb, K.; Laidoudi, B.; Quéneudec, M. Thermal conductivity of cement composites containing rubber waste particles: Experimental study and modelling. *Constr. Build. Mater.* 2008, 22, 573–579.
- [40] Zhu, L.; Dai, J.; Bai, G.; Zhang, F. Study on thermal properties of recycled aggregate concrete and recycled concrete blocks. *Constr. Build. Mater.* 2015, 94, 620–628.
- [41] Fatah Mejni : structure synchronisées dans les écoulements inhomogènes de convection mixte en milieu poreux, 2008, Lille.
- [42] Samaouali, 2011. Processus d'altération et de transfert de fluides dans les pierres calcarénites du monument Chellah–Rabat, Thèse de doctorat s, Université Mohammed V, Rabat.
- [43] Mehta, P. K., 1986a. Concrete structure, properties and materials. In *Prentice-Hall international series in civil engineering and engineering mechanics* (3rd ed., p. 450).
- [44] Baroghel V-B., 1994. Caractérisation microstructurale et hydrique des pâtes de ciment et des bétons ordinaires et à très hautes performances. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

- [45] Marchand, J., Pigeon, M., 1996. Résistance du béton à l'écaillage dû au gel en présence de sels fondants. Une revue des récents développements dans le domaine, Conférence RILEM : Béton - Du matériau à la structure, Arles, France, pp. 179-210.
- [46] Maltais, Y., Marchand, J., Pigeon, M., 1997. The influence of curing temperature on the mechanical resistance of concrete and the durability. An overview, Fourth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Supplementary papers, Sydney, Australie, pp. 409-433.
- [47] Mindess S., Young J.F., Darwin D., 2003. Concrete, Second Edition, Prentice-Hall, 644p
- [48] Quenard D., Kalifa P. Pardo, 1999. Mesure du facteur de formation et de la perméabilité dans des pâtes de ciment. Thème de recherche OA9 du L.C.P.C, CSTB, Paris, février 1999, 24p.
- [49] Djivedé Elvire TOGNISSO : écoulement de fluides complexes dans un milieu poreux, utilisation de micelles géantes pour la récupération améliorée du pétrole, 2011, Bordeaux.
- [50] Charles Danquigny : étude expérimentale du transfert de masse en milieu poreux hétérogène, 2003, Strasbourg
- [51] Berthelot Jean-Marie. (1996) "Matériaux Composites: Comportement Mécanique et Analyse Des Structures." Éditée par by Masson. 2ème édition. Paris.
- [52] Gornet Laurent. (2008) "Généralités sur les Matériaux Composites."
- [53] Chevalier Alain. (2014) "Mise En Œuvre Des Composites Méthodes et Matériels." 33 (0):0– 34.
- [54] Aucher Jérémie. (2009) "Etude Comparative Du Comportement Composites à Matrice Thermoplastique Ou Thermodurcissable."

[55] ACI. (1996). Report on Fiber Reinforced Concrete (Reapproved 2009). American Concrete Institute.

[56] De Larrard F. : « Structures granulaires et formulation des bétons », Numéro Ouvrages d'art OA 34. LCPC, 2000.

[57] CHANVILLARD G., (1999) Le matériau béton : connaissances générales. Les cours de l'ENTPE, Edition ENTPE ALEAS.

[58] KOSMATKA S.H., KERKHOFF B., PANARESE W.C., MACLEOD N.F., MCGRATH R.J., (2004) Dosage et contrôle des mélanges de béton. Bulletin d'ingénierie EB101, Association canadienne du ciment, 7^{ème} édition canadienne.

[59] Tingting WU, 2011. Formalisme Des Impédances Thermiques Généralisées. Application A La Caractérisation Thermique De Parois De Bâtiments. Thèse de doctorat, Université d'Artois, Arras, France.

[60] J.F. Sacadura (1993) "Initiation aux transferts thermiques", Lavoisier Tec &Doc.

[61] Ezbakhe H., 1986. Caractéristiques Thermiques et Mécaniques des Matériaux Poreux Utilisés comme Isolants Simples ou Porteurs- Thèse de Doctorat d'Etat, U.C.B Lyon I.

[62] L. H. Nguyen, "Béton de structure à propriétés d'isolation thermique améliorées: Approche expérimentale et modélisation numérique, PhD thesis," Université de Cergy-Pontoise, 2013.
l'ingénieur, p.120.

[63] V. Cermak and L. Rybach, "Thermal properties: Thermal conductivity and specific heat of minerals and rocks," in Landolt-Bornstein Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaften und Technik, Neue Serie, G. Angew., no. 1, 2000, pp. 305.

[64] J. V Brakel, "Capillary liquid transport in porous media, PhD thesis," Technische Hogeschool, 1975.

- [65] B. Naitali, "Elaboration , caractérisation et modélisation de matériaux poreux . Influence de la structure poreuse sur la conductivité thermique effective, Thèse de Doctorat," Université de Limoges, 2005.
- [66] Cooper, G. Simmons, The effect of cracks on the thermal expansion of rocks, Earth and Planetary Science Letters, 36, (1977) 404-412
- [67] Moufakir el al PHYSICAL-MECHANICAL CHARACTERISATION AND DRYING WOOD OF HOLM-OAK BUSH FROM AZROU REGION – MOROCCO.
- [68] Cléo LANEYRIE 2014 ; « Valorisation des déchets de chantier du BTP : comportement à haute température des bétons de granulats recyclés » Thèse de Doctorat ; Université de Cergy Pontoise.2014.
- [69] Bazent and M.F. Kaplan, Concrete at high temperature: material properties and mathematican models, Longman Group Limited, London, 196 pages, (1996)
- [70] Winterkorn, H. F., Eyring, H., Hogentogler, C. A., Bollen, R. E. & Campen, W. H. (1946). Theoretical aspects of water accumulation in cohesive subgrade soils. Highway research board proceedings, 25.
- [71] DREUX. G, FESTA.J, (1995) " Nouveau guide du béton", Septieme edition,eyrolles.
- [72] NT BUILD 208,"Concrete, hardened: Chloride content",2nd ed., Approved 1984-05.
- [73] Tang, L and Sørensen, H.E., "Evaluation of the Rapid Test Methods for Chloride Diffusion Coefficient of Concrete, NORDTEST Project No. 1388-98", SP Report 1998:42, SP Swedish National Testing and Research Institute, Sweden, 1998.
- [74] NT BUILD 201,"Concrete: Making and curing of moulded test specimens for strength tests", 2nd ed., Approved 1984-05.
- [75] NT BUILD 202,"Concrete, hardened: Sampling and treatment of cores for strength tests", 2nd ed., Approved 1984605.

[76] NF EN 993-15 – „Méthodes d’Essai pour Produits Réfractaires Façonnés Denses Partie 15 : Détermination de la Conductivité Thermique par la Méthode du Fil Chaud“, 2005.

[77] S. Contrerasa, R. Lucasb, J. M. Letoffec, J. P. Bastidec, A. Bouamranec, M. Diotc and P. Claudyc, Etude du comportement thermique et de la chaleur spécifique du tétrahydrurobéryllate de dilithium Li_2BeH_4 , Journal Thermochemica (1998), 75-81. 204.

[78] Fabien Roget, Définition, modélisation et validation expérimentale d’une capacité de stockage thermique par chaleur latente adaptée à une centrale thermodynamique solaire à basse température, 11 Juin 2012.

[79] Geert De Schutter et L. Taerwe Specific-Heat and Thermal-Diffusivity of Hardening Concrete January 1999 Magazine of Concrete Research 47(172):203-208.

[80] X. Zhang and A. Degiovanni, Mesure de l’effusivité thermique de matériaux solides et homogènes par une méthode de sonde plane, Journal de Physique III, EDP Sciences 3(6) (1999), 1243-1265.

[81] Hanaa Fares a, Sébastien Remond a , Albert Noumowé a & Annelise Cousture a a Université de Cergy-Pontoise , L2MGC, EA 4114, F-95000, Cergy-Pontoise Published online: 17 Oct 2011. Microstructure et propriétés physico-chimiques de bétons autoplaçants chauffés de 20 à 600°C.

[82] Stutzman P.E., “Scanning electron microscopy imaging of hydraulic cement microstructure”, Cement and Concrete Composites, vol. 26, n° 8, November 2004, p. 957-966.

[83] A. Sivakumar, M. Santhanam. A quantitative study on the plastic shrinkage cracking in high strength hybrid fibre reinforced concrete. Cement and Concrete Composites, vol 29, pp 575-581, 2007.

[84] N. Banthia, R. Gupta. Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete. Cement and Concrete Research, vol 36, pp 1263-1267, 2006.

- [85] M. A. Sanjuh, A. Moragues. Polypropylene fibre reinforced mortars mixes: optimization to control plastic shrinkage. *Composites Science and Technology*, vol 51, pp 655-660, 1997.
- [86] H. Paqueton and J. Ruste, *Microscopie électronique à balayage - principe et équipement*, Techniques de l'ingénieur, p865v3, 2006. (Citée pages 159, 160 and 179.)
- [87] Sara Belarouf, Abdelkrim Moufakkir, Abderrahim Samaouali, Hubert Rahier and Kamal Gueraoui . Chemical-mineralogical characterization of concrete with recycled concrete aggregates. *Journal of heat and mass transfer* volume 22, issue 1, 2021).
- [88] C. Andrade concepts on the chloride diffusion coefficient. Third RILEM workshop on Testing and Modelling the Chloride Ingress into Concrete 2002, Madrid, Spain.
- [89] S. Erdogdua,* , I.L. Kondratovab, T.W. Bremnerc , Determination of chloride diffusion coefficient of concrete using open-circuit potential measurements, *Cement and Concrete Research* 34 (2004) 603–609.
- [90] Kevin Diatto NAMOULNIARA Doctoral thesis by Experimental study of CO₂ diffusion and carbonation kinetics of cementitious materials with low clinker content.
- [91] Noumowé N.A. « effet de hautes températures sur le béton, cas particulier du béton à hautes performances » thèse de doctorat, INSA de Lyon, 1995.
- [92] H. Fares « propriétés mécaniques et physicochimiques de béton autoplaçants exposés à une température élevée » thèse de doctorat, université de Gergy-Pontoise, p.156, 2009.
- [93] T. Belkacem « étude de l'influence des hautes températures sur le comportement du béton » thèse de doctorat, université Mentouri Constantine, faculté des sciences de l'ingénieur, p.120.
- [94] P. Morabito, Measurement of the thermal properties of different concretes, *High Temp. High Press.* 21 (1989) 51 – 59.

- [95] Han Kima , Sang-Eun Jeonb , Jin-Keun Kimb , Sungchul Yangc An experimental study on thermal conductivity of concrete Kook- Cement and Concrete Research 33 (2003) 363 371.
- [96] María Fenollera,* José Luis Míguez, Itziar Goicoechea, and Jaime Lorenzo . Experimental Study on Thermal Conductivity of Self-Compacting Concrete with Recycled Aggregate. Materials ISSN 1996-1944.
- [97] NM 10.1.008 2009 The Moroccan standard of concrete.
- [98] K Muthusamy, A M A Budiea, A L F Zaidan, M H Rasid1 and D S Hazimmah, Properties of concrete containing foamed concrete block waste as fine aggregate replacement, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 271, conference 1.
- [99] Ralejs Tepfers , Concrete technology – porosity is decisive January 2012.
- [100] Ayda S.Agar-Ozbeka JaapWeerheijmab Erik Schlangena Klaasvan Breugela Investigating porous concrete with improved strength: Testing at different scales Construction and Building Materials, April 2013, Pages 480-490.
- [101] Recktenwald, G. W. (2011). Finite difference approximations to the heat equation.
- [102] Guermond. J.L., A. Ern, Éléments finis : théorie, applications, mise en oeuvre, Mathématiques et Applications, Springer Berlin Heidelberg, 2002.
- [103] Alexei Stoukov. Introduction à la Mécanique des Fluides Numérique: Méthode "Volumes Finis" ENSEEIHT.2012 ;
- [104] Jean-Baptiste COLLIAT. Modélisation numérique des matériaux hétérogènes : Applications aux matériaux à matrice cimentaire. École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, 2010.
- [105] A. Quarteroni, R. Sacco, F. Saleri, Méthodes Numériques : Algorithmes, analyse et applications, Springer Milan, 2008.

- [106] Gilbert. J. Ch., *Éléments d'Optimisation Différentiable — Théorie et Algorithmes* [archive], syllabus de cours à l'ENSTA ParisTech, Paris.
- [107] Ciarlet. P. G. (1982). *Introduction à l'Analyse Numérique Matricielle et à l'Optimisation*. Masson, Paris.
- [108] Zienkiewicz. O. C., R. L. Taylor, J. Z. Zhu : *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*, Butterworth-Heinemann ; 6e édition (21 mars 2005) (ISBN 0750663200)
- [109] Raviart.P.A. et J.M. Thomas, *Introduction à l'analyse numérique des équations aux dérivées partielles*, Dunod, 2004 (ISBN 9782100486458).
- [110] Hammoumi, A. Driouich, M. Haddad, Y.M.,E.,Kerroum, M., Fehri, O.F., *Mathematical modeling of non-permanent flows of molten polymers*, (2010) *International Review of Mechanical Engineering (IREME)*, 4 (6), pp. 689-694.