

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed Khider – Biskra

Faculté des Sciences et de la technologie

Département : Génie Civil et Hydrauliques

Ref :.....



جامعة محمد خيضر بسكرة

كلية العلوم و التكنولوجيا

قسم: الهندسة مدنية و الري

المرجع:.....

Thèse

Présentée pour l'obtention du diplôme de

Doctorat en Génie Civil

Option : Génie civil

Titre de la thèse

**Etude de l'influence de la granulométrie et de la nature des
granulats recyclés sur les propriétés physico-mécaniques et
la durabilité des bétons par la méthode des plans
d'expériences.**

Présentée par :

BOUDINA Tounsia

Soutenue publiquement le 25/10/2022 devant le jury composé de :

TAALLAH Bachir	Professeur	Président	Université de Biskra
ZAITRI Rebih	Maître de Conférences A	Rapporteur	Université de Djelfa
HACHEMI Samia	Maître de Conférences A	Examineur	Université de Biskra
DIF Fodil	Maître de Conférences A	Examineur	Université de Djelfa

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

À ceux que j'ai de plus cher au monde : mes parents ;

À ma cher Maman et à la mémoire de mon cher PAPA

À mon marie Sofiane et sa famille, mes enfants Amine, Maria et Adam

À mes frères et mes sœurs et mes neveux.

À tous mes amis et collègues.

À tous ceux qui m'ont aimé et me souhaitent le bonheur et la réussite.

Remerciements

Avant, toute personne, je tiens à remercier notre Dieu Tout Puissant pour m'avoir éclairci le chemin de ce travail.

Mes vifs remerciements vont également à Monsieur ZAITRI Rebih Maître de conférences B à l'université de Djelfa d'avoir assuré l'encadrement de cette thèse ainsi que pour ses précieux conseils et la confiance qu'il m'a accordée qui ont fortement contribué à mener à bien ce travail.

Je tiens à remercier vivement Madame BENAMARA Dalila, professeur à l'université de Djelfa, pour avoir fait confiance à mes compétences, pour l'aide ainsi pour sa présence durant toute la période de préparation de la thèse.

Je tiens à remercier vivement Monsieur TAALLAH Bachir, Professeur à l'université Biskra, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de ma soutenance.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à Madame HACHEMI Samia, Maître de conférences A à l'université de Biskra, pour avoir bien voulu juger le travail.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à Monsieur DIF Fodil, Maître de conférences A à l'université de Djelfa, pour avoir bien voulu juger le travail et faisant partie de jury de soutenance.

Je remercie aussi vivement les membres du laboratoire LNHC Bejaia, CETIM Boumerdes et le Laboratoire de Recherche de l'université de Bejaia pour l'accueil et l'aide précieuses, je cite en particulier docteur Mme BELKACEMI Hayate et le professeur MAZA Youcef Chef de département de génie des mines à l'université de Bejaia.

Enfin, Un grand merci s'adresse à ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

Résumé

L'étude vise à examiner l'effet de l'incorporation des sables recyclés sur le comportement physico-mécaniques des BHP. Pour parvenir aux formulations des bétons, une approche théorique et expérimentale est appliquée en utilisant le plan de mélange en réseaux (*Simpex lattice designs*), les modèles dérivés des prédictions ont été utilisés pour évaluer les effets des facteurs de mélange et leurs interactions, pour optimiser les performances du système étudié.

Les résultats indiquent que l'affaissement du béton recyclé est fortement influencée par la teneur en SDBt, puis SA et SDBr, respectivement. Dans des conditions optimales les trois facteurs ont les valeurs (0% SA, 25% SDBr, 75% SDBt) pour lesquelles la résistance à la compression (R_c 28jr) atteint une valeur maximale de 82.8 MPa. A 28 jours, La résistance en flexion optimale est celle de béton BHP9 (75% SA et 25% SDBr), ceci est attribué à la réaction pouzzolanique des fines de SDBr (l'argile calcinée) et la production des nouveaux C-S-H, ce qui a apporté une meilleure densification de la matrice cimentaire. L'analyse des paramètres statistiques ($R^2=0.97$, $p\text{-valu}<0.05$, les résidus) a montré que les modèles développés étaient capables de prédire l'effet de la nature du sable sur les performances frais et durci des bétons.

Les bétons peuvent présenter un comportement critique sous l'attaque chimique lorsqu'ils sont exposés à l'eau de mer. L'analyse des effets sur leurs microstructures a été une étape nécessaire à la compréhension des phénomènes macroscopiques complexes, car le béton subit des modifications physicochimiques qui influencent fortement sa microscopie. Pour cela les informations sous forme visuelle rendues par l'observation microscopique du béton sont été complétées par des analyses thermo- gravimétriques et thermo-différentielles (ATD/ATG) sur cinq BHP à différentes proportions des sables recyclés. Leurs résistances mécaniques pendant 28 et 180 jours.

Mots clés

Béton à haute performance, sable recyclé, plan de mélange, propriétés physico-mécaniques, durabilité, MEB, ATG/ATD.

Terminologie du résumé

SA : Sable alluvionnaire

SDBr : Sable de déchet de brique

SDBt : Sable de déchet de béton

Rc 28jr : Résistance de la compression à 28 jours

Abstract

The aim of the study is to examine the effect of the incorporation of recycled fine aggregates on the physic-mechanical behavior of HPC. For this objective, a theoretical and experimental approach contributing to the formulation of concrete has been applied “Experimental Design Approaches”, a scheme of mixture design (*Simplix lattice designs*) was used, the models derived from predictions were applicable, to evaluate the effects of mixing factors and their interactions, to optimize the performance of the studied system.

The results indicate that the settling of recycled concrete is strongly influenced by the content of SDBt, then SA and SDBr, respectively. Under optimal conditions the three factors have the values (0% SA, 25% SDBr, 75% SDBt) for which the compressive strength (R_c 28jr) reaches a maximum value of 82.8 MPa. At 28 days, the optimal flexural strength is that of concrete HPC9 (75% SA and 25% SDBr), this is attributed to the pozzolanic reaction of the SDBr fines (calcined clay) and the production of the new CSH, which has brought a better densification of the cement matrix. Analysis of the statistical parameters ($R^2 = 0.97$, p-valued <0.05 , residues) showed that the developed models were able to predict the effect of sand nature on the fresh and hardened concrete performance.

concrete can exhibit critical behavior under the chemical attack when they exposed to sea water. The analysis on their microstructures is necessary to understand complex macroscopic phenomena. To do this, the information in visual form provided by microscopic observation of the concrete is supplemented by thermo-gravimetric and thermo-differential analyzes (TDA / TGA) on five HPC with different proportions of recycled sands during 28 and 180 days.

Keywords:

High performance concrete, recycled sand, mixture design, physico-mechanical properties, durability, SEM, TGA/TDA.

Nomenclature

SA : Natural Sand

SDBr : Recycled Brick Aggregates

SDBt : Recycled Concrete Aggregates

Rc 28jr: compressive strength at 28 days

الملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تقويم تأثير دمج الرمل المعاد تدويره على السلوك الفيزيائي والميكانيكي للخرسانة عالية الأداء. لهذا الغرض، تم استخدام مقاربة نظرية وتجريبية لصياغة الخرسانة، باستخدام مناهج التصميم التجريبية، حيث استخدمت النماذج المستمدة من التنبؤات، لتقييم تأثيرات عوامل الخلط وتفاعلاتها لتحسين أداء النظام المدروس

تشير النتائج إلى أن ترسيب الخرسانة المعاد تدويرها يتأثر بشدة بمحتوى مخلفات الرمل الخرساني SDBt، الرمل الغريني SA، ثم رمل الأجر SDBr، على التوالي. في ظل الظروف المثلى، يكون للعوامل الثلاثة القيم (SA % 0، SDBr % 25، SDBt % 75) التي تصل فيها قوة الانضغاط ($R_c \text{ à } 28\text{jr}$) إلى قيمة قصوى تبلغ 82.8 ميجا باسكال. بعد 28 يوم، تكون القوة المثلى لانتشاء الخرسانة هي قوة HPC9 (SA) (25%، SDBr75%)، ويعود ذلك إلى التفاعل البوزولاني لجزيئات الطين المكلس وكذا إنتاج CSH جديد، الذي يؤثر إيجاباً على تكثيف أفضل لبنية الأسمنت. أظهر تحليل المعطيات الإحصائية ($p < 0.05$)، على أن النماذج المطورة قادرة على التنبؤ بتأثير الطبيعة الرملية على أداء الخرسانة في الحالتين الطازجة والمتصلبة. ($R^2=0.97$)

من ناحية أخرى، يمكن للخرسانة أن تظهر سلوكاً حرجاً عند تعرضها إلى وسط كيميائي عالي الحموضة كمياء البحر، ويعد تحليل هذه التأثيرات على بنيتها المجهرية خطوة ضرورية لفهم الظواهر الميكروسكوبية المعقدة، ذلك كون الخرسانة تخضع لتعدلات فيزيائية كيميائية تؤثر بشدة على بنيتها الميكروسكوبية. للقيام بذلك، يتم استكمال المعلومات في الشكل المرئي التي توفرها المراقبة المجهرية للخرسانة بقياس التحليلات الجاذبية الحرارية والتحليلات التفاضلية الحرارية لخمسة عينات من الخرسانة عالية المقاومة بنسب مختلفة من الرمال المعاد تدويرها. وقياس مقاومتها الميكانيكية بعد 28 يوم و180 يوم.

الكلمات المفتاحية

خرسانة عالية الأداء، رمال معاد تدويرها، تصميم خليط، الاستدامة، خواص فيزيائية ميكانيكية، البنية الميكروسكوبية، التحليلات الجاذبية الحرارية والتحليلات التفاضلية الحرارية.

Table des matières

Résumé	I
Table des matières	IV
Liste des figures	IX
Liste des tableaux.....	XIII
Introduction générale	XIV

Chapitre I : Rappels théoriques et synthèses bibliographiques

I.1. Introduction	1
I.2. Préparation et utilisation des granulats recyclés à partir des déchets de béton et de briques	1
I.2.1. Provenance des granulats recyclés de construction	1
I.2.2. Confection des granulats à partir des déchets de démolition ou gravats	3
I.2.3. Détection et extraction des polluants	4
I.2.4. Utilisation des granulats valorisés dans les bétons suivant les normes en vigueur	5
I.3. Caractéristiques des granulats de béton et de brique recyclés.....	5
I.3.1. Constitution.....	6
I.3.2. Forme et granulométrie.....	8
I.3.2.1. Forme et squelette granulaire.....	8
I.3.2.2. Module de finesse des sables	10
I.3.2.3. Teneur en fines et surfaces spécifiques	11
I.3.2.4. Propreté des sables (éléments fins)	12
I.3.3. Porosité.....	13
I.3.4. Masses volumiques et coefficients d'absorption d'eau	13
I.4. Béton à granulats recyclés.....	15
I.4.1. Formulation des bétons de granulats recyclés.....	15
I.4.2. Influence de granulats recyclés sur la maniabilité du béton	17
I.4.3. Influence de la géométrie : morphologie et distribution granulaire	17
I.4.4. Influence des granulats recyclés sur la porosité du béton.....	18

I.4.5.	Influence des granulats recyclés sur masses volumiques et teneur en air.....	20
I.4.6.	Influence des granulats recyclés sur la résistance mécanique du béton.....	21
I.4.7.	Influence des granulats recyclés sur le retrait du béton	24
I.4.8.	Amélioration des propriétés des bétons à granulats recyclés	25
I.4.8.1.	Emploi des adjuvants : utilisation de superplastifiants.....	25
I.4.8.2.	Adaptation des méthodes de formulation	27
I.5.	Analyse de durabilité	28
I.5.1.	Facteurs affectant la durabilité du béton	30
I.5.2.	Phénomènes influents sur la durabilité	30
I.5.3.	Effet de l'eau de mer sur les bétons à base de déchet de brique et de béton.....	31
I.5.4.	Effet des déchets de brique et de béton sur la porosité	37
I.5.5.	Effet des déchets de brique et de béton sur l'absorption capillaire et la sorptivité	39
I.5.6.	Effet des déchets de brique et de béton sur les émissions des ions de chlore	42
I.6.	Microstructure des BHP	43
I.6.1.	Constitution.....	44
I.6.2.	Peau du béton.....	44
I.6.3.	Interface pâte-granulats	45
I.7.	Conclusion	46
	Bibliographie	47

Chapitre II : Méthode des plans d'expériences

II.1	Introduction.....	54
II.2	Vocabulaire de base des plans d'expériences	55
II.2.1	Facteur.....	55
II.2.2	La réponse	55
II.2.3	Domaine expérimental	56
II.2.4	Les surfaces de réponses	56
II.3	Methodologie des plans d'expériences	57
II.3.1	Principe.....	57
II.3.2	Choix de la méthode d'expérimentation.....	60
II.3.3	Analyse des résultats.....	60
II.3.4	Modélisation par régression linéaire multiple	60

II.4	Conditions d'application des plans d'expériences	61
II.5	Les types de plans d'expériences	61
II.5.1	Plans factoriels complets	61
II.5.1.1	Plans factoriels complets à deux niveaux	67
II.5.1.2	Plans factoriels complets à trois niveaux	68
II.5.2	Plans fractionnaires.	64
II.5.3	Plans de mélange.	64
II.5.4	Les plans hybrides.	65
II.6	Modelisation par la methode des plans de melange	66
II.6.1	Contrainte fondamentale des mélanges.....	66
II.6.2	Représentation géométrique des plans de mélange.....	67
II.6.2.1	Diagramme de mélange binaire.....	67
II.6.2.2	Diagramme de mélange ternaires	68
II.6.2.3	Diagramme de mélange quartenaire	68
II.6.3	Types des plans de mélanges classiques.....	69
II.6.3.1	Plans en réseaux.....	69
II.6.3.2	Plans de mélanges centrés	71
II.6.3.3	Plans de mélanges centrés augmentés.....	71
II.6.4	Modèles mathématiques des plans de mélanges	72
II.6.4.1	Modèle du premier degré.....	72
II.6.4.2	Modèle du second degré	73
II.6.4.3	Modèle du troisième degré	74
II.7	Validation du modele postule	74
II.7.1	Analyse de la variance.....	74
II.7.2	Coefficient de détermination (R^2)	75
II.7.3	Analyse des Résidus	76
II.7.4	Signification des effets de facteurs.....	77
II.8	Conclusion	77
	Bibliographie	78

Chapitre III : Caractérisation des matériaux et protocole expérimentale

III.1	Introduction	80
III.2	Matériaux utilisés et Essais	80

III.2.1	Le sable..	80
III.2.1.1	Analyse granulométrique NF EN 933-1	82
III.2.1.4	La masse volumique absolue et apparente NF EN 1097-6	83
III.2.2	Le gravier	84
III.2.2.2	Les masses volumiques apparentes et absolues NF EN 12620	84
III.2.2.3	Coefficient d'absorption NF EN 1097-6	85
III.2.3	Le ciment..	86
III.2.4	Fumé de silice.....	87
III.2.5	L'eau de gâchage ..	87
III.2.6	Adjuvant.....	87
III.3	Analyse aux Rayons X des trois sables.....	89
III.4	Protocole expérimental	91
III.4.1	Formulation par la méthode de l'université de SHERBROOKE	91
III.4.2	Mise en place du béton et conservation	95
III.4.3	Essai d'ouvrabilité des bétons.....	96
III.4.4	Résistance des bétons à la compression et à la flexion.....	97
III.4.5	Analyse thermique différentielle couplée à l'analyse thermogravimétrique	98
III.4.6	Essais au microscope électronique à balayage	101
III.5	Organigrammes des essais expérimentaux	102
III.6	Conclusion	103
	Bibliographie.....	104

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1	Introduction	106
IV.2	Méthodes utilisées	106
IV.2.1	Méthode des plans d'expériences	106
IV.2.2	Méthode de formulation : Préparation des spécimens	108
IV.3	Résultats et discussions.....	109
IV.3.1	Modélisation de l'affaissement.....	111
IV.3.2	Modélisation de la résistance mécanique	115
IV.4	Optimisation.....	122
IV.5	Conclusion.....	123

Bibliographie.....	125
--------------------	-----

Chapitre V : Résultats et analyse de durabilité des BHP

V.1 Introduction :.....	128
V.2 Procédure expérimentale des analyses de durabilité MEB et ATG/ATD.....	130
V.3 MEB sur les fines de déchets de brique et du béton.	130
V.4 MEB sur BHP recyclés à base de déchet de brique et de béton concassé.....	131
V.5 ATD/ATG appliqué sur les différents bétons à haute performance.....	137
V.5.1 ATD/ATG sur les BHP recyclés et témoin à différents âges	138
V.5.2 Evaluation du taux de portlandite des BHP.....	147
V.6 Conclusion :	149
Bibliographie.....	151

Conclusions générales et perspectives	155
---	-----

Annexe	159
--------------	-----

Liste des figures		
N° Figure	Titre des Figures	Page
Figure I.1	Représentation schématique du processus d'élaboration des granulats recyclés ...	3
Figure I.2	Défis de valorisation des granulats recyclés de construction	4
Figure I.3	Constitution des granulats recyclés	6
Figure I.4	Composition d'un granulats béton recyclés	7
Figure I.5	Teneurs en mortiers.....	8
Figure I.6	Analyse granulométrique de sables (SN et SR) et gravillons (GrN et GrR) naturels et recyclés (R)	9
Figure I.7	Effet de teneur en mortier sur les valeurs de masses volumiques	14
Figure I.8	Effet de la teneur en mortier sur le coefficient d'absorption	15
Figure I.9	Mesure de retrait effectué par Québaud	25
Figure I.10	Influence de l'emploi des super-plastifiants sur les propriétés mécaniques des bétons à granulats recyclés selon Pereira et al	26
Figure I.11	Principales agressions et attaques du béton	29
Figure I.12	Processus de détérioration du béton par les attaques chimiques	31
Figure I.13	Expansion et variation du poids des mortiers à base de brique.	34
Figure I.14	Résistance à la compression des bétons à base de brique, exposé à l'eau de mer pendant une durée de 560 jours	35
Figure I.15	Détérioration du béton par eau de mer	36
Figure I.16	Variation de la pénétration d'eau des bétons recyclés	37
Figure I.17	Influence des différents taux de substitution de ciment par le MK et DB sur la densité et la compacité des mortiers.....	38
Figure I.18	Effet des différents taux de substitution de ciment par le MK et DB sur la porosité totale.....	38
Figure I.19	Effet des différents taux de substitution de ciment par les DB et MK sur la distribution des pores	39
Figure I.20	Effet des différents taux de substitution de ciment par les DB sur la sorptivité	40
Figure I.21	Effet des différents taux de substitution de sable par les briques	40
Figure I.22	Effet des différents taux de substitution de gravier par les briques	41
Figure I.23	Absorption d'eau des bétons à base de granulats et sable de briques et de bétons concassés	42
Figure I.24	Absorption d'eau des bétons à base du mélange de granulats et sable de briques et de bétons concassés	42
Figure I.25	Taille des particules et surface spécifique liée aux matériaux en béton	43
Figure II.1	Principe de base des plans d'expérience	55

Figure II.2	Dimensions du domaine expérimental.....	56
Figure II.3	L'ensemble des réponses qui correspond à tous les points du domaine d'étude forme la surface de réponse	57
Figure II.4	Organigramme général de traitement des plans d'expériences	59
Figure II.5	Plan factoriel complet à 2 facteurs (domaine expérimental à 2 dimensions)	62
Figure II.6	Domaine de variation d'un facteur (le niveau haut est noté par +1 et le niveau bas par -1)	62
Figure II.7	Triangle de Féret, 1892	65
Figure II.8	Représentation d'un mélange à deux constituants.....	67
Figure II.9	Représentation des mélanges à deux constituants sur un segment de droite.....	67
Figure II.10	Représentation des mélanges à trois constituants (triangle équilatéral).....	68
Figure II.11	Représentation des mélanges à quatre constituants	69
Figure II.12	Plan de mélange ne comportant que les trois produits purs	69
Figure II.13	Plan de mélanges en réseaux (Simplex lattice designs) comportant les trois produits purs et les mélanges moitié-moitié	70
Figure II.14	Plan de mélanges en réseaux (Simplex lattice designs) comportant les trois produits purs et les mélanges 1/3-2/3 et 1/3-1/3-1/3, ce plan est noté {3, 3}.....	70
Figure II.15	Plan de mélanges centré (Simplex centroid designs) comportant les trois produits purs et les mélanges moitié-moitié et le mélange équiproportionnel des trois produits purs	71
Figure II.16	Plan de mélanges centré augmenté (Augmented Simplex-centroid designs) comportant les trois produits purs, les mélanges moitié-moitié, le mélange équiproportionnel des trois produits purs et les mélanges situés aux centres de gravité des simplex unitaires.....	72
Figure III.1	Préparation des matériaux recyclés.....	81
Figure III.2	Analyse granulométrique des matériaux recyclés	82
Figure III.3	Courbes granulométriques des trois types de sable utilisés	83
Figure III.4	Essai d'équivalent de sable	85
Figure III.5	Essai de la masse volumique absolue	86
Figure III.6	Essai de la masse volumique apparente	87
Figure III.7	Essai de la masse volumique apparente et absolue du gravier	89
Figure III.8	Analyses granulométriques des deux fractions du gravier (G3/8, G8/15) utilisés. ...	89
Figure III.9	Diffractogramme X de la poudre du sable alluvionnaire.	93
Figure III.10	Diffractogramme X de la poudre du sable de déchet de béton.....	93
Figure III.11	Diffractogramme X de la poudre du sable du déchet de brique	94
Figure III.12	Organigramme de la méthode de formulation de l'université de Sherbrooke proposée pour formuler des BHP	96
Figure III.13	Courbe granulaire de Dreux-Gorisse.....	97
Figure III.14	Formulation des BHP recyclés et conservation	100

Figure III.15	Essai d'ouvrabilité au cône d'Abrams	100
Figure III.16	Essai de flexion pour béton	101
Figure III.17	Essai de compression pour béton	102
Figure III.18	Vibrobroyeur à disque et sa garniture	103
Figure III.19	Machine utilisé pour l'essai ATD/ATG.....	104
Figure III.20	Microscope électronique à balayage	105
Figure III.21	Programme expérimental de l'étude sur BHP recyclés à base de déchet de brique et de béton.	106
Figure IV.1	Substitution du sable alluvionnaire Jusqu'à 75 % par les trois types de sable (SA, SDBr Et SDBt).....	111
Figure IV.2	représentation du réseau triangulaire à 15 compositions	112
Figure IV.3	Variation de l'affaissement en fonction du pourcentage de substitution du sable recyclé. a) Substitution du sable de déchet de brique SDBr. b) Substitution du sable de déchet de béton SDBt. c) Remplacement du sable alluvionnaire par un mélange binaire de SDBr et SDBt.....	115
Figure IV.4	Représentation graphique de l'affaissement observé dans l'expérimentation en fonction des valeurs prévue pour les 15 BHP recyclés.....	118
Figure IV.5	Courbes d'iso-réponse de l'affaissement des BHP en fonction de pourcentage de substitution des trois sable (SA, SDBr et SDBt)	118
Figure IV.6	Evolution de la résistance à la flexion à 7 et 28 jours en fonction des taux de substitution des sables recyclés SDBr et SDBt	119
Figure IV.7	Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues de la résistance mécanique.	121
Figure IV.8	Graphique des résidus en fonction des valeurs prévues a) Rc 28jr b) Rf 28jr	123
Figure IV.9	Courbes iso-réponses de la résistance à la flexion à 7 jours et à 28 jours.....	124
Figure IV.10	Courbes iso-réponses de la résistance à la compression à 7 jours et à 28 jours	124
Figure IV.11	Profilier de prévision de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de SA, SDBr et SDBt.	126
Figure V.1	Photos MEB des poudres de déchets de béton et de brique broyés	135
Figure V.2	MEB sur béton de référence BHP15	136
Figure V.3	MEB sur béton BHP1 à base du granulats fin de déchets de béton (100% SDBt)	137
Figure V.4	MEB sur béton BHP2 à base du granulats fin de déchets de brique (0%SA, 25% SDBr, 75% SDBt). « BHP optimum ».....	137
Figure V.5	MEB sur béton BHP5 à base du granulats fin de déchets de brique (100% SDBr	138
Figure V.6	MEB sur béton BHP11 à base du granulats fin de déchets de béton et brique concassé (50%SA, 25% SDBr, 25% SDBt).....	139
Figure V.7	Analyse calorimétrique différentiel des fines de brique.....	141
Figure V.8	ATG sur mortiers BHP1 à base 100% de SDBt (100% sable de béton recyclé), après 28 jours de cure humide	145
Figure V.9	ATG sur mortiers BHP2 « optimum » (25% SDBr et 75% SDBt), après 28 jours de cure humide	145
Figure V.10	ATG sur mortiers BHP5 à base 100% de SDBr (100% sable de brique recyclé) ,	146

	après 28 jours de cure humide	
Figure V.11	ATG sur mortiers BHP11 « béton ternaire » (50% SA, 25% SDBr et 25% SDBt) , après 28 jours de cure humide	146
Figure V.12	ATG sur mortiers BHP15 « béton témoin de référence » , après 28 jours de cure humide	147
Figure V.13	Modèle de type de traitement des courbes d'analyse thermogravimétrique	151

Liste des tableaux		
N° Tableau	Titre du tableau	Page
Tableau I.1	Estimation des teneurs en mortiers.....	8
Tableau I.2	Classification des sables en fonction du module de finesse selon la norme Française EN 12620	10
Tableau I.3	Modules de finesse des sables selon des recherches antérieures	10
Tableau I.4	Surface spécifique des fines de granulats recyclés	12
Tableau I.5	Surface spécifique des fines de granulats recyclés	12
Tableau I.6	Synthèse des résultats des masses volumiques ρ_{rd} , ρ_{psd} , ρ_a et coefficients d'absorption WA24 des granulats recyclés et naturels.....	14
Tableau I.7	Influence du taux de préhumidification sur l'ouvrabilité initiale en fonction des taux de substitutions.....	20
Tableau II.1	La matrice d'expériences.	63
Tableau III.1	L'analyse granulométrique du sable alluvionnaire.	82
Tableau III.2	Caractéristiques physiques des sables utilisés.....	83
Tableau III.3	Analyse granulométrique du gravier de classe 3/8	87
Tableau III.4	Analyse granulométrique du gravier de classe 8/15.....	88
Tableau III.5	Les Caractéristiques physiques des graviers utilisés	88
Tableau III.6	Propriétés physico-mécanique du ciment utilisé.....	90
Tableau III.7	Analyse chimique de ciment et du fumé de silice utilisés	90
Tableau III.8	Analyse chimique de l'eau utilisée	91
Tableau III.9	Caractéristique du super-plastifiant utilisé	92
Tableau III.10	Composition minéralogique estimative semi quantitative des trois sables.	94
Tableau III.11	Analyse chimique élémentaires effectuées par Fluorescence X	95
Tableau III.12	Composition des bétons formulés	98
Tableau IV.1	Les proportions des facteurs dans les compositions étudiées	112
Tableau IV.2	Quantités des différents constituants des BHP recyclés selon le plan de mélange proposé	113
Tableau IV.3	Résultats expérimentales en fonction des proportions des facteurs dans les compositions étudiées	114
Tableau IV.4	Comparaison entre les résultats mesurées dans l'expérimentation et estimés par le modèle d'affaissement des BHP recyclés.....	116
Tableau IV.5	Paramètres d'estimation du modèle pour le résultat d'affaissement étudié	117
Tableau IV.6	Les paramètres d'estimation du modèle pour la résistance à la compression (R_c 28jr) étudiée	120
Tableau IV.7	Les paramètres d'estimation du modèle pour la résistance à la flexion (R_f 28jr) étudiée	120
Tableau IV.8	Comparaison des valeurs de la résistance mécanique mesurées	122

	(expérimentalement) et les valeurs prévues du modèle mathématique à l'âge de 28jours.	
Tableau V.1	ATG pour les BHP recyclés à base de déchet de brique et du béton après 28 jours et 180 jours de cure humide	144
Tableau V.2	Taux de portlandite des BHP à base de déchets de béton et de brique en fonction de l'âge	152

INTRODUCTION GENERALE

Les sinistres naturels comme les séismes et les inondations, ainsi que le vieillissement et les dégradations des bâtiments publics, des ponts et des installations industrielles sont démolis mais leurs matériaux ne sont plus souvent recyclés. Dont leur extraction des ressources naturelles dans certains pays, sont épuisées, le sable de mer interdit, les granulats utilisés sont ramenés de très loin, et les décharges publiques sont saturées. En plus, les investissements sur la valorisation des déchets dans le bâtiment et les travaux publics sont rares [1,2].

Le recours aux granulats de béton et de brique cuite concassés issus de produits de construction et/ou de démolition présente un intérêt particulier, leur valorisation permet de contribuer à la résolution du problème de stockage des déchets, à la réduction de l'impact sur l'environnement, la préservation des ressources naturelles, ainsi que la réduction du coût de construction et enfin à la résolution du problème d'approvisionnement en sable et graviers [1,2].

En Europe, où des données sont disponibles, les pays de l'Union Européenne produisent chaque année environ 500 kg de déchets de construction et de démolition par habitant. Les granulats recyclés qui en sont issus, trouvent essentiellement des débouchés dans le domaine routier [3]. En Algérie, en plus du déficit important (10 à 20%) connu ces dernières années en granulats et ciment, les déchets de construction et de démolition sont importants et rarement valorisés [4]. Une seule tentative de valorisation dans ce domaine a été entreprise à El-ASNAM (CHLEF actuellement) suite au tremblement de terre de 1982 en collaboration avec le Centre Scientifique et Technique de Construction (C.S.T.C) Belge [4].

Cependant, pour l'emploi des granulats recyclés, en particulier les granulats de béton et de briques concassées, dans la composition bétons dans les nouvelles constructions, il existe plusieurs lacunes dans les textes de codification technique. D'autant plus, le manque de connaissances sur la durabilité de ces bétons engendre la méfiance des usagers [5]. Par conséquent, une meilleure sensibilisation sur le comportement des bétons incluant de tels granulats pourrait contribuer au développement de ce type de matériau.

La pénurie de sable et de granulats couplée à l'augmentation des déchets solides de construction a exacerbé le problème du manque des matériaux de construction ainsi que sont

devenues plus sévères [6]. Dans ce contexte, la réutilisation des agrégats de béton recyclé semble fournir les avantages spécifiques de résoudre ce dilemme.

Ce travail de recherche a été entrepris pour contribuer au développement de l'industrie de recyclage et à la valorisation des déchets de construction et de démolition en Algérie. Pour cette recherche on a opté pour un BHP grâce à leur haute résistance, offre une bonne durabilité à long terme aux structures et permet d'économiser jusqu'à 40% des matériaux. [7,8]

En outre, et pour élaborer la composition du mélange à proposer, nous avons utilisé une nouvelle technique d'optimisation (méthode des plans d'expérience) [9-11]. Elle représente l'une des méthodes de prédiction statistique, qui permet à la fois de rationaliser le programme de test et de modéliser empiriquement les réponses obtenues selon les paramètres de l'étude. Par une approche mathématique, cette dernière permet de piloter avec un nombre minimal de tests, afin de révéler l'effet de chaque paramètre étudié séparément et en interaction avec d'autres paramètres [12,13].

La valorisation des déchets de construction et de démolition, brique et béton en particulier, dans le béton à haute performance sera présenté. Dans cette étude, la caractérisation physico-mécanique du béton à base de granulats fins recyclés, et de l'ensemble des granulats fins de béton et de briques concassées est étalée par une approche du plan des mélanges. Les mélanges des BHP à granulats fins recyclés sont par la suite optimisés. Cela permet de choisir les couples optimaux les plus performants, tant en termes de résistance mécanique que du point de vue ouvrabilité. Pour cette raison, la théorie de la modélisation par l'approche des plans du mélange qui permet de hiérarchiser les paramètres influents et de quantifier les effets.

Les structures en béton à haute performance ont été largement utilisées dans le génie civil, tel que les ponts autoroutiers, les ponts maritimes transversaux et les ponts ferroviaires [14,15]. Néanmoins, les eaux salées et les sols salins des zones côtières ou arides de notre territoire sont riches en ions agressifs (c'est-à-dire sulfate, chlorure et magnésium) [16,17]. Les structures en béton ancrées dans des sols salins et de l'eau de mer sont exposées à l'environnement de corrosion à un âge très précoce et plus vulnérables au risque potentiel de problèmes de durabilité [5,18-19].

Généralement, les analyses des caractéristiques de la durabilité du béton traditionnel recyclé sont relativement inférieures au béton à granulats naturels [20-22]. L'agrégat recyclé obtenu par concassage mécanique induit des micro-fissures à l'ancien mortier collé, ce qui va

augmenter l'absorption d'eau, la perméabilité, l'indice de concassage et diminuer la densité apparente [23,24]. La quantité de mortier collé et la qualité relative du béton d'origine ont un impact important sur la durabilité du béton recyclé [25]. La durabilité du béton à granulats recyclés est également affectée par l'interface de la zone de transition, car il possède une perméabilité et une porosité plus élevées que le béton naturel [26,27]. À cet égard, d'amples recherches ont été menées afin d'améliorer les performances du béton à granulats recyclés, l'approche a consisté à élaborer des mélanges en deux étapes en ajoutant de superplastifiants dans la préparation du béton [28-29], ainsi que le prétraitement de carbonatation [30], et enfin l'ajout d'adjuvants minéraux de fumée de silice, cendres volantes et cendres volcaniques [31].

Ce manuscrit se subdivise en trois parties :

- **La première partie**, comporte une recherche bibliographique sur les bétons à granulats recyclés. Ainsi il y est traité différents aspects de la théorie sur les plans d'expériences. Dans un premier on montre l'intérêt des plans d'expériences par rapport à la méthode classique des essais et des erreurs, on décrit les outils nécessaires à la formulation d'un problème.
- **La deuxième partie**, est expérimentale, qui est conduite en deux étapes :
La 1^{er} étape, porte sur la caractérisation des matériaux et les techniques expérimentales utilisées. La préparation et le prétraitement des matériaux sont d'abord décrits. Après avoir mis en évidence les caractéristiques recherchés, une formulation de béton BHP est élaborée. A l'aide de la méthode de l'université de Sherbrooke basée sur le calcul des volumes absolus en combinant des résultats empiriques et de calcul pour décrire le dosage des constituants.
La 2^{ème} étape, est consacrée au développement des modèles mathématiques et optimisation de l'influence de chaque facteur sur le comportement physico-mécanique du béton recyclé, ainsi que l'interaction qui existe entre les différents paramètres.
- **Troisième partie**, est consacrée à l'analyse de durabilité en utilisant une technique de microscopie électronique capable de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon. Ceci en utilisant le principe des interactions électrons-matière des agents extérieurs de notre BHP recyclé. Ainsi une analyse thermique différentielle couplée à l'analyse thermogravimétrique ATG/ATD permet de voir le comportement des poudres en fonction de la température.

Le manuscrit est épilogué par une conclusion générale regroupant une synthèse générale de l'ensemble des résultats obtenus, suivie d'une présentation de quelques nouvelles perspectives de recherche.

Bibliographies

- [1].Jeonghyun Kim. Influence of quality of recycled aggregates on the mechanical properties of recycled aggregate concretes: An overview, *Construction and Building Materials* 328 (2022) 127071.
- [2].Fernanda de Andrade Salgado, Flávio de Andrade Silva. Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: A review, *Journal of Building Engineering* 52 (2022) 104452.
- [3].Safiullah Omary, Elhem Ghorbel, George Wardeh. Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concretes properties. *Construction and Building Materials* 108 (2016) 163–174
- [4]. AND Agence Nationale des Déchets, Rapport national sur l'état et l'avenir de l'Environnement, 2012
- [5]. Feng Xie, Jingpei Li, Gaowen Zhao, Chen Wang, Yonghe Wang, Pan Zhou. Experimental investigations on the durability and degradation mechanism of cast-in-situ recycled aggregate concrete under chemical sulfate attack. *Construction and Building Materials* 297 (2021) 123771
- [6].Institute FIR. Analysis report on development prospect and investment strategy planning of construction waste treatment industry in China from 2019 to 2024. 2019 (in Chinese).
- [7].A. Abbas, G. Fathifazl, B. Fournier, O.B. Isgor, R. Zavadil, A.G. Razaqpur, S. Foo, Quantification of the residual mortar content in recycled concrete aggregates by image analysis, *Mater. Charact.* 60 (7) (2009) 716–728.
- [8].J.S. Ryu, An experimental study on the effect of recycled aggregate on concrete properties, *Mag. Concr. Res.* 54 (1) (2002) 7–12.
- [9].Goupy, J. and Creighton, L. (2007). Introduction to design of experiments with JMP examples. 3rd ed. Cary (NC): SAS Institute, pp. 438. <https://trove.nla.gov.au/version/43645151>.
- [10]. Mayandi Venkatesan, Qammer Zaib, Izhar Hussain Shah, Hung Suck Park. (2019). Optimum utilization of waste foundry sand and fly ash for geopolymer concrete synthesis using D-optimal mixture design of experiments. *Resources, Conservation & Recycling*, 148, pp. 114–123. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.05.008

- [11]. Varanda, C. Portugal, I. Ribeiro, J. Silva, A.M.S. Silva. C.M. (2017). Optimization of bitumen formulations using mixture design of experiments (MDOE). *J. Constr. and Build. Mater.*, 156, pp. 611-620. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.146.
- [12]. Hammoudi, A. Moussaceb, K. Belebchouche, C. and Dahmoune, D. (2019). Comparison of artificial neural network (ANN) and response surface methodology (RSM) prediction in compressive strength of recycled concrete aggregates. *J. Constr. and Build. Mater.*, 209, pp. 425–436. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.119.
- [13]. Gabriella Puente de Andrade, Gabriela de Castro Polisseni, Marco Pepe, Romildo Dias Toledo Filho. (2020). Design of structural concrete mixtures containing fine recycled concrete aggregate using packing model. *J. Constr. and Build. Mater.*, 252, 119091. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119091.
- [14]. L. Li, H. Chen, J. Li, De'an Sun, An elastoplastic solution to undrained expansion of a cylindrical cavity in SANICLAY under plane stress condition[J], *Comput. Geotech.* 132 (2021) 103990, <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103990>.
- [15]. C. Yang, J. Li, L. Li, De'an Sun, Expansion responses of a cylindrical cavity in overconsolidated unsaturated soils: A semi-analytical elastoplastic solution, *Comput. Geotech.* 130 (2021) 103922, <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103922>.
- [16]. H.F. Yu, Study on High Performance Concrete in Salt Lake: Durability, Mechanism and Service Life Prediction. PhD thesis. Southeast University, Nanjing, China, 2004. (in Chinese).
- [17]. H. Ma, W. Gong, H. Yu, W. Sun, Durability of concrete subjected to dry-wet cycles in various types of salt lake brines, *Constr. Build. Mater.* 193 (2018) 286–294.
- [18]. A. Bagheri, A. Ajam, H. Zanganeh, Investigation of chloride ingress into concrete under very early age exposure conditions, *Constr. Build. Mater.* 225 (2019) 801–811.
- [19]. Job Thomas, Nassif Nazeer Thaickavil and P.M. Wilson, strength and durability of concrete containing crushed concrete aggregates, *Journal of Building Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.05.007>
- [20]. A. Abbas, G. Fathifazl, B. Fournier, O.B. Isgor, R. Zavadil, A.G. Razaqpur, S. Foo, Quantification of the residual mortar content in recycled concrete aggregates by image analysis, *Mater. Charact.* 60 (7) (2009) 716–728.
- [21]. J.S. Ryu, An experimental study on the effect of recycled aggregate on concrete properties, *Mag. Concr. Res.* 54 (1) (2002) 7–12.
- [22]. J.Z. Xiao, J.B. Li, C. Zhang, Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading, *Cem. Concr. Res.* 35 (2005) 1187–1194.
- [23]. M. Etxeberria, E. Vázquez, A. Marí, Microstructure analysis of hardened recycled aggregate concrete, *Mag. Concr. Res.* 58 (10) (2006) 683–690.
- [24]. K.P. Verian, W. Ashraf, Y. Cao, Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production, *Resour. Conserv. Recy.* 133 (2018) 30–49.
- [25]. Z.H. Duan, S.P. Chi, Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars, *Mater. Design.* 58 (2014) 19–29.

- [26]. S.T. Lee, R.D. Hooton, H.-S. Jung, D.-H. Park, C.S. Choi, Effect of limestone filler on the deterioration of mortars and pastes exposed to sulfate solutions at ambient temperature, *Cem. Concr. Res.* 38 (1) (2008) 68–76.
- [27]. J. Zhang, D. White, P.C. Taylor, C. Shi, A case study of evaluating joint performance in relation with subsurface permeability in cold weather region, *Cold. Reg. Sci. Technol.* 110 (2015) 19–25.
- [28]. D. Matias, J.D. Brito, A. Rosa, D. Pedro, Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates–Influence of the use of superplasticizers, *Constr. Build. Mater.* 44 (2013) 101–109.
- [29]. V.W.Y. Tam, C.M. Tam, Y. Wang, Optimization on proportion for recycled aggregate in concrete using two-stage mixing approach, *Constr. Build. Mater.* 21 (2007) 1928–1939.
- [30]. S. Kou, B. Zhan, C. Poon, Use of a CO₂ curing step to improve the properties of concrete prepared with recycled aggregates, *Cem. Concr. Res.* 45 (2014) 22–28.
- [31]. S.C. Kou, C.S. Poon, Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate, *Constr. Build. Mater.* 35 (2012) 69–76.

I.1 Introduction

Le béton est sans doute l'un des matériaux les plus importants dans le domaine du bâtiment et des travaux publics. Il faut reconnaître que la consommation du béton est en nette augmentation, ce qui a engendré une demande de plus en plus forte en granulats naturels dont les quantités disponibles se trouvent parfois limitées. Pour cela, il a été jugé intéressant de penser à l'utilisation des granulats recyclés qui peuvent représenter une bonne alternative afin de répondre aux besoins croissants en agrégats. Il a été montré que les déchets de construction et de démolition peuvent être recyclés et valorisés comme agrégats qui pourraient être utilisés dans les travaux de génie civil après avoir été soumis à un ensemble de traitements. Dans le cadre de la promotion d'un développement durable, qui repose sur les trois dimensions économique, environnementale et sociale, il a été jugé intéressant de préparer du béton haute performance (BHP) à partir de granulats recyclés provenant du béton de déconstruction tout en ajoutant un agent fluidifiant et des additions minérales. Cette approche est considérée comme une solution fiable permettant d'assurer un développement équilibré entre les ressources naturelles et l'environnement.

Ce chapitre débute par un aperçu général sur l'élaboration ainsi que les différentes propriétés des granulats recyclés et leurs potentielles utilisations. Ensuite, la confection des bétons à granulats recyclés et l'influence de cette dernière sur les propriétés physico-mécanique du béton recyclé. Enfin, dans la dernière partie de ce chapitre nous aborderons des études menées sur les caractéristiques physico-mécaniques à l'état frais et durci des BHP, à l'égard de l'analyse de durabilité des BHP tout en mettant en évidence l'effet des granulats recyclés et des additions minérales sur les différents mécanismes dans les BHP. La synthèse de recherche bibliographique nous permettra de donner une idée sur les travaux effectués et les résultats obtenus et de proposer une méthodologie pour notre étude.

I.2 Préparation et utilisation des granulats recyclés à partir des déchets de béton et de briques

I.2.1 Provenance des granulats recyclés de construction

Les déchets du bâtiment et des travaux publics ou déchets de la construction (construction, réhabilitation, démolition et déconstruction) sont récupérés, recyclés et valorisés pour la confection de granulats destinés à la préparation du béton et du mortier.

➤ **Granulats recyclés issus de déchets de démolition**

Il a été rapporté que le béton représente environ 75 % en poids des matériaux utilisés actuellement dans le domaine de la construction, ce qui signifie qu'une proportion importante de déchets de démolition des constructions comprend principalement du béton et des briques.

Il est important de rappeler qu'aujourd'hui la production de granulats recyclés impose une méthode de tri et de sélection des déchets provenant de la démolition des constructions et destinés au recyclage. En effet, cinq catégories de déchets de démolition sont à distinguer suivant leur nature [1] :

- Les bétons armés ne contenant ni enduit ni plâtre ;
- Les déchets de briques, tuiles, graves, pierres, blocs rocheux, etc. ;
- Les déchets mélanges contenant de faibles quantités de plâtre, bois, plastique, etc. ;
- Les matériaux de basse qualité contenant plus de 10 % de bois, plâtre, et plastique ;
- Autres matériaux ne faisant pas partie des quatre catégories citées plus haut.

➤ **Granulats des rebus de production de l'industrie du béton**

Ces granulats peuvent provenir de deux sources différentes, à savoir :

- Les rejets de béton recueillis pendant toutes les phases de sa production. Ceux-là proviennent surtout de l'entretien des usines de production et du transfert du béton frais ; ils peuvent aussi provenir des gâchées de béton non utilisées. Il faut noter que la proportion de ce type de déchets varie généralement entre 0,2 et 1 % de la quantité de béton produite dans tous les secteurs de la construction [2-3].
- Les produits de construction non conformes (qualité et forme), cassés non utilisables. On peut aussi citer tous les produits rejetés après avoir subi des essais de la résistance à la rupture et autres. Signalons que ces déchets sont produits en quantité variant entre 0,2 et 3 % ; ces proportions dépendent des secteurs et des conditions imposées par les normes de sélection [3].

On dit que les morceaux et débris de béton durcis et propres sont des déchets inertes car ils ne sont pas mélangés avec d'autres déchets (emballages, chiffon, etc.) ; ils ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune réaction physique ou chimique. Ces déchets sont généralement acquis gracieusement par des entreprises du bâtiment et des travaux publics pour

les utiliser comme remblais, pour la réalisation de travaux d'aménagement, de restauration, ou même dans la construction.

I.2.2 Confection des granulats à partir des déchets de démolition ou gravats

Il est bien connu que les plateformes de recyclage des déchets du bâtiment et des travaux publics sont utilisées pour le stockage temporaire des déchets inertes pour ensuite les trier et les recycler. La préparation des granulats recyclés est une opération assez complexe car les déchets au moment de leur réception sont un mélange de plusieurs types de produits tels que le mortier, le gypse, le verre, la terre, le métal, etc. [4]. Notons que les déchets sont souvent acheminés comme des gros morceaux de débris de construction ou de démolition, appelés aussi gravats. Ainsi, dès qu'ils sont réceptionnés, les gravats sont soumis à un ensemble de traitements afin de les transformer en de nouveaux matériaux, comme le montre clairement la Figure I.1.

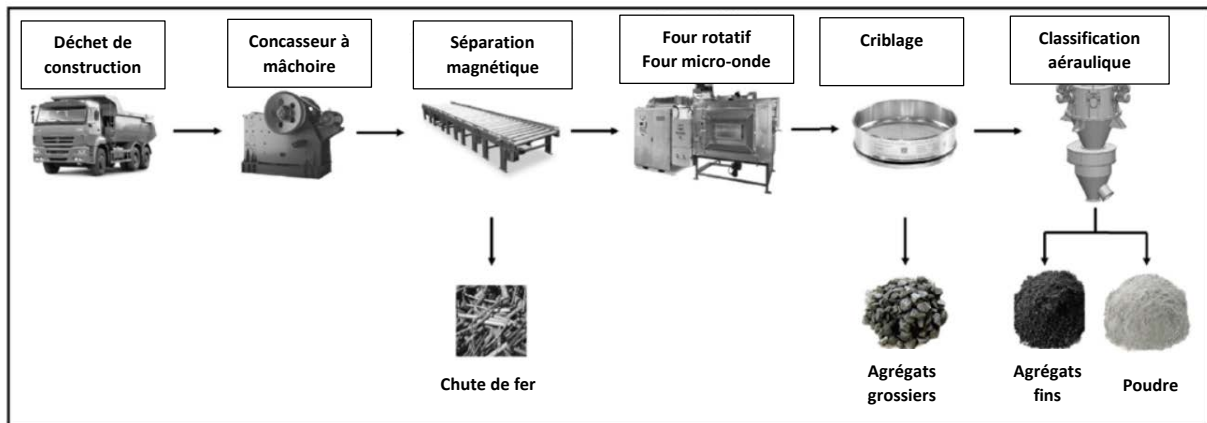


Figure I.1. Représentation schématique du processus d'élaboration des granulats recyclés [3].

Il est utile de noter que le système d'installation peut être immobile ou bien déplaçable. Il peut facilement être utilisé dans le réaménagement et la restructuration d'un chantier de déconstruction et de démolition. Cette opération dépend de chaque situation ; elle consiste à :

- Préparer les déchets avant concassage en utilisant un matériel approprié ;
- Effectuer un pré-criblage ;
- Réaliser plusieurs niveaux de concassage ;
- Opérer un niveau de criblage ou même plus si nécessaire ;
- Opérer un niveau de déferrailage ou même plus si nécessaire ;
- Installer un poste de sélection ou triage manuel et/ou mécanisé, comportant des réseaux aérouliques et hydrauliques.

Par ailleurs, l'installation destinée à la valorisation des matériaux devrait effectuer une ou plusieurs fonctions suivant les déchets à traiter et la qualité désirée des produits obtenus. [5].

I.2.3 Détection et extraction des polluants

Pendant le traitement, il est nécessaire de détecter et éliminer les polluants afin d'avoir des matériaux à recycler et à valoriser non pollués. En général, des éléments comme le bois, le métal, le plâtre, le carton, le papier et même le plastique, sont trouvés et retirés du béton. Les procédures utilisées sont multiples. Il y a d'abord l'enlèvement manuel (tige d'acier, plâtre...), après vient la séparation magnétique (type grattoir "ruban"), ensuite l'élimination par jet d'air (plastique, papier, carton...) ou par flottation (bois, éléments dont la densité est inférieure à celle de l'eau).

Les déchets recyclés sont répartis en trois catégories, suivant l'origine de la construction démolie. Ainsi, on a :

- Les agrégats recyclés de béton seulement ;
- Les agrégats recyclés de l'enrobé seulement ou bien de l'enrobé et du béton ;
- Les agrégats de matériaux de construction divers non triés (bétons, briques, carrelage, etc.), communément appelé tout-venant [6].

De nos jours, les agrégats sont recyclés et valorisés en vue d'être utilisés principalement dans le domaine de la construction et des travaux publics. En effet, ces granulats recyclés proviennent essentiellement des gravats issus de la démolition [5]. Cependant, il est hautement recommandé d'exploiter une autre source de ravitaillement en agrégats pour bétons. Le recyclage des bétons a officiellement été initié en 2011. Par ailleurs, un grand nombre d'études de faisabilité ont été réalisées et ont permis de mettre en évidence un certain nombre de défis (Figure I.2) [7] ;

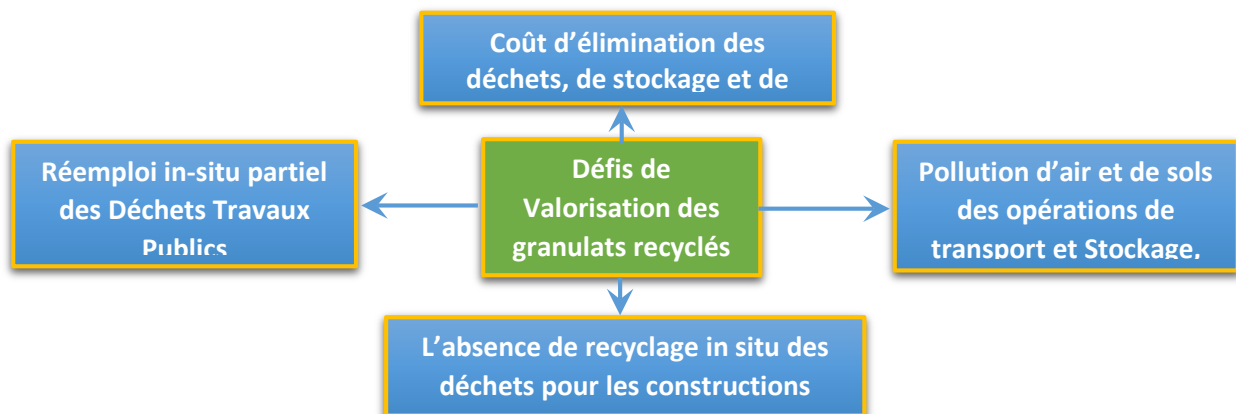


Figure I.2. Défis de valorisation des granulats recyclés de construction [7].

I.2.4 Utilisation des granulats valorisés dans les bétons suivant les normes en vigueur

Il faut noter que les granulats recyclés n'obéissent pas à des normes particulières et par conséquent, malgré qu'ils soient très différents des granulats naturels, ces agrégats provenant de béton recyclé doivent être conformes aux recommandations générales de la norme NF EN 12 620 relatives aux granulats pour béton, et aussi de la norme NF P 18-545 concernant les granulats. Notons que lorsque ces agrégats sont destinés à être utilisés comme granulats de béton, en plus des recommandations des normes précédemment citées, il faut aussi ajouter des stipulations particulières mentionnées dans la norme NF EN 206-1/CN. Il est bien connu que les réglementations sur l'utilisation des granulats recyclés dans le béton changent vite au cours du temps. Il faut noter aussi que la version 2004 de la norme EN 206-1 n'envisage aucune clause spécifique relative à l'emploi des granulats recyclés dans le béton.

Il est utile de signaler que depuis 2012, la norme EN 206-1/CN a instauré des dispositions propres aux gravillons ou graviers recyclés et aux sables aussi. Ces dispositions tournent autour des éléments donnés plus bas :

- Le code de dispositions repose sur une classification basée sur les normes EN 12 620 (2008) et EN 933-11 (2009).
- Les conditions particulières qu'elles doivent satisfaire
- Les taux de substitution des agrégats dans le béton

Signalons que la norme européenne EN 206-1 (Afnor, norme NF EN 206-1, 2014) a été mise à jour en novembre 2014 afin de considérer l'utilisation des granulats recyclés (recommandations sur l'utilisation de granulats recyclés à gros grains, i.e. gravillons et graviers). Néanmoins, la codification et le pourcentage de substitution permis sont différents de ceux de la version EN 206-1 / CN. En outre, aucune recommandation sur l'emploi des sables recyclés n'a été proposée, contrairement à la version EN 206-1/CN (2012).

I.3 Caractéristiques des granulats de béton et de brique recyclés

Les granulats recyclés issus des déchets de construction et/ou de démolition sont issus de béton et/ou de brique dont la composition d'origine est souvent inconnue. De nombreuses études ont été menées pour caractériser ces granulats recyclés afin d'évaluer leur variabilité de composition et de déterminer les propriétés de ces granulats recyclés.

I.3.1 Constitution

Dans les granulats recyclés (Figure I.3), nous pouvons distinguer :

- Les fines recyclées

Ce sont des éléments broyés dont la taille peut être comprise entre 0 et 500 μm . Ces éléments sont essentiellement constitués de pâte de ciment durci ou/et des granulats broyés d'origine naturelle ou/et du ciment anhydre.

- Les granulats fins recyclés (sable recyclé)

Il est généralement constitué de la fraction granulaire 0/4 mm. Il contient du sable de taille allant de 500 μm à 4 mm, en plus des éléments fins (0/500 μm). Ce dernier est constitué de granulats d'origine naturelle et de mortier primaire qui comprend à son tour du ciment anhydre et hydraté.

- Les granulats grossiers recyclés (Les gravillons et les graviers recyclés)

Ce sont les granulats recyclés dont la fraction granulaire est supérieure à 4 mm. Leur constitution est proche de celle des sables recyclés avec une teneur en mortier accolé plus grande.

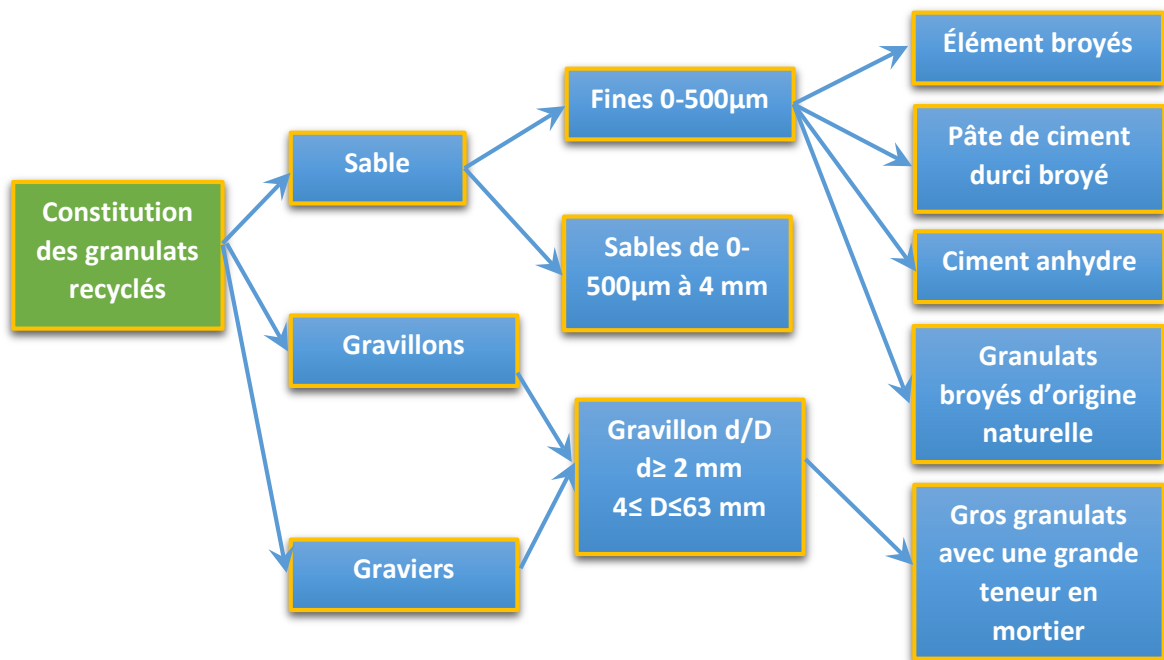


Figure I.3. Constitution des granulats recyclés

Les granulats recyclés sont constitués de granulats enrobés de mortier primaire; ces éléments sont soit liés ou séparés (Figure I.4). L'existence de ce mortier primaire est à l'origine de la différence de comportement entre les granulats recyclés et les granulats naturels. L'ampleur dans les changements de comportement est généralement néfaste pour le béton à l'état frais et/ou à l'état durci ; elle dépend de la quantité de mortier primaire dans le granulat recyclé [8].

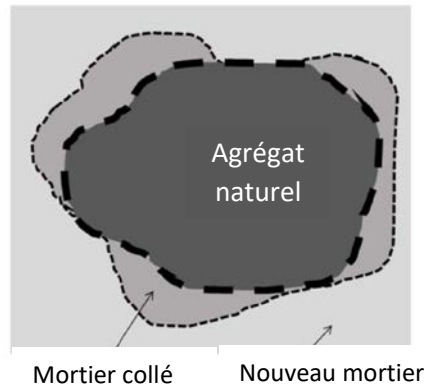


Figure I.4. Composition d'un granulat de béton recyclés [3].

De nombreux auteurs ont tenté d'estimer la quantité de mortiers initiaux existants (attachés ou non). Cependant, peu de recherches ont essayé d'associer la teneur du mortier aux caractéristiques des granulats recyclés. Il existe de nombreux types de méthodes envisageables pour estimer la quantité de mortier ; elles sont basées sur deux genres de méthodes :

- Méthodes destructives :
 - Des réactions chimiques, par des agressions acides
 - Des changements thermiques, par réalisation de cycles gel-dégel ou de montée en température élevée avec une trempe après traitement
 - Des actions physiques, par vibrations phoniques, électriques ou sonores
 - Des actions mécaniques, détérioration par usage prolongé en frottement, érosion ...
- Méthodes non destructives
 - Analyse d'image (différentiation de couleur ou de teinte)
 - Analyse indirecte : corrélation avec des mesures de porosité ou de masse volumiques

Peu d'études ont essayé d'analyser la fiabilité de ces méthodes (rendement et comparaison avec les valeurs de masses volumiques des granulats parents par exemple). Leurs inconvénients sont

parfois indiqués (coût, détérioration du granulat parent, passage à l'échelle industrielle,...). De plus, les méthodes mécaniques seules sont peu étudiées.

Les valeurs moyennes et les écarts types calculés et donnés, ainsi que la dispersion des valeurs représentée sur la Figure I.5, indiquent qu'il est difficile de donner une valeur moyenne à la teneur en granulats grossiers des mortiers, soit du fait de sa variation d'un lot à l'autre, soit du fait du manque de fiabilité de la méthode.

Néanmoins il peut être noté que les granulats fins (sables de déchet de béton par exemple) possèdent des taux de mortier collé plus élevés (10 à 15% de plus) lorsque l'analyse est faite sur un même prélèvement.

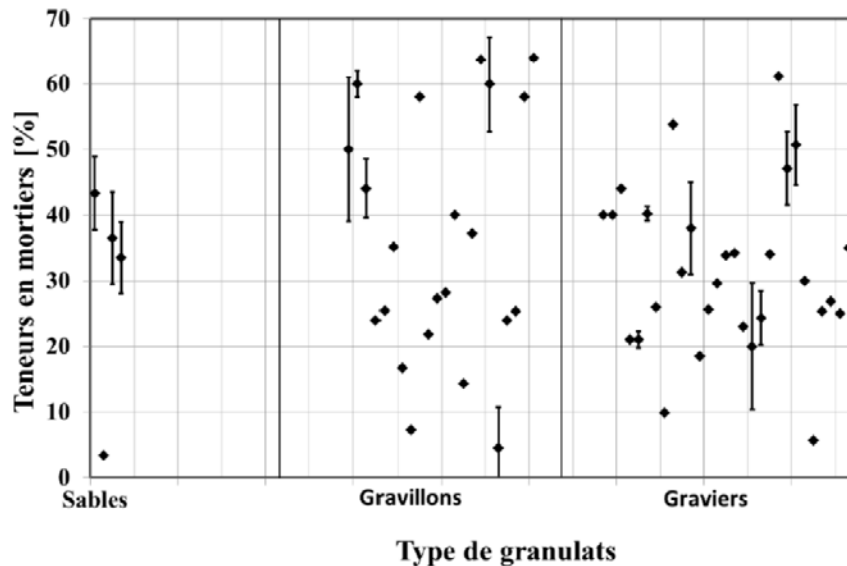


Figure I.5. Pourcentage du mortier collé

Tableau I.1. Détermination de pourcentage en mortiers des granulats recyclés

Particularité du granulat	Sable	Gravillon	Gravier
Valeurs Moyennes/ Ecart type	29.18/15.31	35.87/18.42	31.55/12.29

I.3.2 Forme et granulométrie

I.3.2.1 Forme et squelette granulaire

Après le concassage des gravats, on obtient des granulats dont la taille dépend essentiellement du modèle de concasseur employé. La granulométrie est directement liée à la nature du béton initial puisqu'un béton de basse résistance donne normalement un pourcentage en fines plus important [9-10].

Il est important aussi de savoir que les granulats recyclés produits ont une forme angulaire d'un côté, et allongée de l'autre [12]. En outre, la mesure de la distribution des granulats peut être affectée par leur morphologie. Néanmoins, les études menées sur les granulats recyclés n'ont pas fait mention d'une quelconque influence de la transformation de la forme des granulats sur l'interprétation des résultats de l'analyse granulométrique.

Par ailleurs, l'évaluation du coefficient d'aplatissement des granulats est déterminée suivant la norme NF EN 933-3. Cette évaluation peut s'appliquer soit aux granulats naturels, ou aux granulats artificiels ou bien aux granulats recyclés ayant une taille entre 4 et 100 mm. Le coefficient d'aplatissement est un critère lié à la forme de ces agrégats. Il faut savoir que les granulats naturels subissent un concassage en deux étapes. Il y a d'abord le concassage primaire et ensuite le concassage secondaire qui permet d'obtenir des granulats plutôt arrondis et pas très pointus. Cependant, les granulats recyclés qui ne passent que par la phase du concassage primaire ont une forme plutôt aplatie et sont plus clairs [13]. Par conséquent, on peut dire que les granulats recyclés ont des coefficients d'aplatissement plus faibles que ceux des granulats naturels.

D'autre part, la structure granulaire ou la répartition granulométrique des sables recyclés est différente de celle des sables naturels. Par contre, le squelette granulaire des gravillons recyclés et naturels sont identiques, comme cela est montré sur la Figure I.6 [14-16].

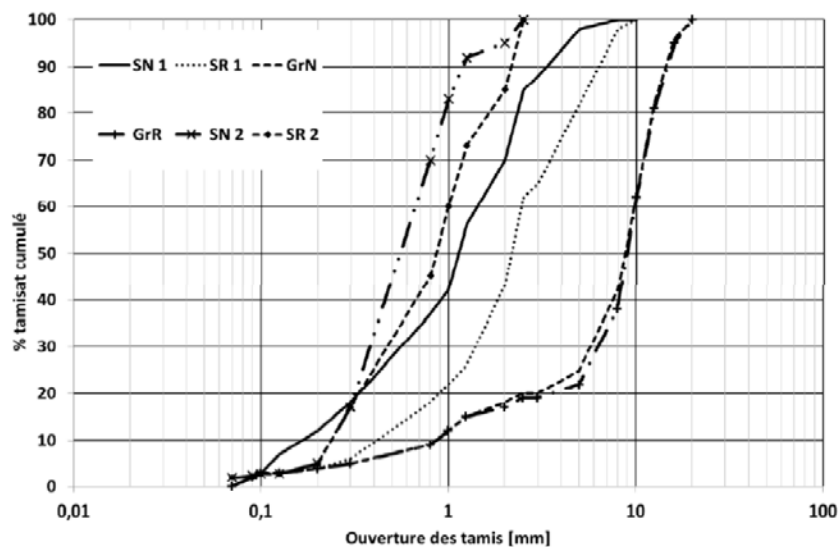


Figure I.6. Analyse granulométrique des sables (SN et SR) et gravillons (GrN et GrR) naturels et recyclés [14,16]

I.3.2.2 Module de finesse des sables

Les courbes granulométriques de la Figure I.6 sont utilisées pour évaluer les modules de finesse. Il est important de noter que le module de finesse correspond à la valeur moyenne de la répartition granulaire d'un type de sable.

La valeur du module de finesse du sable est généralement vérifiée avant son utilisation dans la formulation et la fabrication des bétons, Ceci permettra de faire une classification des granulats.

Tableau I.2. Classification des sables en fonction du module de finesse selon la norme Française EN 12620.

Module de finesse des sables selon NF EN 12620		
CF : sable à gros grains	MF : sable à moyen grains	FF : sable à grains fins
4.0 à 2.4	2.8 à 1.5	2.1 à 0.6

Il a été montré que des distributions granulométriques distinctes engendrent parfois des modules de finesse identiques. En effet, Evangelista et de Brito (2007) ont trouvé le même module de finesse moyen (2,38) pour deux sables différents [14]. Néanmoins, il faut préciser que les valeurs des modules de finesse peuvent varier en changeant de plateforme ou de carrière. Ainsi, d'après les valeurs enregistrées, on peut dire que les normes en vigueur indiquent que les sables recyclés peuvent être utilisés dans la formulation des bétons (Tableau I.3), à l'exception du béton développé par Meftah où du sable fin a été utilisé [17, 18].

Tableau I.3. Modules de finesse des sables selon des recherches antérieures.

Granulats	Module de finesse	Nombre de spécimens	Auteurs
GR	2.38	1	[14] Evangelista et Brito, 2007
	3.8	1	[19] Gomez-Soberon, 2002
	3.64	1	[12] Dao, 2012
GN (Siliceux)	3.1		
GN (Calcaire)	3.4		
GN	2.38	1	[14] Evangelista et Brito, 2007
	1.27	1	[17] Meftah et al., 2013 [18] Meftah et Arabi, 2011
	2.1		[20] Poon et al, 2006
	3.3	1	[19] Gomez-Soberon, 2002
Valeurs moyennes/écart type pour les GR	3.27/0.6	-	-
Valeurs moyennes/écart type pour les GN	2.59/0.76	-	-

1.3.2.3 Teneur en fines et surfaces spécifiques

Un certain nombre de chercheurs ont réussi à déterminer les proportions de fines ($< 63 \mu\text{m}$) dans les sables recyclés (0/4mm ou 0/6mm). Il s'est trouvé que la teneur maximale en éléments fins du sable recyclé est voisine de celle du granulat naturel. En effet, cette teneur peut varier entre 0,5 et 8% environ, en fonction de l'origine du granulat naturel et de la technique de production du granulat recyclé. Il faut noter que les granulats recyclés de deuxième génération, c'est-à-dire ceux ayant subi deux recyclages successifs au laboratoire, ont une teneur en fines plus grande (4 à 8%) que celle des granulats recyclés de première génération (0,1 à 1%) et produits au laboratoire, sous les mêmes conditions et en utilisant les mêmes matériaux bruts [12]. Il a été montré qu'un granulat provenant d'une plateforme de recyclage (stockage extérieur) peut avoir, dès le premier recyclage, des teneurs en fines entre 8 et 10% [21].

Par ailleurs, il faut préciser que les teneurs en fines dépendent grandement de la technique de concassage et de scalpage (élimination des fractions les plus fines des granulats), et du mode de stockage (àabri de vent). Il est important aussi de noter que toutes les teneurs mentionnées ci-dessus sont au-dessous de la valeur limite supérieure (16%) qui est recommandée par la norme XP P 18 545 (Afnor, NF P 18-545, 2011).

L'analyse de granulométrie par sédimentométrie, sur l'intervalle qui s'étend de 0 à 500 μm , donne des résultats très différents pour un granulat naturel et un granulat recyclé, pour des teneurs en fines ($< 63 \mu\text{m}$) identiques. Il a été signalé que, sur ce même intervalle, des teneurs 5 à 10 fois plus grandes en éléments de taille inférieure à 10 μm ont été trouvées sur les granulats recyclés. En outre, l'analyse granulométrique d'un sable recyclé doit être accompagnée d'une analyse laser

Par ailleurs, l'étude des surfaces spécifiques des grains fins, de taille inférieure à 63 μm , a montré que les surfaces spécifiques des fines recyclées ont des valeurs au moins 4 fois plus grandes que celles des fines naturelles, comme cela est indiqué dans le Tableau 1.4. [23].

En outre, il a été constaté que la surface spécifique des granulats recyclés fabriqués par des procédés industriels sur les plateformes est généralement plus petite que celle des granulats produits au niveau du laboratoire [4].

Tableau I.4. Surface spécifique des fines de granulats recyclés

Granulats	Surface spécifique (m ² /g)	Auteurs
SN (Japon)	1.83	[23] Fumoto and Yamada, 2012
SN (Chine)	0.82	
SN broyé calcaire	0.74	
SR plateforme	4.08	
SR démolition d'un bâtiment de 1932	4.91	
SR démolition d'un bâtiment de 1932	4.42	
SR plateforme (France)	8.2	[4] Zhao, 2014
SR plateforme (France)	4.9	
SR plateforme (France)	5.1	
SR plateforme (France)	7.5	
Valeur moyennes/écart type pour les GR	5.59±1.48	
Valeur moyennes/écart type pour les GN	1.33±0.51	

1.3.2.4 Propreté des sables (éléments fins)

Il a été montré que l'essai d'équivalent de sable et l'absorption au bleu de méthylène permet de quantifier la propreté du sable. En effet, ces deux tests permettent de mesurer la propreté correspondant à une teneur en argile seulement. Par conséquent, en considérant les seuils normatifs donnés dans le Tableau I.5, on peut dire que les granulats étudiés peuvent être considérés comme propres. Il est fortement recommandé d'utiliser des valeurs d'équivalent de sable plus grandes que 70%, lors des préparations des bétons car cela veut dire que le pourcentage en composants fins argileux sera suffisamment petit. Il est utile d'ajouter aussi que, au vu des normes actuellement en vigueur, les granulats avec une valeur d'équivalent de sable plus petite que 60% ne peuvent pas être utilisés comme granulats à béton en raison de la grande probabilité de retrait qui pourrait résulter de la présence de la grande quantité d'argile. L'essai d'adsorption du bleu de méthylène peut être appliqué pour conforter ces constatations.

Tableau I.5. Equivalent de sable et Bleu de méthylène

Essais	Type de granulats	valeurs	Auteurs
Equivalent de sable sur fraction 0/2 mm (%)	GN (siliceux)	85	[12] Dao, 2012
	GN (calcaire)	74	
	GN	93.8	[19] Gomez-Soberon, 2002
	GR	93.6	
Mesure au Bleu sur fraction 0/2 mm (g/kg)		84.66	[12] Dao, 2012
	GR	0.2	
	GN (siliceux)	1	
	GN (calcaire)	1.4	

I.3.3 Porosité

Il faut noter que la porosité dépend simplement de la composition en mortier primaire accolé ou non accolé. En outre, la porosité diminue lorsque la taille des granulats recyclés accroît [19] ; ou celle des granulats naturels devient petite, comme c'est le cas pour la teneur en mortier. Toutefois, il faut signaler que la porosité dépend également du type de granulat naturel parent employé [12]. Il a été montré que cette porosité est plus grande pour les granulats recyclés (13% +/- 3%, et 0 à 4%) pour lequel le béton parent est préparé avec des granulats plutôt calcaires que siliceux. Rappelons que le granulat calcaire parent est plus poreux que le granulat siliceux.

Par ailleurs, la porosité est liée à l'état de carbonatation du granulat recyclé. Il a été montré que la carbonatation réduit la porosité d'un granulat recyclé pour lequel la taille des pores passe de 0,01- 0,1 micron à 0,001- 0,01 micron si les granulats recyclés sont carbonatés [4, 25]. De plus, lorsque la portlandite se transforme en calcite, la porosité diminue [26]. Cependant, il est essentiel de savoir que la résistance du béton parent influence légèrement sur la porosité car, d'après Dao, des bétons parents ayant une résistance visée de 35 et 65 MPa mènent à des porosités de granulats recyclés très voisines [12],

Par ailleurs, un recyclage répété du béton induit une augmentation de la porosité qui est simplement liée à l'accroissement de la teneur en mortier. Dans ce cas-là, les porosités obtenues sont proches de 20% [12].

I.3.4 Masses volumiques et coefficients d'absorption d'eau des granulats

La capacité d'absorption d'un granulat dépend simplement de sa porosité accessible à l'eau. Des études menées précédemment ont généralement soutenu que cette caractéristique dépend carrément de la teneur en mortier primaire. Ceci est vrai également pour la variation de la masse volumique des granulats, et particulièrement celle de sa masse volumique réelle. Par conséquent, on peut dire que les coefficients d'absorption seront plus importants pour les matériaux recyclés (7 à 10%) que pour les naturels (0,4 à 2,2%) ; ils sont encore plus élevés pour les matériaux très fins. Notons aussi que les coefficients d'absorption augmentent à mesure que la taille des granulats diminue lorsque les teneurs en mortiers demeurent inchangées [19]. Le Tableau I.6 présente les valeurs moyennes ainsi que les écarts types.

D'autre part, des études réalisées sur l'impact de l'âge du béton parent sur le coefficient d'absorption et sur les masses volumiques des sables recyclés ont montré que l'âge n'affecte

pas beaucoup ce coefficient [8, 27]. Hansen a trouvé des résultats similaires concernant la teneur en eau du béton parent.

Tableau I.6. Synthèse des résultats des masses volumiques ρ_{rd} , ρ_{ssd} , ρ_a et coefficients d'absorption WA_{24} des granulats recyclés et naturels

Nature de granulats		Paramètre	Sable	Gravillon	Gravier
Synthèse	GN	WA_{24} (%)	1.32±0.90	1.62±1.18	0.92±0.47
		ρ_{rd} (g/cm^3)	2.57±0.04	2.58±0.13	2.58±0.06
		ρ_{ssd} (g/cm^3)	2.60±0.03	2.57±0.06	2.61±0.01
		ρ_a (g/cm^3)	2.67±0.02	2.65±0.02	2.63
	GR	WA_{24} (%)	8.67±1.94	7.48±1.31	5.33±1.70
		ρ_{rd} (g/cm^3)	2.13±0.06	2.21±0.11	2.25±0.08
		ρ_{ssd} (g/cm^3)	2.33±0.01	2.36±0.04	2.40±0.03
		ρ_a (g/cm^3)	2.63 1 essai	2.36	2.40

- WA_{24} est le coefficient d'absorption de l'eau, 24 heures après immersion (%).
- ρ_{rd} est la masse volumique réelle après séchage à l'étuve (g/cm^3).
- ρ_{ssd} est la masse volumique réelle du granulat saturé superficiellement sec (g/cm^3).
- ρ_a est la masse volumique absolue (g/cm^3).
- Fractions analysées (mm).

Un nombre important d'études ont trouvé un lien entre le coefficient d'absorption et la masse volumique d'un côté et à la teneur en mortier de l'autre. Il s'agit maintenant d'analyser cette corrélation. En effet, il a été confirmé (Figure I.7 et Figure I.8) que la masse volumique diminue et l'absorption d'eau augmente avec l'accroissement de la teneur en mortier [17-18].

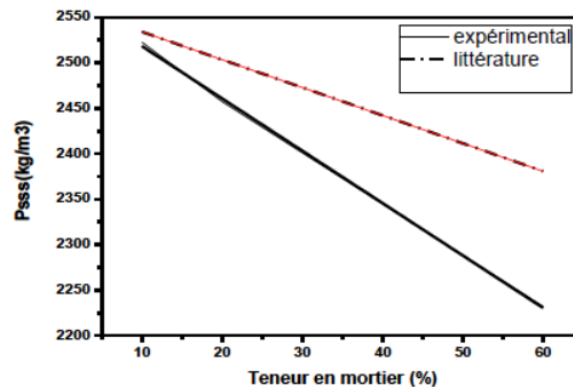


Figure I.7. Effet de teneur en mortier sur les valeurs de masses volumiques [17-18].

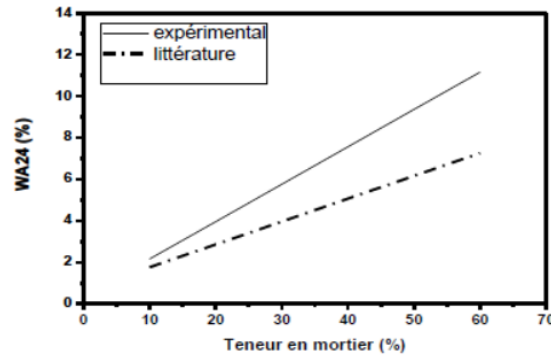


Figure I.8. Effet de la teneur en mortier sur le coefficient d'absorption [17-18]

I.4 Bétons de granulats recyclés

I.4.1 Formulation des bétons de granulats recyclés

Du fait de leurs propriétés spécifiques, les granulats recyclés présents dans les bétons affectent les propriétés du matériau à l'état frais et à l'état durci aussi.

Il faut noter que la composition des bétons à base de granulats recyclés dépend en même temps des normes réglementaires et aussi des considérations techniques relatives à la mise en œuvre et à l'usage des matériaux. Il faut noter que le remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés mène à un effet de seuil. Ainsi, au-delà de ce seuil, une diminution remarquable des résistances mécaniques est constatée [15, 28].

Aujourd'hui, la norme NF EN 206 a fixé des taux maximums de substitution. Ainsi, les sables recyclés peuvent être utilisés jusqu'à un taux maximal de 30% concernant la classe d'exposition XC0. Cependant, il est totalement interdit pour les autres classes d'exposition. En revanche, les gravillons recyclés sont autorisés à être utilisés jusqu'à un taux maximal de 60%. Bien entendu, ce taux dépend du type de gravillon ainsi que de la classe d'exposition. Notons que le seuil de remplacement doit être plus important quand l'ouvrage se trouve dans un milieu où il n'y a aucune menace de corrosion. Dans ce cas-là, il peut aller de 30 à 60%.

Par ailleurs, des études menées actuellement [29-30] ont pour objectif de suggérer des changements dans ces seuils. Il faut préciser que dans certains pays européens ces taux ne sont pas bien déterminés, cependant, la proportion de sable utilisé demeure assez réduite.

Rappelons qu'un nombre très limité de chercheurs ont préparé des bétons avec 100% de granulats recyclés (sable, gravillons et gravier). Notons aussi que les fines recyclées sont toujours considérées comme du sable. Ainsi, quelques auteurs ont réussi à faire une synthèse des pourcentages d'utilisation des granulats recyclés sans tenir compte des normes qui existent actuellement.

D'autre part, pour répondre aux exigences de résistance et de rhéologie des bétons, ces valeurs, ainsi que la teneur en ciment et le rapport eau/ciment (E/C) doivent être automatiquement prises en considération. Notons qu'il n'est pas généralement précisé si les compositions sont effectuées avec E_{eff}/C ou E_{totale}/C , et par conséquent, il devient alors difficile de comparer ces compositions. L'adjuvant est souvent utilisé dans le but d'avoir une mise en œuvre adéquate.

Par ailleurs, les taux d'utilisation dépendent généralement des caractéristiques des granulats recyclés. Les propriétés de ces granulats ne sont pas aussi bonnes que celles des granulats naturels en raison de la présence de mortier et d'impuretés résiduelles qui le plus souvent engendrent des diminutions de résistances mécaniques [29]. Ainsi, un béton initial de qualité médiocre tend à baisser la qualité du béton de granulats recyclés contenant ce béton concassé [30, 17, 28]. D'autre part, il faut noter que la résistance du béton parent n'est pas un paramètre déterminant vis-à-vis de la résistance à la compression des bétons à base de granulats recyclés [6, 31-32]. Par conséquent, on peut dire que l'utilisation, même partielle, des granulats recyclés va certainement changer les compositions des bétons préparés, et ce à cause de :

- La forte capacité d'absorption d'eau des granulats recyclés, on constate un accroissement de la demande en eau si l'ouvrabilité doit rester inchangée.
- La baisse des résistances mécaniques qui peut être équilibrée par une proportion de ciment plus importante ou une quantité d'eau plus faible (changement de l'ouvrabilité).

La conservation du gravier naturel peut aider à améliorer les propriétés mécaniques des bétons avec des taux de substitution très élevés [27, 33]. Néanmoins, cette méthode n'est pas totalement acceptée par la communauté scientifique. Cependant même cette approche est actuellement à l'origine d'une controverse [22] et particulièrement dans le cas des sables naturels roulés.

I.4.2 Influence de granulats recyclés sur la maniabilité du béton

L'utilisation du mortier primaire permet aux granulats recyclés de développer des caractéristiques particulières (squelette granulaire, morphologie et porosité). Ces dernières ont un impact sur les propriétés des bétons à l'état frais puisqu'elle modifie la compacité, la rugosité et l'absorption.

L'ouvrabilité des bétons préparés peut être influencée par plusieurs paramètres des granulats recyclés utilisés. Il faut noter que la maniabilité diminue lorsque le taux de substitution des granulats recyclés va au-delà de 50 % [33]. De plus, la demande en eau augmente nettement quand l'ouvrabilité du matériau préparé doit être élevée. Ainsi, Mukai et Kukichi ont montré que lorsque la quantité d'eau est augmentée de 5% dans les bétons incluant des graviers recyclés et des sables naturels, les propriétés du béton obtenu à l'état frais deviennent presque égales à celles des bétons à base de granulats naturels [34] ; Notons que pour les granulats recyclés à 100%, il est nécessaire d'avoir une quantité de 15 % d'eau. Ainsi Butler et al (2013) [35] recommandent d'augmenter la quantité d'eau totale de 3,1 à 9,4% dans les bétons à base de granulats recyclés en vue d'atteindre des ouvrabilités et des résistances mécaniques presque égales à celles des bétons contenant des granulats naturels. Ainsi, ils recommandent aussi une augmentation de la quantité de ciment allant de 9,0 à 14,8%.

I.4.3 Influence de la géométrie - morphologie et distribution granulaire

Les granulats recyclés obtenus par concassage ont une rugosité/texteure et une angularité importantes qui entraînent une augmentation de la demande en eau des granulats (absorption des grains et compacité du squelette) [36, 37]. L'utilisation de granulats recyclés, dont les dimensions sont supérieures à 4 mm et d'origines diverses, a révélé que l'augmentation de l'angularité et/ou de l'allongement du granulat conduit à la réduction de l'ouvrabilité des bétons sans qu'aucune corrélation entre la texture de la surface des granulats et l'ouvrabilité des bétons n'ait pu être établie [38]. La forme allongée et angulaire contribue à augmenter la surface de contact avec l'eau, et donc plus de pâte est nécessaire pour les lubrifier. Cependant, pour conserver les résistances mécaniques et l'ouvrabilité il est possible de garder le rapport (eau/ciment) constant par :

- L'utilisation d'adjuvants plastifiants/superplastifiants
- L'augmentation du volume de pâte [39], qui a pour effet d'augmenter l'eau présente dans le mélange.

Lorsque le sable recyclé est conservé dans le squelette granulaire du béton, sa présence induit automatiquement la présence des éléments fins, ce qui va influencer les propriétés des bétons à l'état frais et à l'état durcis au même titre que les fillers ou les additions. Le sable est le composant qui provoque la plus grande augmentation de la demande en eau dans le squelette granulaire [40, 41]. Cette augmentation est proportionnelle à l'absorption et à l'adsorption. Ces deux paramètres sont liés à la surface spécifique du sable [42].

Il faut savoir que la notion de fines recyclées n'est actuellement pas bien définie. Les chercheurs utilisent généralement ce terme pour désigner des fines ayant un diamètre maximum entre 63 et 500 μm , voire même jusqu'à 4 mm [4]. Ces désignations ne sont pas en accord avec celles recommandées par la norme NF 18 545 (Afnor, NF P 18-545, 2011). En outre, elles ont rarement été utilisées lors de la formulation des bétons de granulats recyclés dans les études précédemment réalisées.

D'autre part, le remplacement du ciment par des fines recyclées a un effet sur la rhéologie des mortiers d'après Nelfia et al (2013) [43]. La consistance qui résulte est plus plastique que celle des mortiers sans fines recyclées et pour tous les taux de substitution. Cette modification est plutôt attribuée à l'augmentation de la compacité qu'à la réactivité hydraulique.

Katz (2003) [8] a recommandé l'utilisation des fines mixtes (naturelles et recyclées) qui ont le rôle de lubrifiant pour avoir des affaissements presque identiques à ceux des bétons de granulats naturels.

I.4.4 Influence des granulats recyclés sur la porosité du béton

Les granulats recyclés ont une porosité élevée qui est responsable de leur forte capacité d'absorption. Afin de remédier à ce problème, tout en gardant la quantité d'eau efficace constante au sens de la norme, il est parfois conseillé d'élever la quantité d'eau totale [44- 49]. Ainsi, tous les résultats obtenus et synthétisés par les chercheurs permettent de tirer les conclusions suivantes.

Afin d'équilibrer la baisse d'ouvrabilité liée à l'absorption d'eau élevée, plusieurs moyens sont employés :

- Augmentation de la teneur en eau totale (absorption);
- Préhumidification des granulats à un taux et sur une durée variable. Par exemple, on peut les préhumidifier entre 70 et 80 % de leur coefficient d'absorption pendant une durée de 24 heures ;
- Utilisation d'adjuvants (plastifiant et superplastifiants) ;
- Augmentation de la teneur en ciment dans la formulation du béton tout en gardant le rapport (Eau/Ciment) constant.

Les procédures adoptées lors des différentes études comportant une préhumidification des granulats. Cette dernière a particulièrement pour objectif de contrôler l'ouvrabilité initiale des matériaux à l'état frais. Ainsi, Padmini et al. (2009) ont proposé de préhumidifier les granulats recyclés pendant 10 minutes avant de les utiliser [50]. Quant à Gonzalez (2011), il recommande de les préhumidifier à l'aide de 70% de leur eau de saturation [51] Aussi, Etxeberria (2007) propose de répandre 80% d'eau de saturation sur les granulats une journée avant le mélange [52]. Similairement, Yang (2011) a noté une diminution d'ouvrabilité de 27% quand les granulats recyclés préhumidifiés sont substitués aux granulats naturels grossiers. Par ailleurs, Meftah et al. (2013), Meftah et Arabi (2011) et Poon et al. (2004) [17, 18, 53] ont eux aussi examiné l'influence du taux de préhumidification sur l'ouvrabilité des bétons à des taux de remplacement variés. Les résultats obtenus en termes de maniabilité des pâtes préparées sont rassemblées dans le Tableau I.7 le Tableau I.7.

Tableau I.7. Influence du taux de préhumidification sur l’ouvrabilité initiale en fonction des taux de substitutions [17, 18, 53]

Auteurs	Proportions GN/GR	Etat des gravillons/gravier	Eau de gâchage (kg/m ³)	Ciment (kg/m ³)	Sable (kg/m ³)	Gravillons/gravier naturels		Gravillons/gravier recyclés		Affaissement à T=0
						10 mm	20 mm	10 mm	20 mm	
(Poon et al , 2004)	100 % de GN	Humide (teneur en eau)	214	353	667	362	724			110
		Sèche à l’étuve	221	353	667	360	720			105
		Saturé surface séché	209	353	666	364	729			100
	80 % de GN et 20 % de GR	Humide (teneur en eau)	217	353	660	287	574	70	139	120
		Sèche à l’étuve	230	353	660	284	569	67	135	90
		Saturé surface séché	206	353	661	288	576	72	144	105
	50 % de GN et 50 % de GR	Humide (teneur en eau)	229	353	647	176	351	170	343	130
		Sèche à l’étuve	247	353	647	175	349	164	332	100
		Saturé surface séché	207	353	649	177	354	177	354	110
	100 % de GR	Humide (teneur en eau)	241	353	625	-	-	330	663	145
		Sèche à l’étuve	271	353	625	-	-	317	642	125
		Saturé surface séché	209	353	625	-	-	342	684	100
(Mefteh et al 2013) & (Mefteh et Arabi, 2011)	0 % de Gravillons et graviers recyclés	Sec	189 (Eeff)	350	585,67	256.10	955.34	-	-	90
		Prémouillés								90
		Saturés								90
	20 % de Gravillons et graviers recyclés	Sec				70				
		Prémouillés				90				
		Saturés				150				
	40 % de Gravillons et graviers recyclés	Sec				60				
		Prémouillés				120				
		Saturés				160				
	60 % de Gravillons et graviers recyclés	Sec				30				
		Prémouillés				100				
		Saturés				180				
	80 % de Gravillons et graviers recyclés	Sec				20				
		Prémouillés				140				
		Saturés				150				
	100 % de Gravillons et graviers recyclés	Sec				15				
		Prémouillés				150				
		Saturés				140				

I.4.5 Influence des granulats recyclés sur masses volumiques et teneur en air

La masse volumique à l’état frais pour les bétons recyclés est plus faible que celle des bétons classiques due à la présence de mortier primaire durci [15, 4, 12, 17, 18, 36, 54-56]. Cette valeur est comprise dans l’intervalle définie par Hansen et Narud [44] : de 2000 à 2250 kg/m³.

Pour les masses volumiques des bétons de granulats recyclés dans leur état frais. Par exemple celle mesurée par Katz en 2003 est d’environ 2400 kg/m³ pour un béton de granulats naturels et d’environ 2150 kg/m³ pour un béton de granulats recyclés [17, 18, 51]. Et la masse volumique

du béton de granulats recyclés trouvée par Topçu et al en 1997 est de 2235 kg/m³ comparativement à celle des bétons de granulats naturels qui est de 2370 kg/m³ [33].

D'autres chercheurs ont confirmé que les masses volumiques des bétons de granulats recyclés sont plus petites que celles des bétons de granulats naturels à cause des faibles masses volumiques des granulats recyclés [32, 33]. Signalons, qu'en l'année 2013 Butler à mentionner la porosité élevée des pâtes des granulats recyclés [35].

Similairement, Topçu et Sengel (2004) [45] ont mené des tests sur béton tout en variant le pourcentage de granulats recyclés, de 30%, 50%, 70% et 100% en masse. Les résultats obtenus ont montré que les masses volumiques des bétons diminuent lorsque la quantité de granulats recyclés augmente.

D'autre part, il a été trouvé que la quantité d'air dans les bétons de granulats recyclés est un peu plus grande que celle des bétons classiques. Ceci est probablement dû à la morphologie et la rugosité des granulats recyclés. En effet, ces derniers ne permettent pas aux bulles d'air de s'extraire facilement lors des vibrations.

Ainsi, l'analyse des propriétés des bétons à granulats recyclés à l'état frais permet de conclure que les effets de la distribution granulaire non continue, la présence d'éléments fins, la morphologie anguleuse avec une surface spécifique élevée, la texture plus rugueuse sont similaires aux effets constatés sur les granulats naturels ayant ces mêmes propriétés.

I.4.6 Influence des granulats recyclés sur la résistance mécanique du béton

La résistance mécanique est considérée comme l'une des propriétés des bétons de granulats recyclés investiguées. Elle est ensuite comparée avec celle des bétons de granulats naturels. En outre, la résistance à la compression et la résistance à la flexion des bétons de granulats de béton et de brique recyclés sont toujours plus petites que celles des bétons de granulats naturels. La différence peut aller de 5 jusqu'à 40%. A titre d'exemple, des études réalisées par Zhao (2015) ont rapporté que cette différence peut être entre 27 % et 33% pour les mortiers ; elle peut être fonction de la nature des sables utilisés [4, 25]. Cependant, l'adhérence entre la pâte et les granulats est de moindre qualité

D'autre part, il a été montré que la résistance à la compression des bétons de granulats recyclés est fonction des paramètres donnés ci-dessous :

- Le taux de substitution avec un rapport eau sur ciment constant. Cette résistance diminue avec le taux de substitution. Notons aussi que la résistance à la compression diminue légèrement pour un taux de remplacement des graviers plus petit ou égal à 25% et pour celui des sables plus petit que 30%. Cette baisse de la résistance à la compression est attribuée à la grande porosité des bétons de granulats recyclés et aussi à la mauvaise interface entre les granulats et le liant.
- Les paramètres de formulation, et en particulier le rapport Eau/Ciment.
- Les conditions de cure, puisque le béton à granulats recyclés conservé à l'air, après une cure humide partielle, présente une résistance plus faible que celle des bétons conservés en permanence dans un milieu humide.
- La nature du ciment.
- La nature du béton de parent produisant les granulats recyclés. Le module d'élasticité est plus important si les granulats sont issus de bétons à haute résistance à la compression. Par ailleurs, une baisse de la quantité de mortier primaire réduit l'effet négatif sur les résistances mécaniques. Par conséquent, les granulats ayant une teneur en mortier primaire plus petite que 44% peuvent être utilisés pour fabriquer des bétons armés de haute qualité, c'est-à-dire présentant de meilleures résistances mécaniques [57-59], [50].
- Les conditions de malaxage, particulièrement pour les résistances au jeune âge. Signalons que la méthode du mélange en deux étapes (Two-Stage Mixing Approach - TSMA) donne des résistances à la compression plus grandes [60].
- La nature des additions minérales possibles [61, 62] .
- En outre, il faut souligner que la résistance à la compression des bétons dépend également de celle des granulats qui normalement ont une résistance élevée (Los Angeles) avec un module d'élasticité faible, et donc un module d'élasticité voisin de celui de la pâte de ciment.

D'autre part, Katz a examiné le comportement des bétons de granulats provenant des bétons de concassage d'âge varié (1 jour, 3 jours et 28 jours), à l'état durci. Il est arrivé à la conclusion

que l'âge des granulats recyclés n'influe pas beaucoup sur le comportement des bétons de granulats recyclés.

En outre, il s'est avéré que la liaison granulat-pâte de ciment tient une place essentielle dans le développement des résistances mécaniques. Cependant, les chercheurs ne sont pas tous d'accord quant à la qualité des bétons de granulats recyclés (BGR). Ainsi, certains suggèrent que la forme des granulats a une influence surtout sur la résistance à la flexion des bétons en raison de la liaison entre les granulats et la nouvelle pâte de mortier qui a une adhérence pas toujours réelle [61-65]. Il faut noter que la présence du mortier rend la région de l'interface entre le nouveau mortier et l'ancien mortier fragile, ce qui engendre une baisse dans les caractéristiques mécaniques des bétons de granulats recyclés. Quant à Braymand (2014), il a réussi à identifier de visu une bonne liaison pâte-granulat dans les bétons préparés à 100% de granulats recyclés qui ont des propriétés mécaniques égales à celles des granulats naturels [66-67]. Dans le même contexte, Kaplan a mené une étude sur 13 séries de granulats recyclés différents, de taille supérieure à 4 mm; il a trouvé que la texture externe du granulat est un facteur qui a un impact positif sur la résistance mécanique. Notons qu'une surface rugueuse amplifie la force d'adhérence entre la matrice et le granulat. En plus, une surface poreuse absorbe l'eau, ce qui va certainement renforcer la liaison pâte-granulat.

Par conséquent, on peut dire que la qualité du granulat recyclé a une influence sur la résistance mécanique. Néanmoins, lorsque le rapport (eau totale/ciment) est gardé constant et quand la diminution de l'ouvrabilité causée par les granulats recyclés est équilibrée à l'aide d'additions ou d'adjuvants, alors même si on augmente le taux de granulats recyclés, les résistances mécaniques ne changeront de façon considérable. Rappelons que Walker et Bloem (1960) ont indiqué que la résistance mécanique diminue quand la dimension maximale des granulats augmente, lorsque le rapport (Eau/Ciment) constant, surtout pour des granulats de taille supérieure à 38 mm. Ce résultat peut être attribué à deux paramètres qui sont la zone d'interface granulat-pâte et les faibles adhérences entre les granulats et la pâte.

D'autre part, Rasheeduzzafar et al [69]. Ont utilisé un lot de 21 bétons de granulats recyclés et ont réussi à prouver que pour un rapport (E/C) = 0.35, ce type de béton développe des résistances inférieures de 30% par rapport à celle des bétons de granulats naturels. Ces dernières sont presque égales quand ce rapport est égal à 0,7. Concernant Rao et al., ils ont suggéré que les résistances mécaniques des bétons à base de granulats recyclés et celles des bétons à base de granulats naturels sont comparables. Par conséquent, le rapport (E/C) doit être plus grand

que 0,55. Aussi, pour un rapport $(E/C) = 0.4$, une différence de résistance égale à 25 % est constatée entre les bétons de granulats recyclés et ceux de granulats naturels [68].

Cependant, il faut préciser qu'il n'est pas toujours facile d'expliquer les résultats relatifs à l'influence du dosage en eau trouvés dans la bibliographie. En outre, le concept d'eau efficace ou totale est rarement spécifié. Ainsi, les résultats de Hansen (1986) indiquent que l'absorption de l'eau par les granulats recyclés augmente avec la résistance du béton parent. En revanche, elle diminue lorsque la taille des granulats augmente. C'est pour cette raison que lorsque les granulats recyclés ont une forte absorption pour l'eau, la quantité d'eau de malaxage doit être réajustée de manière à avoir l'ouvrabilité et la résistance souhaitées.

Par ailleurs, les impuretés peuvent aussi avoir un impact considérable sur les caractéristiques mécaniques des bétons contenant des granulats recyclés [27, 36, 44] si les granulats recyclés ne sont pas totalement inertes, le comportement des bétons à l'état frais et à l'état durci est totalement affecté.

I.4.7 Influence des granulats recyclés sur le retrait du béton

Il a été montré que différents phénomènes de retrait engendrés par la prise et le durcissement des matériaux cimentaires doivent être scrupuleusement contrôlés. On distingue deux types de retrait :

- Le retrait plastique qui est associé aux conditions atmosphériques, à la cure et au ressuage. Il faut noter que l'absorption d'eau par les granulats ainsi que la grande quantité de fines diminue le ressuage mais entraîne un risque de retrait plastique plus grand si la cure n'est pas suffisante.
- Le retrait endogène est associé au dessèchement ; on le trouve particulièrement dans des bétons avec un rapport Eau/Ciment faible.

Des chercheurs ont montré que le phénomène de retrait est plus important dans les bétons à base de granulats recyclés que dans les bétons ordinaires. Ainsi, les résultats et conclusions trouvés par Québaud [54] et Whiting [69] sont clairement illustrés dans la Figure I.9.

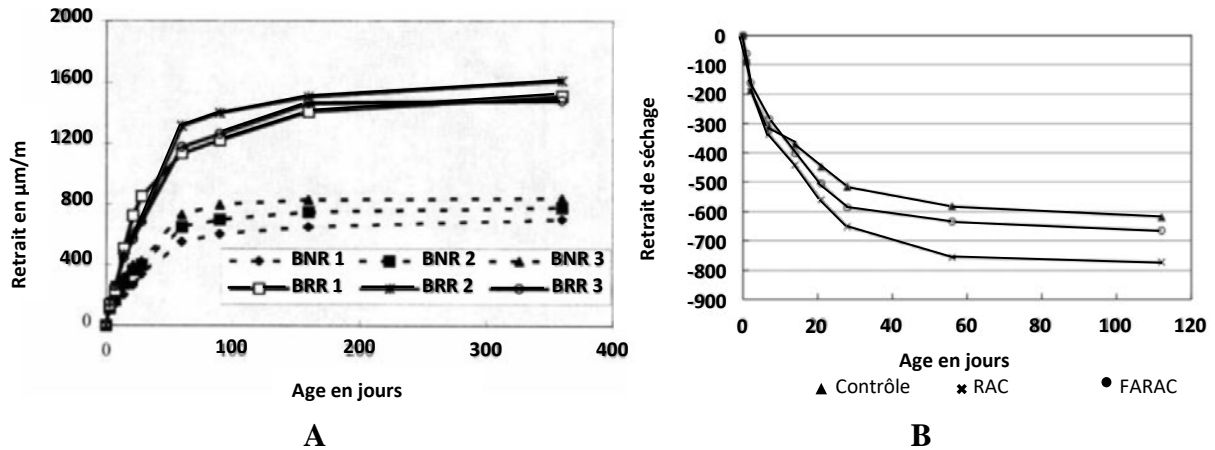


Figure I.9. Mesure de retrait effectuée par Québaud [54, 69] (B)

Ainsi, il a été confirmé que les bétons de granulats recyclés présentent un retrait plus grand que celui des bétons de granulats naturels ; il peut aller de 200 et 400 $\mu\text{m}/\text{m}$. Ce résultat peut être expliqué par la libération de l'eau précédemment absorbée par les granulats recyclés dans le béton pendant le malaxage ; il peut aussi être attribué au phénomène d'évaporation. Il faut savoir aussi que la présence des éléments fins encourage le retrait des bétons de granulats recyclés. Quant au retrait endogène, le rapport (E/C) faible dans les bétons de granulats recyclés devrait en théorie favoriser ce type de retrait. Il faut aussi retenir que les granulats recyclés, à cause de leur porosité, possèdent une importante réserve d'eau qui peut remplacer l'eau dans les pores de la matrice. Par suite, le retrait endogène dans ces bétons est faible. Aussi, l'utilisation de granulats recyclés pourrait constituer une bonne solution pour diminuer le retrait endogène dans les BHP.

Cependant, les résultats relatifs à la variation du retrait en fonction du temps ne sont pas suffisants pour se prononcer sur l'origine de l'eau qui s'évapore après migration, pendant le durcissement du béton, et engendre ainsi le retrait du béton. Ce qui nous mène à poser la question suivante : est-ce que cette eau provient de la pâte ou bien des granulats ?.

I.4.8 Amélioration des propriétés des bétons à granulats recyclés

I.4.8.1 Emploi des adjuvants : utilisation de superplastifiants

Dans ce contexte, Pereira et al. ont indiqué que l'utilisation d'un superplastifiant (à base de lignosulfonates et polycarboxylates modifiés) permet de préparer un béton de granulats et fines recyclés et un béton de granulats naturels ayant un écart de résistance inférieur à 5%, comme

cela est montré sur la figure I.10 [70-71]. Cependant, autres chercheurs ont suggéré que l'utilisation des adjuvants augmente les propriétés mécaniques des bétons de granulats recyclés pour les rapprocher le plus possible de celles des bétons de granulats naturels [66-67] [46, 72-74].

Par ailleurs, De Juan a déclaré que les superplastifiants augmentent l'ouvrabilité des bétons recyclés [75], Ces adjuvants aident à avoir une ouvrabilité constante et à limiter la quantité d'eau à ajouter, ce qui va donc réduire la porosité [12].

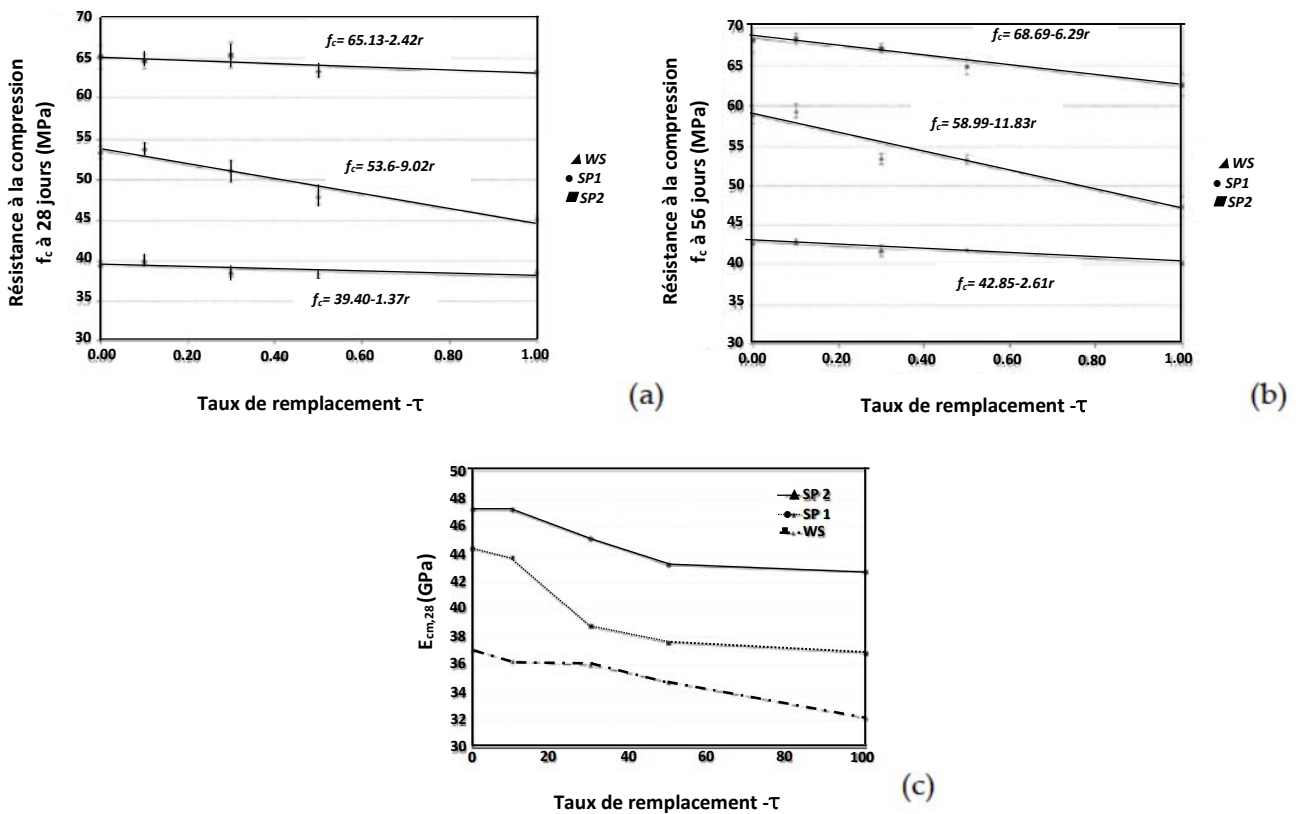


Figure I.10. Influence de l'emploi des super-plastifiants sur les propriétés mécaniques des bétons à granulats recyclés selon Pereira et al [71].

SP1 : Superplastifiant à base de lignosulfonates,

SP2 : Superplastifiants à base de polycarboxylates modifiés,

WS : Béton préparé sans adjuvant,

(a) Résistances mécaniques versus rapport (FN/FR) à 28 jours,

(b) Résistances mécaniques versus rapport (FN/FR) à 56 jours,

(c) Module d'élasticité versus rapport (FN/FR) à 28 jours.

Ainsi, des recherches ont indiqué que les superplastifiants ne sont pas tous efficaces dépendait. Les meilleurs superplastifiants pour la fluidification des mortiers à base de sables recyclés sont ceux contenant des copolymères polycarboxylates ou de l'éther polycarboxylique modifié. Ils deviennent plus efficaces lorsqu'ils agissent sur les fines de sable recyclé. Par suite, l'impact des adjuvants sur le comportement rhéologique des coulis de fines recyclées (inférieures à 500 μm) à l'état frais vient corroborer les résultats rapportés dans des études précédemment menées sur les mortiers à base de sable recyclé [21]. Par conséquent, il est possible de garder les fines et en même temps utiliser des superplastifiants car ces fines ont un effet bénéfique sur les propriétés mécaniques des bétons.

I.4.8.2 Adaptation des méthodes de formulation

Corinaldesi et al (2009) ont réussi à préparer un béton à base de granulats recyclés sans fines recyclées, en présence de cendres volantes et fumées de silice, en se basant sur la méthode de Bolomey. Un affaissement initial entre 150 et 165 mm a été constaté [76]. Similairement, Evangelista and de Brito (2007) ont appliqué la procédure de Faury et ont observé un affaissement de $(80 \pm 10 \text{ mm})$. Dans ce cas-là, ils recommandent le remplacement de 30% de sable naturel par du sable recyclé, en présence des cendres volantes et des gravillons naturels. Dans ces conditions-là, les résistances mécaniques du béton de granulats recyclés sont presque identiques à celles d'un béton de granulats naturels [14]. D'autre part, Braymand (2010) a utilisé la méthode Dreux Gorisse, avec un superplastifiant mais sans ajout d'eau d'absorption. Il a alors préparé un béton de granulats recyclés (100%) qui a présenté des propriétés mécaniques identiques à celles du béton de granulats naturels.

Par ailleurs, Abbas et al. (2009) [77] ont adopté une technique de formulation toute nouvelle, i.e. Volume de Mortier Equivalent (VME), qui considère que le volume de pâte de mortier des granulats est identique à celui du mortier de béton de granulats recyclés. Dans ce cas, le volume global de mortier comprend le mortier accolé et le nouveau mortier. Il a été trouvé que les bétons à base de granulats recyclés, préparé avec la méthode VME présentent des résistances mécaniques et masses volumiques, à l'état frais et à l'état durci, plus grandes que celles des bétons de granulats recyclés préparés avec les techniques classiques. Aussi, ces bétons ont une ouvrabilité proche de celles des bétons de granulats naturels [77]. Par ailleurs, Dao (2012) a suggéré qu'il est bien possible d'appliquer la méthode De Larrard. Cependant, c'est une méthode qui requiert de bien connaître les compacités individuelles des granulats impliqués dans la formulation des bétons [12].

I.5. ANALYSE DE DURABILITÉ

Un ouvrage doit résister au cours du temps aux diverses agressions ou sollicitations (physiques, mécaniques, chimiques...) c'est-à-dire aux charges auxquelles il est soumis, ainsi qu'aux actions diverses telles que le vent, la pluie, le froid, la chaleur, le milieu ambiant... tout en conservant son esthétisme. Il doit satisfaire, avec un niveau constant, les besoins des utilisateurs au cours de sa durée d'utilisation.

La durabilité est une propriété particulièrement intéressante ainsi que les propriétés mécaniques des matériaux en béton. Ceci est largement dû au fait qu'il est difficile pour l'agent agressifs de pénétrer dans le réseau poreux du béton [78].

La durabilité des matériaux de construction est un enjeu très important, qui dépend largement de leur exposition aux différentes conditions climatiques. L'étude du comportement sous contrainte d'un seul matériau fournit une bonne base pour évaluer la durée de vie des routes, des ponts, des tunnels et des bâtiments civils en général.

Les recherches sur les BHP montrent que ces bétons ont une durabilité « potentielle » élevée, notamment vis-à-vis des agents agressifs externes (la pénétration du chlorure et de la carbonisation est limitée à des zones très superficielles) et des agents agressifs internes. La meilleure performance du BHP fournit un argument solide à la prescription du BHP pour assurer une durée de vie plus longue des structures en béton armé (ou précontraint) et/ou éviter de nombreuses pathologies (réaction alcaline, lixiviation de liquide chimiquement corrosif, etc.) [79].

La durabilité des BHP résulte de leur forte compacité et de leur très faible porosité extrême. Cette dernière et la perméabilité de ces bétons améliorent par ailleurs la durabilité. Il en est de même pour la résistance aux agressions chimiques comme celles que peuvent subir les bétons en milieu marin ou en milieu agressif et la résistance au gel. La résistance aux agents agressifs (ions chlore, sulfates, eau de mer, acides, ...), le faible risque de corrosion des armatures, la forte résistance au cycle gel-dégel et à l'écaillage ainsi que la faible perméabilité sont autant de propriétés qui qualifient ce béton comme étant une réponse favorable aux exigences de durabilité.

Pour obtenir un béton durable, dans la plupart des cas, il suffit de produire un béton avec une teneur en ciment suffisante et une très grande compacité. Le respect d'exigences

complémentaires, notamment le choix du ciment, est nécessaire pour maîtriser des conditions plus sévères, comme le stockage en milieu chimique corrosif (eau de mer, sélénite, etc.), qui peut s'accompagner d'un climat chaud [80].

Évaluer la durabilité « potentielle » du béton, il est nécessaire de connaître les mécanismes pouvant conduire à sa dégradation et la résistance à la dégradation du matériau.

La durabilité est l'une des préoccupations essentielles dans la construction et l'entretien des ouvrages d'art. Parmi les maladies structurelles, la corrosion des armatures est la principale cause de détérioration des structures renforcées et la plus importante en termes d'entretien, d'usure par impact, de fissuration et de gonflement...etc (voir figure 1.11).

En particulier, la production de béton à hautes performances implique une combinaison de béton ultra-résistant et de sous-produits industriels ainsi que des mélanges tels que des silices ou des cendres volantes. Cela permet au BHP d'être utilisé comme matériau structural au-delà de ses limites naturelles, ce qui rend très difficile la prédiction de sa durée de vie.

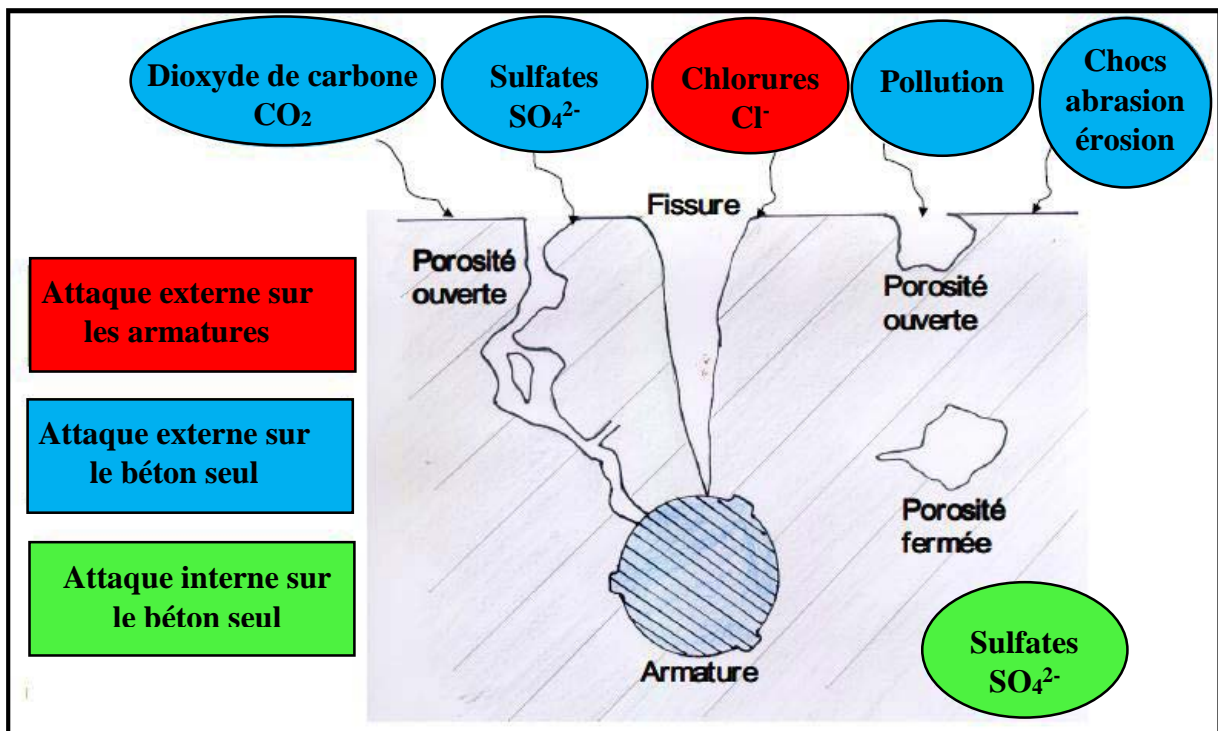


Figure I.11. Principales agressions et attaques du béton [81].

I.5.1. FACTEURS AFFECTANT LA DURABILITÉ DU BÉTON

Les propriétés du béton ont une influence directe sur la durabilité de l'ouvrage. Pour fabriquer un ouvrage durable, il faut donc utiliser un matériau durable.

Les caractéristiques du béton qui contrôlent sa durabilité peuvent être regroupées en :

- Le choix des matériaux ;
- La formulation du béton ;
- La cure du béton ;
- Facteurs liés à la mise en œuvre de l'ouvrage ;
- Facteurs liés à la conception de l'ouvrage ;
- Facteurs climatiques et environnementaux.

I.5.2. PHÉNOMÈNES INFLUENTS SUR LA DURABILITÉ

Les principaux processus chimiques à la base des dégradations du béton sont généralement regroupés en trois catégories.

- L'hydrolyse ou la lixiviation (dissolution) des hydrates ;
- Les échanges ioniques entre les hydrates et le milieu agressif ;
- La formation des nouveaux produits (généralement expansifs).

Compte tenu de la diversité des types d'attaques chimiques d'une part et de la similitude des dégradations d'autre part, il est souvent difficile d'établir un diagnostic simple et clair. Mais malgré ces similitudes, on peut encore distinguer les attaques chimiques en fonction des manifestations et des caractéristiques de chaque attaque (Figure I.12) : Par exemple, la corrosion est provoquée par la carbonisation ou la pénétration des ions chlorure. Dans la plupart des cas, on peut distinguer les deux par éclatement : s'il est local, on parle de chlorure, mais s'il est général, c'est de la carbonatation. Même d'autres attaques, telles que les réactions alcalis-agrégats (dus aux agrégats réactifs), les attaques acides, sulfatées et d'eau de mer peuvent provoquer des fissures et des gonflements, mais chaque attaque a ses conséquences et ses manifestations. Par conséquent, comprendre l'environnement ou l'environnement dans lequel se trouve la structure permet de comprendre l'attaque.

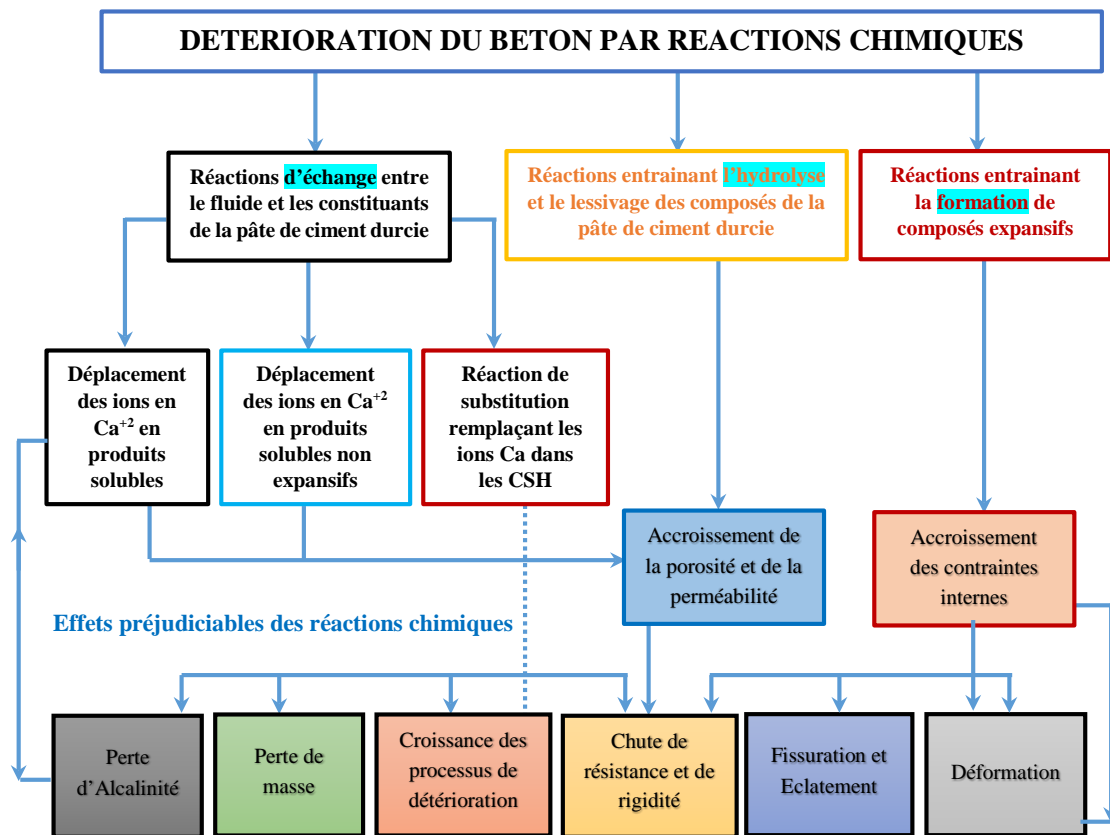


Figure I.12. Processus de détérioration du béton par les attaques chimiques [80]

I.5.3 Effet de l'eau de mer sur les bétons à base de déchet du briquet et du béton

Les matériaux à base de ciment qui sont exposés à l'eau de mer sont soumis à divers types d'attaques physiques et chimiques. L'attaque chimique est principalement attribuée à la présence de chlorures et des sulfates [82].

L'expérience montre que l'attaque chimique des matériaux cimentaires lorsqu'ils sont exposés à l'eau de mer est plus complexe que ceux qui sont exposés aux sulfate de sodium, à cause du nombre important de sels dissous qui sont présents. L'eau de mer contient des chlorures de sodium, chlorures de magnésium, des bicarbonates de potassium, et surtout du magnésium, ainsi que les sulfates de calcium et du gypse. D'une part la combinaison des sulfates de l'eau de mer avec l'hydroxyde de calcium (CH) (produit par l'hydratation du ciment) et d'alumine présent dans le ciment conduit à la formation d'ettringite. La présence d'ions de magnésium

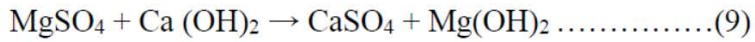
d'autre part dans la solution entraîne également la formation de composés nuisibles supplémentaires [82].

L'action chimique de l'eau de mer sur le béton provient du fait qu'elle renferme un certain nombre de sels dissous. La salinité totale d'une eau de mer est habituellement de 3.5%. Dans toutes les mers, la proportion relative des différents sels est pratiquement constante. Par exemple, dans l'océan Atlantique, la concentration ionique est la suivante : chlore 2%, sulfate 0.28%, sodium 1.11%, magnésium 0.14%, calcium 0.05% et potassium 0.04%. L'eau de mer contient aussi du CO₂ dissout. Les zones côtières étroites en climat chaud, où l'évaporation est grande, peuvent être très salées. La mer morte constitue un cas extrême : avec une salinité de 31.5%, c'est à dire presque 9 fois celle des océans, mais sa concentration en sulfate est plus faible que dans les océans [83].

La présence d'une grande quantité de sulfate dans l'eau de mer provoque une attaque par les sulfates. En effet, les réactions entre les ions sulfate et à la fois le C3A et les C-S-H se développent, entraînant la formation d'étringite. Cette réaction n'est pas associée à une expansion destructrice, car l'étringite, tout comme le gypse, sont solubles en présence de chlorure et peuvent être lessivés par l'eau de mer [83]. Il en résulte que l'emploi d'un ciment résistant aux sulfates dans un béton exposé à l'eau de mer n'est pas essentiel, mais une limite de 8% de C3A est recommandée lorsque la teneur en SO₃ est inférieure à 3% [84]. L'excès de SO₃ qui semble conduire à une expansion tardive du béton. Les mêmes essais [84] ont confirmé que le C4AF contribue aussi à la formation d'étringite, de sorte que les exigences de la norme ASTM C 150-94, qui limite à 25% la quantité de 2C3A + C4AF dans le clinker, doivent être respectées.

Les commentaires et exigences précédentes s'appliquent au béton constamment immergé dans l'eau, ce qui représente des conditions d'exposition relativement peu sévères [84], car un état stable de saturation et de concentration en sels est atteint de sorte que la diffusion des ions est extrêmement réduite. Les cycles alternés de séchage et de mouillage constituent une condition bien plus sévère. Les sels peuvent s'accumuler à l'intérieur du béton par suite de pénétration de l'eau de mer qui s'évapore sous forme d'eau pure laissant les sels précipiter. Il est donné que l'effet le plus néfaste de l'eau de mer sur les structures en béton provient de l'action des chlorures sur les armatures d'acier.

L'action chimique de l'eau de mer sur le béton est la suivante. Les ions magnésium contenus dans l'eau de mer se substituent aux ions calcium comme suit :



Le Mg(OH)₂ formé, appelé brucite, précipite dans les pores à la surface du béton en constituant une couche de surface protectrice qui empêche la réaction de se poursuivre. On peut aussi trouver un peu de CaCO₃ précipité sous forme d'aragonite, dû à la réaction du Ca(OH)₂ avec le CO₂. Les dépôts précipités, habituellement de 20 à 50 µm d'épaisseur, se forment rapidement [85]. Ils ont été observés dans un certain nombre de structures marines complètement immergées. Etant donné sa nature qui tend à colmater les pores du béton, la formation de brucite s'arrête d'elle-même.

Il a été montré que la perte de résistance est beaucoup plus importante que l'expansion pour les mortiers exposés à l'eau de mer [86, 87], qui est attribué à la décomposition du gel C-S-H.

L'utilisation de la fumé de silice, en substitution partielle du ciment, est en général favorable à l'amélioration de la résistance du mortier ou béton à l'attaque des sulfates. L'effet chimique principal de la fumé de silice lorsqu'il est présent dans le mortier, est l'élimination de l'hydroxyde de calcium conséquence de l'hydratation du ciment, ce qui va empêcher la formation d'ettringite nuisible à la matrice cimentaire [88].

O'Farrell et al. [82], utilisent quatre différents types de brique (B, D, L, et P) en substitution partielle du ciment (0%, 10%, 20% et 30%) et chaque type de brique a été testé par l'évaluation de l'expansion ainsi que la perte de résistance des mortiers immergés dans de l'eau de mer jusqu'à une période de 560 jours (Figure I.13).

Ils constatent que les déchets de brique ont une grande influence sur l'expansion des mortiers exposés à l'eau de mer. L'expansion est réduite par rapport au mortier témoin pour les différents types de déchets de brique et plus le taux de substitution du ciment par la brique augmente et plus l'expansion diminue ; sauf pour la brique de type D ou c'est l'inverse qui s'est produit pour les taux de substitution de 20% et 30%. Par contre, le taux de 10% semble donner de bons résultats. Cela a été expliqué par la composition de la brique de type D, qui semble favoriser l'expansion, et par conséquent réduit la durabilité.

En ce qui concerne l'augmentation du poids des éprouvettes, les résultats sont similaires par rapport à ceux de l'expansion (Figure I.14).

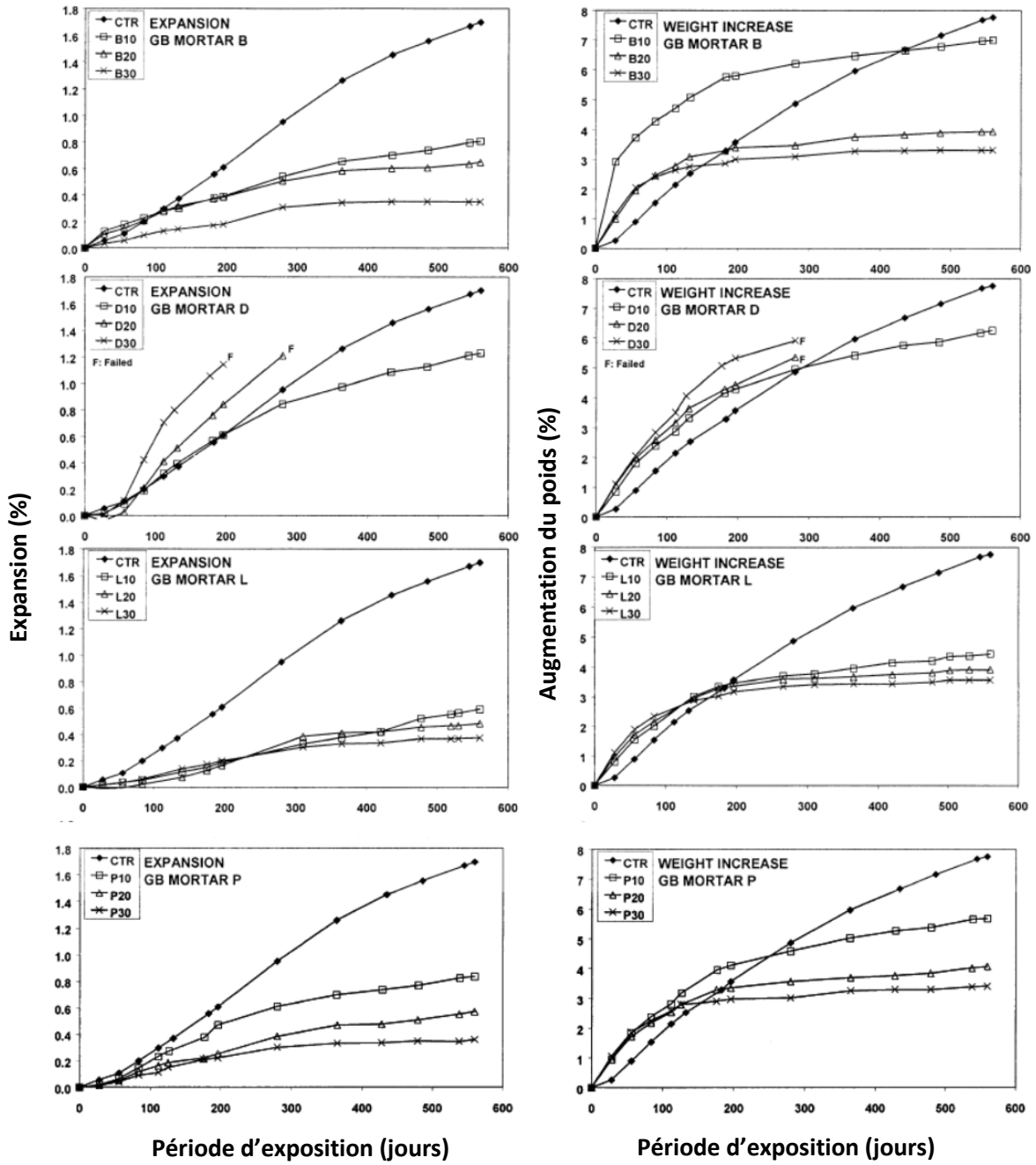


Figure I.13. Expansion et variation du poids des mortiers à base de brique [82].

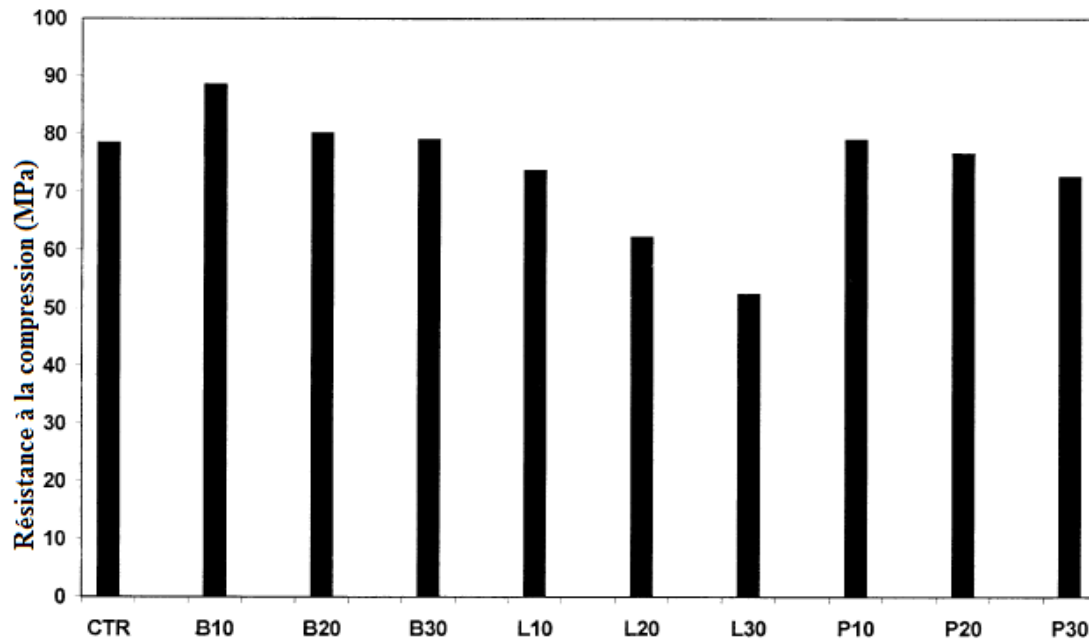
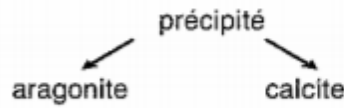
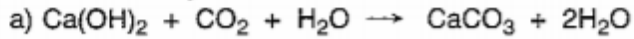


Figure I.14. Résistance à la compression des bétons à base de brique, exposé à l'eau de mer pendant une durée de 560 jours [82].

L'effet de l'eau de mer sur la résistance à la compression des bétons est très sévère. Il existe une augmentation de la perte de résistance en fonction de l'augmentation du taux de substitution du ciment par la brique.

Il a été signalé aussi qu'un faible taux d'expansion ne correspond pas forcément à une meilleure résistance à la compression. Ceci est clairement observé pour le L20 et le L30 bien que ces dernières ont abouti à la plus petite expansion, ils n'ont pas produit la plus faible chute de résistance [82].

1) Action du dioxyde de carbone



PROTECTION

2) Action des sulfates

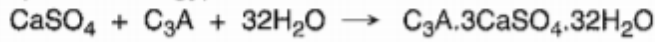


LIXIVIATION

EXPANSION

PROTECTION

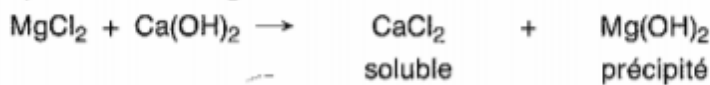
c) Action du gypse secondaire



ettringite

EXPANSION

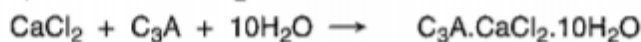
3) Action des chlorures



soluble
LIXIVIATION

précipité
PROTECTION

e) Action de CaCl_2



chloroaluminate

EXPANSION

↓ SO_3



ettringite

EXPANSION

↓ $\text{CO}_2 + \text{SiO}_2$



thaumasite

EXPANSION

Figure I.15. Détérioration du béton par eau de mer [89].

I.5.4 Effet des déchets de brique et de béton sur la porosité

Kenai et al. [90] a étudié la pénétration d'eau en fonction du type de béton. La pénétration d'eau du béton recyclé augmente à mesure que le pourcentage de remplacement dans les granulats recyclés augmente. Le béton recyclé à base d'agrégats de briques concassées est plus perméable que les autres bétons recyclés, et sa perméabilité à l'eau peut atteindre le double de celle du béton de référence. La perméabilité à l'eau du béton recyclé est fortement affectée par la nature et le pourcentage de granulats recyclés (voir figure I. 16).

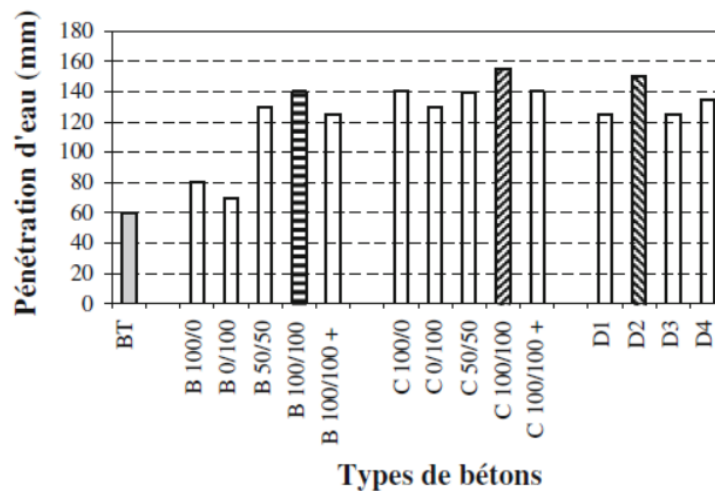


Figure I. 16. Variation de la pénétration d'eau des bétons recyclés [90].

Gonçalves et al. [91] ont étudié l'effet de l'argile calcinée (déchets de brique et métakaolin) sur la porosité des mortiers. La brique a été fournie par une entreprise locale au Brésil ainsi que deux types de métakaolin à différents taux de substitution de ciment qui sont : 0%, 10%, 20%, 30% et 40%.

Il a été montré en premier lieu que les différents taux de substitution du ciment par les déchets de brique ne provoquent aucun changement de densité et de compacité des mortiers (Figure I.17).

Cela a été expliqué par la similarité des distributions des pores entre les mortiers à base de brique et les mortiers témoins.

La figure I.18 montre que les DB provoquent une augmentation de la porosité totale par rapport aux mortiers témoins. Le DB10 semble donner les meilleurs résultats et la différence par rapport aux mortiers témoins n'est pas importante.

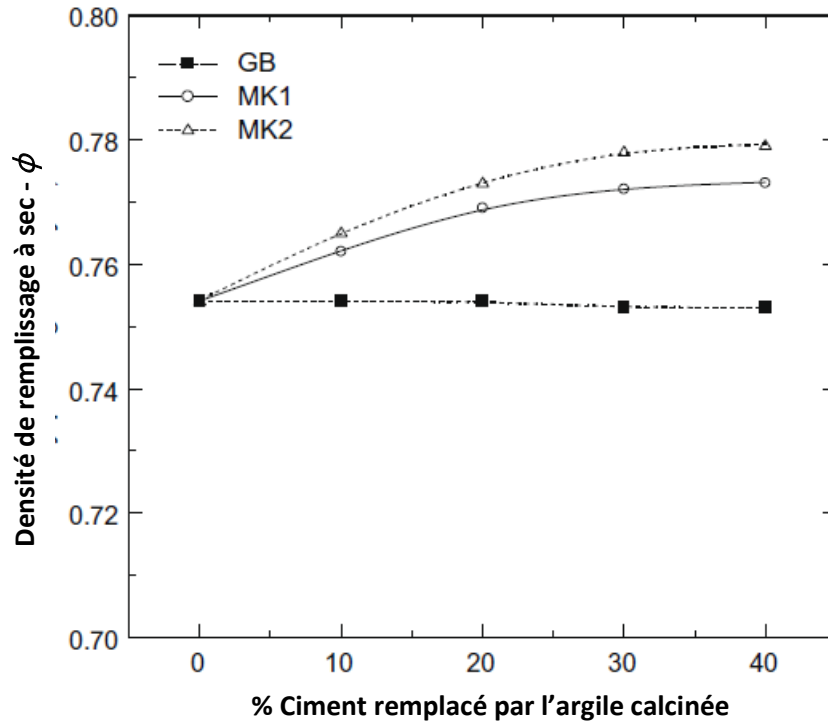


Figure I.17. Influence des différents taux de substitution de ciment par le MK et DB sur la densité et la compacité des mortiers [91].

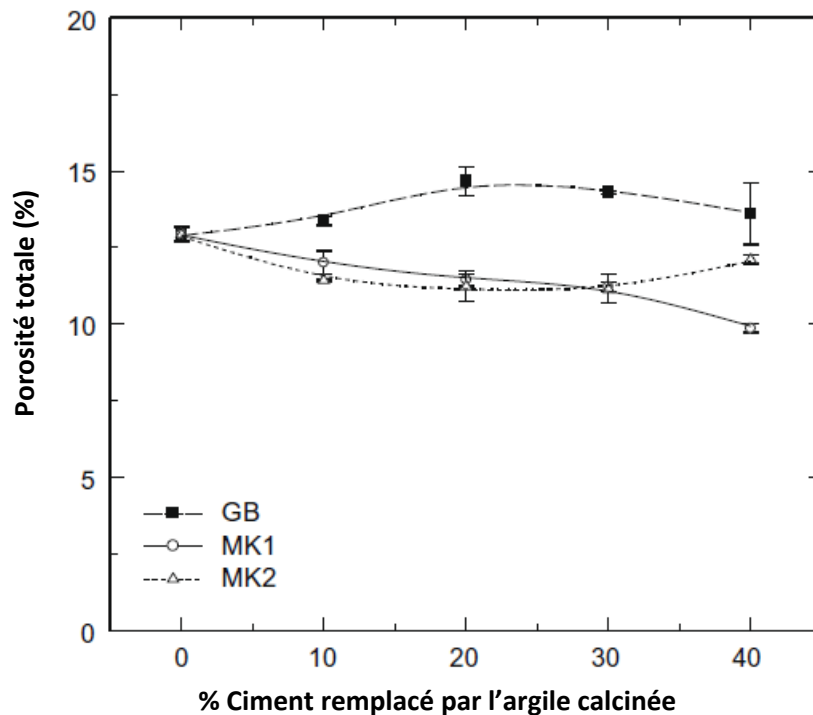


Figure I.18. Effet des différents taux de substitution de ciment par le MK et DB sur la porosité totale [91].

La figure I.19 montre les différentes proportions entre les micropores et macropores provoquées par les différents taux de substitution. Il a été constaté que les déchets de brique provoquent une

réduction des macropores et une augmentation des micropores ; ce qui explique la similitude du DB10 avec le mortier témoin dans la porosité totale engendrée.

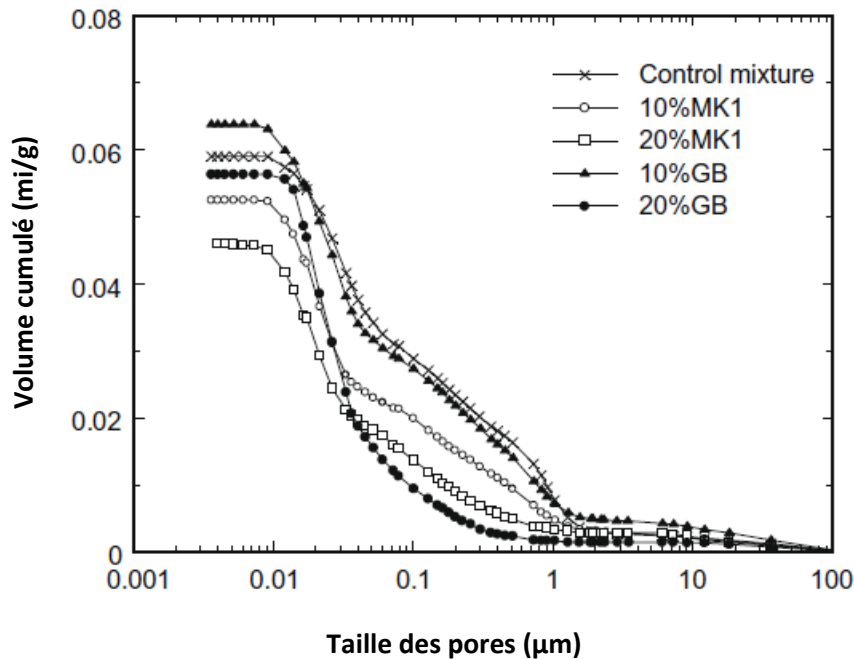


Figure I.19. Effet des différents taux de substitution de ciment par les DB et MK sur la distribution des pores [91].

L'augmentation de la porosité pour les taux de substitution de 20% et 30% de ciment par DB a été associée à une réduction du volume total des hydrates formés en comparaison avec les hydrates des mortiers témoins. Cependant, les hydrates présents dans les mélanges DB20 et la présence des particules de DB non hydraté ont conduit à une réduction des macropores [91].

I.5.5 Effet des déchets de brique et de béton sur l'absorption capillaire et la sorptivité

Gonçalves et al. [91] ont testé l'effet des déchets de brique sur l'absorption capillaire (Figure I.20). Il a été constaté que les déchets de brique ont un effet très positif sur la sorptivité, et plus le taux de substitution de ciment par les DB augmente plus la vitesse d'absorption diminue.

Cette réduction de la sorptivité avec l'augmentation du taux de substitution de ciment par les DB a été expliquée par un raffinement du système des pores causés par l'incorporation de la brique. L'incorporation de la brique dans la matrice cimentaire conduit à un raffinement du système des pores, par la réduction du taux des grands pores et l'augmentation de celui des petits pores ce qui empêche donc la pénétration rapide de l'eau et réduit par conséquent la vitesse d'absorption capillaire.

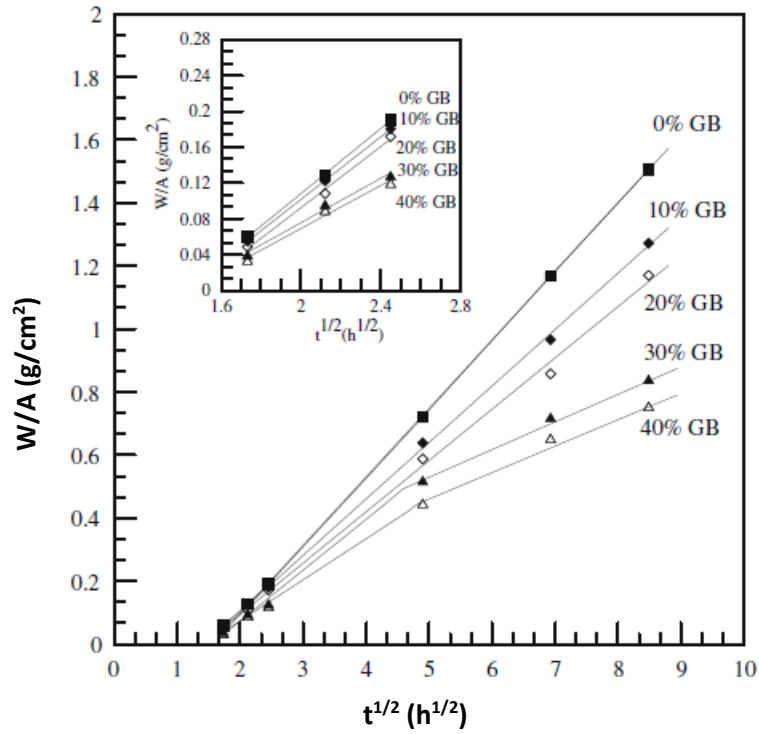


Figure I.20. Effet des différents taux de substitution de ciment par les DB sur la sorptivité [91].

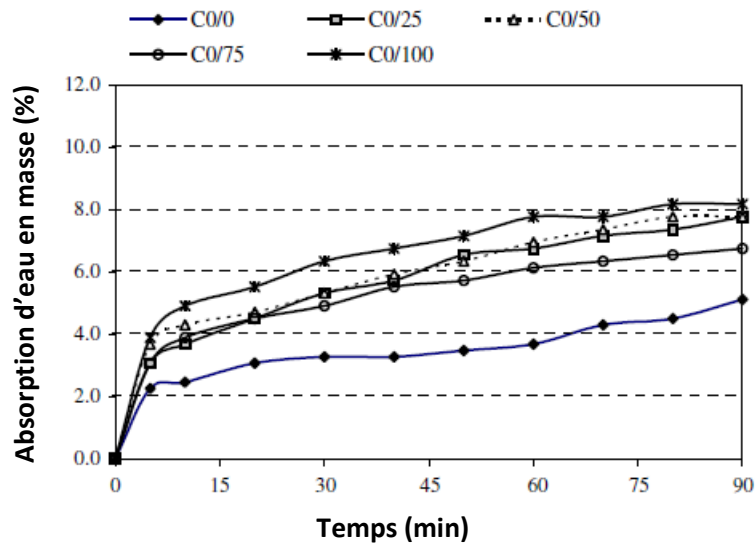


Figure I.21. Effet des différents taux de substitution de sable par les briques [91].

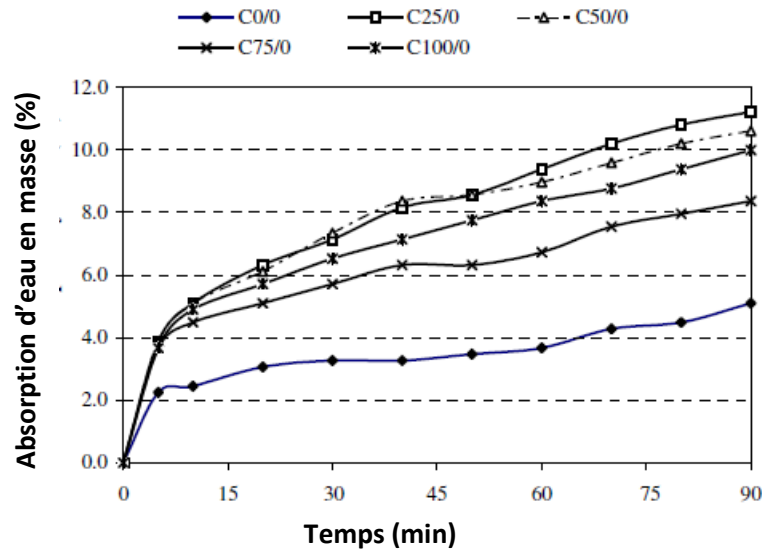


Figure I.22. Effet des différents taux de substitution de gravier par les briques [92].

D'autres chercheurs [92, 93, 90] ont utilisé les déchets de brique et/ou de béton dans la matrice granulaire et ont trouvé des résultats contraires concernant l'absorption capillaire par rapport à Gonçalves et al [91] (figures I.21 et I.22).

Le taux d'absorption d'eau du béton recyclé est supérieur à celui du béton témoin composé à 100 % de granulats naturels. Cependant, les bétons à base de granulats de briques concassées et le mélange de granulats de béton et de briques concassées en même temps ont également une capacité d'absorption d'eau plus élevée que le béton naturel. Ceci montre l'effet négatif de substitution des granulats par la brique et de béton ou plus le taux de substitution augmente, plus l'absorption capillaire augmente. Cela a été expliqué par les pores qui existent dans les granulats. Nous pouvons conclure que l'utilisation de la brique broyée dans la matrice cimentaire est beaucoup plus bénéfique que son utilisation dans la matrice granulaire concernant l'absorption capillaire. (Figures I.23 et I.24).

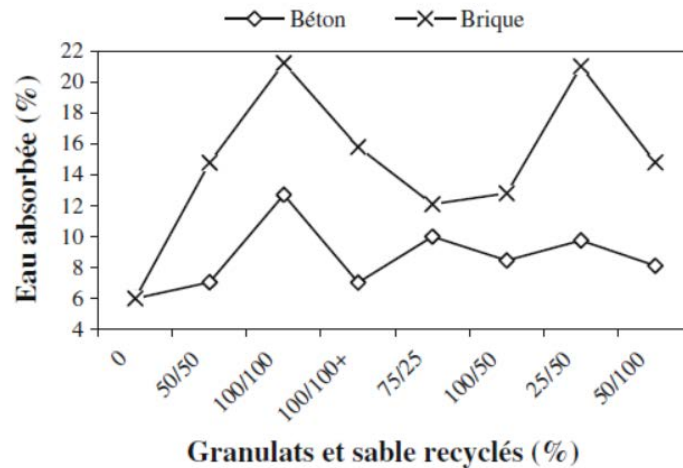


Figure I. 23. Absorption d'eau des bétons à base de granulats et sable de briques et de bétons concassés [90].

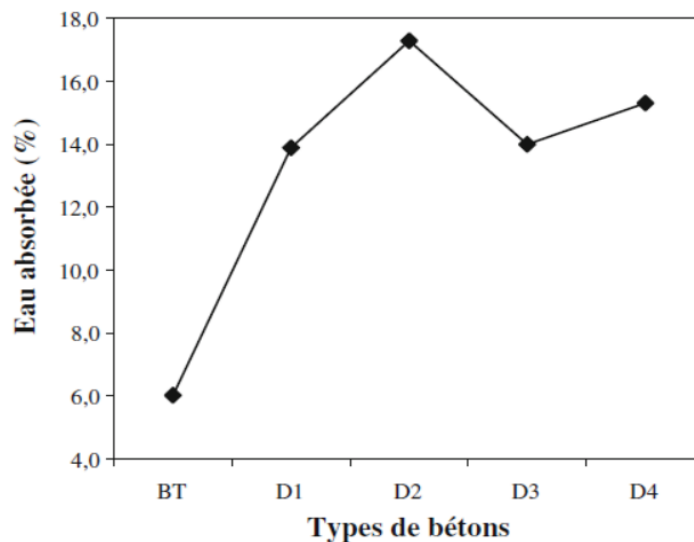


Figure I. 24. Absorption d'eau des bétons à base du mélange de granulats et sable de briques et de bétons concassés [90].

I.5.6 Effet des déchets de brique et de béton sur les émissions des ions de chlore

Dans le béton recyclé, il a été prouvé que la zone de transition granulats- pâte de ciment n'a pas beaucoup d'influence dans le phénomène de diffusion des ions chlorures, et que la pâte de ciment et le mortier sont les parties du béton qui laissent passer les ions de chlore [89]. Par contre, l'incorporation des déchets de brique a provoqué la réduction de la pénétration des ions de chlore de 1.5 à 6 fois par rapport aux mortiers de référence [91]. Ceci a été expliqué par le raffinement du système des pores causés par l'incorporation des fines de brique.

I.6 MICROSTRUCTURE DES BHP

Le béton est communément compris comme un matériau composite à trois phases comprenant une pâte de ciment durcie, la structure des agrégats et la zone de transition interfaciale (ITZ) entre la pâte de ciment durcie et la surface des agrégats. La microstructure résultante est extrêmement complexe et présente des caractéristiques (y compris des pores) sur plusieurs échelles de longueur [94], allant de nanométriques (par exemple, C S H) et micrométriques (par exemple, des particules de ciment non hydratées, de l'hydroxyde de calcium (CH) ou les composants de la zone de transition pâte-granat), à la structure aléatoire millimétrique de la disposition de la pâte de ciment/sable et la structure aléatoire centimétrique de la disposition mortier/granulats grossiers (Figure I.25). Comme les granulats recyclés (RA) ont des formes plus irrégulières en raison de leurs processus de recyclage et que leurs surfaces spécifiques ont tendance à être plus élevées que celles de leurs homologues naturels [95-96]. Et, bien qu'au niveau de l'utilisation finale de la construction, l'échelle de longueur soit métrique (le béton étant considéré comme un matériau uniforme avec des propriétés en vrac), les propriétés du béton sont en fait déterminées par sa microstructure.

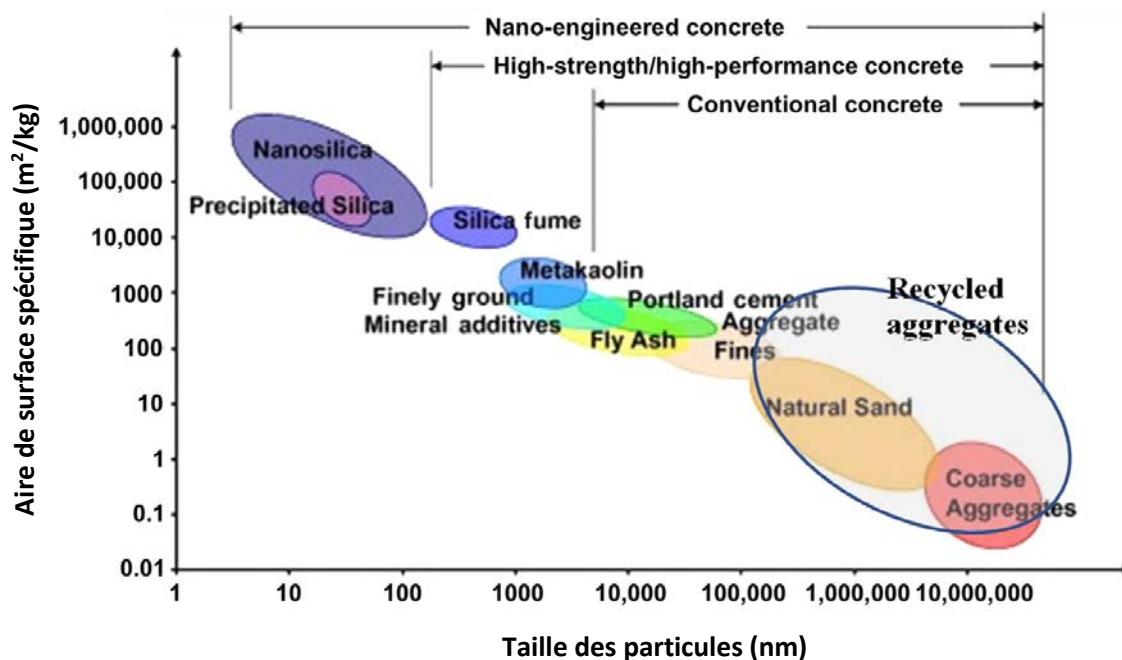


Figure I.25. Taille des particules et surface spécifique liée aux matériaux en béton. [97].

Les détails de la microstructure du béton diffèrent selon la chimie, la finesse et la teneur du ciment, le rapport eau/ciment (w/c), la présence de matériaux supplémentaires (par exemple, cendres volantes, fumée de silice, superplastifiant), les procédures de mélange et de durcissement [98]. Ils dépendent également du type et des propriétés des granulats [99], et, même si tous les autres paramètres sont maintenus constants, le remplacement total ou partiel des granulats naturels par des granulats recyclés introduit de profondes altérations microstructurales dans le béton produit, notamment à la zone de transition.

I.6.1 CONSTITUTION

Lorsque de la fumée de silice est ajoutée à la formulation BHP, la réaction pouzzolanique contribue à améliorer les propriétés mécaniques du matériau durci en formant une phase de liaison. La chaux est consommée et remplacée par le C-S-H, et elle va à nouveau dans le sens de la densification de la pâte : la portlandite (le silicate) sera plus finement réparti dans la microstructure du BHP. La microstructure du BHP est plus uniforme, nettement plus amorphe et plus dense que le béton traditionnel, grâce au faible rapport "E/C" de cette formule (ce qui est possible grâce à l'utilisation de fumées de silice et d'un super-plastifiant) et à la réaction pouzzolanique (Plus petite quantité de silicate et cristaux plus fins et dispersés) [100-103]. Zhan et al., 2014 ; Wang et al., 2016b Nisha et al., 2017.

I.6.2 PEAU DU BÉTON

Lors du coulage du béton, la pâte durcie présente toujours une fine couche poreuse. Seuls quelques cristaux de chaux plus petits que le béton conventionnel peuvent être localisés. Il y a quelques fissures (moins de 1 micron de largeur) et une grande quantité de gel C-H-S, ce qui est caractéristique du BHP [104]. Il existe également une structure en nid d'abeille, qui peut représenter la marque laissée par les particules de ciment lors de la fracturation de l'échantillon. Ceci indique qu'il existe un gradient E/C' dans le matériau [104]. Récemment, certains auteurs ont reconnu l'importance de la surface du béton (au moins les 20 à 30 premiers mm) du point de vue de la durabilité. En effet, il est bien connu qu'en raison de l'effet mur, la composition ou la microstructure de la peau de béton et du noyau de béton ne sont pas exactement les mêmes [104].

I.6.3 INTERFACE PÂTE-GRANULATS

L'interface pâte granulats, appelée aussi « l'auréole de transition » est une partie de la pâte de ciment au voisinage des granulats (quelques microns) qui comporte une porosité plus importante que dans la masse.

Pour les bétons à hautes performances, la porosité et l'épaisseur de la zone sont réduites par l'ajout des additions minérales. Par rapport au BO (béton ordinaire), où l'auréole de transition est d'environ 50 μm , son épaisseur pour les BHP est limitée à 12 μm . Certaines sources rapportent l'absence de la zone de contact dans les bétons à haute performance où l'ajout de la fumée de silice permet la consommation de la portlandite, en densifiant la structure du matériau, tout en améliorant ses performances mécaniques [105]. La qualité de la zone de transition dépend également du rapport « E/C ». Au fur et à mesure que le rapport « E/C » augmente, cette zone devient plus épaisse, plus poreuse et par conséquent moins résistante. [105]

En BHP, la densité est également augmentée par le ultrafines. Il n'y avait pas non plus de ressuage autour des agrégats. D'autre part, la pâte a subi un important retrait d'auto-séchage, qui exerce une forte adhérence sur les granulats, améliorant ainsi significativement l'adhérence [104].

La microstructure de la pâte de ciment d'hydraté du béton 20 MPa est très ouverte, et des pores, de gros cristaux d'ettringite et du silicate (portlandite) de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ peuvent être observés, avec de plus petites aiguilles de silicate de calcium hydraté [104].

On constate que dans le cas du béton ordinaire, la zone de transition entre la pâte de ciment et le granulat est très poreuse. En revanche, il est impossible de distinguer les plus petits cristaux dans la microstructure du BHP, qui a un rapport « eau/liant » de 0,25, la pâte de ciment hydraté a un aspect amorphe et est très dense (compacte) [104].

Bien qu'il y ait un certain désaccord quant à savoir s'il existe une zone de transition dans le BHP, en particulier ceux avec de la fumée de silice, la zone de transition est très petite voire inexistante [106].

I.7 Conclusion

L'incorporation des déchets de brique et de béton dans la fabrication des BHP contribue à réduire la pollution par des déchets inertes, ainsi la réduction de la consommation du sable alluvionnaire. Elle améliore les résistances mécaniques et la durabilité des bétons. L'Algérie dispose de grandes ressources en déchet de brique et de béton qui peut être l'un des meilleurs granulats fins à encourager.

Les BHP contiennent des ajouts chimiques et notamment la fumée de silice, permettant l'amélioration de sa résistance mécanique. Ils sont caractérisés par une faible perméabilité, une grande densité, et une durabilité accrue pour développer certaines caractéristiques, à savoir : la résistance mécanique, la résistance au feu et les caractéristiques rhéologiques.

La caractérisation microstructurale du béton et du béton recyclé est un outil puissant pour établir les contributions au développement et les caractéristiques de la plupart des propriétés mécaniques, rhéologiques et liées à la durabilité de ce matériau complexe et hétérogène. Le nombre de techniques possibles utilisées pour établir les caractéristiques microstructurales des produits cimentaires est vaste et continue d'augmenter, permettant d'explorer et d'expliquer les détails microstructuraux à plusieurs échelles de longueur.

Les principales limitations associées aux agrégats recyclés les plus courants, ceux fabriqués à partir de déchet de béton ou de déchet de construction et de démolition, sont liées à la présence de matériaux plus faibles tels que le mortier ou la brique. Ces matériaux ont une porosité plus élevée que leurs homologues naturels et sont délétères pour les zones de transitions établies avec une nouvelle pâte. Les performances du béton à granulats recyclés dépendent donc majoritairement de la qualité et de l'origine des agrégats recyclés utilisés. Les propriétés morphologiques, physiques et chimiques de ces granulats recyclés, ainsi que la présence de contaminants légers et lourds, sont des caractéristiques clés qui influenceront le développement microstructural et, par conséquent, le comportement macroscopique des bétons recyclés.

Bibliographie :

- [1]. Cimpelli C. et Lefort M, (1996). Guide technique pour l'utilisation des matériaux régionaux d'Île de France – Les bétons et produits de démolition recyclé UNICEM. Île de France. Cité dans (Raphaël, 2003).
- [2]. Abbas A. Carcassès M. Ollivier J.P, (2009). The importance of gas permeability in addition to the compressive strength of concrete. *Magazine of Concrete Research*, 52/1.
- [3]. Fernanda de Andrade Salgado, Flavio de Andrade Silva, (2022). Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: A review. *Journal of Building Engineering* 52 (2022) 104452. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104452>
- [4]. Zhao, Z., (2014a). Valorisation des sables de béton recyclé pour la fabrication des mortiers (Thèse de Doctorat de Génie Civil). Ecole des mines de Douai et l'université Lille 1, Douai et Lille.
- [5]. Cerema, (2014). Graves de valorisation Graves de déconstruction.
- [6]. Serres, N., Braymand, S., Feugeas, F., (2014). Evaluation environnementale de bétons de granulats recyclés de béton et de béton de granulats recyclés de terre cuite à partir d'analyses de cycle de vie, in: *Matériaux* (2014). Montpellier (France), p. 10.
- [7]. Colina, H., (2010). Etude d'opportunité pour un Projet National de R&D sur le recyclage complet des bétons.
- [8]. Katz, A., (2003). Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. *Cem. Concr. Res.* 33, 703–711. [https://doi:10.1016/S0008-8846\(02\)01033-5](https://doi:10.1016/S0008-8846(02)01033-5)
- [9]. International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures, 1992.
- [10]. Sri Ravindrarajah, R., Tam, C.T., (1987a). Recycling concrete as fine aggregate in concrete. *Int. J. Cem. Compos. Lightweight Concr.* 9, 235–241. [https://doi:10.1016/0262-5075\(87\)90007-8](https://doi:10.1016/0262-5075(87)90007-8)
- [11]. Sri Ravindrarajah, R., Tam, C.T., (1987b). Recycled concrete as fine and coarse aggregates in concrete. *Mag. Concr. Res.* 39.
- [12]. Dao, D.T., (2012). (Multi-) recyclage du béton hydraulique (Thèse de Doctorat de Génie Civil). Ecole centrale de Nantes, Nantes, 2012, 312 p.
- [13]. Barbudo, A., de Brito, J., Evangelista, L., Bravo, M., Agrela, F., (2013). Influence of water-reducing admixtures on the mechanical performance of recycled concrete. *J. Clean. Prod.* 59, 93–98. <https://doi:10.1016/j.jclepro.2013.06.022>
- [14]. Evangelista, L., de Brito, J., (2007). Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cem. Concr. Compos.* 29, 397–401. <https://doi:10.1016/j.cemconcomp.2006.12.004>
- [15]. Evangelista, L., de Brito, J., (2014). Concrete with fine recycled aggregates: a review. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 18, 129–172. <https://doi:10.1080/19648189.2013.851038>
- [16]. Corina Idesi, V., Moriconi, G., (2009). Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.* 23, 2869–2876. <https://doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.02.004>

- [17]. Mefteh, H., Kebaïli, O., Oucief, H., Berredjem, L., Arabi, N., (2013). Influence of moisture conditioning of recycled aggregates on the properties of fresh and hardened concrete. *J. Clean. Prod.* 54, 282–288. <https://doi:10.1016/j.jclepro.2013.05.009>
- [18]. Mefteh, H., Arabi, N., (2011). Les granulats recyclés humidifiés : comportements des bétons frais et durcis, in: *XXIXe Rencontres Universitaires de Génie Civil*. Tlemcen, p. 10.
- [19]. Gómez-Soberón, J.M., (2002). Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study. *Cem. Concr. Res.* 32, 1301–1311. [https://doi:10.1016/S0008-8846\(02\)00795-0](https://doi:10.1016/S0008-8846(02)00795-0)
- [20]. Poon, C.S., Kou S.C., Lam L., (2006). Influence of recycled aggregate on slump and bleeding of fresh concrete. *Mater. Struct.* 40, 981 – 988. <https://doi:10.1617/s11527-006-9192-y>
- [21]. Braymand, S., (2015a). *La gestion des déchets respectueux de l’environnement : les chantiers verts : cours.*
- [22]. Braymand, S., (2015b). *QSE-Licence professionnelle Génie Civil et Construction-Energies et Confort.*
- [23]. Fumoto, T., Yamada, M., (2012). Influence of quality of recycled Fine aggregate on properties of concrete. *Mem Fac Eng* 43, pp.97–103.
- [24]. Zhao, Z., Remond, S., Damidot, D., Xu, W., (2015). Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars. *Constr. Build. Mater.* 81, 179–186. <https://doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.02.037>
- [25]. Arandigoyen, M., Bicer-Simsir, B., Alvarez, J.I., Lange, D.A., (2006). Variation of microstructure with carbonation in lime and blended pastes. *Appl. Surf. Sci.* 252, 7562–7571. <https://doi:10.1016/j.apsusc.2005.09.007>
- [26]. Morandeau, A., (2013). *Carbonatation atmosphérique des systèmes cimentaires à faible teneur en portlandite (Thèse de Doctorat de Génie Civil)*. Université Paris-Est, Paris.
- [27]. Hansen, T.C., (1986). Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945–1985. *Mater. Struct.* 19, 201–246.
- [28]. Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., Barra, M., (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cem. Concr. Res.* 37, 735–742. <https://doi:10.1016/j.cemconres.2007.02.002>
- [29]. Mas, B., Cladera, A., Olmo, T. del, Pitarch, F., (2012b). Influence of the amount of mixed recycled aggregates on the properties of concrete for non-structural use. *Constr. Build. Mater.* 27, 612–622. <https://doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.06.073>
- [30]. Charonnat, Y., (2011). *Etude de faisabilité pour un Projet National de R&D sur le recyclage complet des bétons.*
- [31]. Ajdukiewicz, A., Kliszczewicz, A., (2002). Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. *Cem. Concr. Compos.* 24, 269–279. [https://doi:10.1016/S0958-9465\(01\)00012-9](https://doi:10.1016/S0958-9465(01)00012-9)

- [32]. Rao, A., Jha, K.N., Misra, S., (2007). Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. *Resour. Conserv. Recycl.* 50, 71–81. <https://doi:10.1016/j.resconrec.2006.05.010>
- [33]. Topçu, I.B., (1997). Physical and mechanical properties of concretes produced with waste concrete. *Cem. Concr. Res.* 27, 1817–1823. [https://doi:10.1016/S0008-8846\(97\)00190-7](https://doi:10.1016/S0008-8846(97)00190-7)
- [34]. Mukai T., et al, (1979). Study on reuse of waste concrete for aggregate of concrete, in: *Energy and Resource Conservation in Concrete Technology*’’ Japan-US Cooperative Science Programme. San Francisco.
- [35]. Butler, L., West, J.S., Tighe, S.L., (2013). Effect of recycled concrete coarse aggregate from multiple sources on the hardened properties of concrete with equivalent compressive strength. *Constr. Build. Mater.* 47, 1292–1301. <https://doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.05.074>
- [36]. Buyle-Bodin,F, Hadjieva-Zaharieva, (2002). Influence of industrially produced recycled aggregates on flow properties of concrete. *Mater. Struct.* 35, 504–509.
- [37]. Evangelista, L., Brito, J. de, (2009). State-of-the-art on the use of fine recycled aggregates in concrete production, in: *2nd International RILEM Conference on Progress of Recycling in the Built Environment*. Sao Paulo, Brazil, pp. 175–183.
- [38]. Hafid, H., (2012). Influence des paramètres morphologiques des granulats sur le comportement rhéologique des bétons frais : étude sur systèmes modèles (Thèse de Doctorat de Génie Civil). Université Paris-Est, Paris.
- [39]. Pereira, P., Evangelista, L., de Brito, J., (2012a). The effect of superplasticisers on the workability and compressive strength of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Constr. Build. Mater.* 28, 722–729. <https://doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.10.050>
- [40]. Yaprak, H., Yilmaz aruntas, H., Demir, I., Simsek, O., Durmus, G., (2011). Effects of the fine recycled concrete aggregates on the concrete properties. *Int. J. Phys. Sci.* 2455–2461.
- [41]. Westerholm, mikael, (2006). rheology of the mortar phase of concrete with crushed aggregate (Thèse). univesity of technology of lulea.
- [42]. Braymand, S., Roux, S., Kunwufine, D., Mihalcea, C., Feugeas, F., Fond, C., (2014). Les granulats recyclés de bétons: un matériau à fort potentiel de valorisation dans les bétons, in: *Matériaux 2014*. Montpellier (France), p. 10.
- [43]. Nelfia, L., Mahieux, P.-Y., Turcry, P., amine, Y., Amiri, O., (2013). Incorporation de fines de béton de démolition dans la fabrication de mortier par substitution du ciment, in: *31èmes Rencontres Universitaires de l’AUGC*. Cachan, p 10.
- [44]. Torben, C.H., Hendriks, N., (1983). strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. *Concr. Int.* 5, 79–83.
- [45]. Topçu, İ.B., Şengel, S., (2004). Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. *Cem. Concr. Res.* 34, 1307–1312. <https://doi:10.1016/j.cemconres.2003.12.019>
- [46]. Sagoe-Crentsil, K.K., Brown, T., Taylor, A.H., (2001). Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. *Cem. Concr. Res.* 31, 707–712. [https://doi:10.1016/S0008-8846\(00\)00476-2](https://doi:10.1016/S0008-8846(00)00476-2)

- [47]. Hendriks, C.F., Janssen, G.M.T., Vázquez, E., RILEM TC 198-URM, (2005). Use of recycled materials. RILEM, Bagnaux.
- [48]. Limbachiya, M., Meddah, M.S., Ouchagour, Y., (2012). Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete. *Constr. Build. Mater.* 27, 439–449. <https://doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.07.023>
- [49]. Hadjieva-Zaharieva, R., (1998). Duabilité des bétons à base de granulats recyclés (Thèse de Doctorat de Génie Civil). Université d'Artois, Artois, France.
- [50]. Padmini, A.K., Ramamurthy, K., Mathews, M.S., 2009. Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.* 23, 829–836. <https://doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.03.006>
- [51]. González-Fonteboá, B., Martínez-Abella, F., Eiras-López, J., Seara-Paz, S., (2011). Effect of recycled coarse aggregate on damage of recycled concrete. *Mater. Struct.* 44, 1759–1771. <https://doi:10.1617/s11527-011-9736-7>
- [52]. Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., Barra, M., (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cem. Concr. Res.* 37, 735–742. <https://doi:10.1016/j.cemconres.2007.02.002>
- [53]. Poon, C.S., Shui, Z.H., Lam, L., Fok, H., Kou, S.C., (2004). Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. *Cem. Concr. Res.* 34, 31–36. [https://doi:10.1016/S0008-8846\(03\)00186-8](https://doi:10.1016/S0008-8846(03)00186-8)
- [54]. Québaud, M., Zaharieva, R., Buyle-Bodin, F., (1998). Le comportement des bétons incluant des granulats recyclés. *Rev. Fr. Génie Civ.* 2, 969–984. <https://doi:10.1080/12795119.1998.9692222>
- [55]. Rodrigues, F., Carvalho, M.T., Evangelista, L., de Brito, J., (2013). Physical–chemical and mineralogical characterization of fine aggregates from construction and demolition waste recycling plants. *J. Clean. Prod.* 52, 438–445. <https://doi:10.1016/j.jclepro.2013.02.023>
- [56]. Zhao, Z., Wang, S., Lu, L., Gong, C., (2013). Evaluation of pre-coated recycled aggregate for concrete and mortar. *Constr. Build. Mater.* 43, 191–196. <https://doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.01.032>
- [57]. Parekh, D.N., Modhera, C.D., (2011). Assessment of recycled aggregate concrete. *J. Eng. Res. Stud.* E-ISSN 976, 7916.
- [58]. De Juan, M.S., Gutiérrez, P.A., (2009). Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Constr. Build. Mater.* 23, 872–877. <https://doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.04.012>
- [59]. López-Gayarre, F., Serna, P., Domingo-Cabo, A., Serrano-López, M.A., López-Colina, C., (2009). Influence of recycled aggregate quality and proportioning criteria on recycled concrete properties. *Waste Manag.* 29, 3022–3028. <https://doi:10.1016/j.wasman.2009.07.010>
- [60]. Salas, A., Roesler, J.R., Lange, D., (2010). Batching Effects on Properties of Recycled Concrete Aggregates for Airfield Rigid Pavements.
- [61]. Neville, A.N., Centre de Recherche Interuniversitaire sur le Béton, 2000. Propriétés des bétons. Eyrolles, Paris.

- [62]. Agrela, F., Alaejos, P., De Juan, M.S., (2013). 12 - Properties of concrete with recycled aggregates, in: Brito, F.P.-T.W.Y.T.A.L.D. de (Ed.), *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste*. Woodhead Publishing, pp. 304–329.
- [63]. Parekh, D.N., Modhera, C.D., (2011). Assessment of recycled aggregate concrete. *J. Eng. Res. Stud.* E-ISSN 976, 7916.
- [64]. Rahman, Hasrudin Hamdam, Ahmad Mujahid Ahmad Zaidi, (2009). Assessment of recycled Aggregate Concrete. *Mod. Appl. Sci.* 3, 1– 8.
- [65]. Marta Sanchez de Juan, Pilar Aloejos Gutiérrez, (2004). Influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate, in: *International RILEM Conference on the use of recycled materials in buildings and structure*. RILEM, Barcelona, Spain, pp. 536–544.
- [66]. Braymand, S., François, P., Feugeas, F., Fond, C., (2012a). Rheological properties of recycled aggregate concrete using superplasticizers, in: *Tenth International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete*. Prague (Czech republic), p. 15.
- [67]. Braymand, S., François, P., Grondin, A., Feugeas, F., Fond, C., (2012b). Propriétés rhéologiques, physiques et mécaniques des bétons de granulats recyclés. Presented at the XXXe Rencontres AUGC-IBPSA, Chambéry, Savoie, p. 10.P.
- [68]. Rao, A., Jha, K.N., Misra, S., (2007). Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. *Resour. Conserv. Recycl.* 50, 71–81. <https://doi:10.1016/j.resconrec.2006.05.010>
- [69]. Whiting, B., McCarthy, T., Lume, E., (2012). Drying Shrinkage of concrete made from recycled concrete aggregate, in: *22nd Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials*. Wollongong (Australia), p. 9.
- [70]. Pereira, P., Evangelista, L., de Brito, J., (2012a). The effect of superplasticisers on the workability and compressive strength of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Constr. Build. Mater.* 28, 722–729. <https://doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.10.050>
- [71]. Pereira, P., Evangelista, L., de Brito, J., (2012b). The effect of superplasticizers on the mechanical performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cem. Concr. Compos.* 34, 1044–1052. <https://doi:10.1016/j.cemconcomp.2012.06.009>
- [72]. Braymand, S., (2013). Impact environnemental des matériaux.
- [73]. Braymand, S., (2014). Etude environnementale et matériaux alternatifs utilisés en travaux public.
- [74]. Braymand, S., (2015a). La gestion des déchets respectueux de l'environnement : les chantiers verts : cours.
- [75]. De Juan, M.S., Gutiérrez, P.A., (2004). Influence of recycled aggregate quality on concrete properties, in: *International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures*. 545-553, Barcelona, Spain.

- [76]. Corinaldesi, V., Moriconi, G., (2009). Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.* 23, 2869–2876. <https://doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.02.004>
- [77]. Abbas, A., Fathifazl, G., Isgor, O.B., Razaqpur, A.G., Fournier, B., Foo, S., (2009). Durability of recycled aggregate concrete designed with equivalent mortar volume method. *Cem. Concr. Compos.* 31, 555–563. <https://doi:10.1016/j.cemconcomp.2009.02.012>
- [78]. J. Baron et J.P.Ollivier. (1992). *La durabilité des bétons*, Presses de l'ENPC, Paris, 453 pages, 1992.
- [79]. Baroghel-Bouny, (2004). *Les spécificités des bétons à hautes performances : Caractéristiques microstructurales et propriétés relatives à la durabilité évaluées en conditions de laboratoire ou en conditions naturelles* », Etudes et recherches des LPC, Série Ouvrages d'art, OA 44 (LCPC, Paris, sept. 2004, 76 p .
- [80]. Behim M. (2005). « Sous produits industriels et Développement Durable : Réactivité, Rçole et durabilité des Laitiers d'El Hadjar dans les matériaux à matrice cimentaire », Thèse doctorat, Université Badji Mokhtar, Annaba-Algérie, 2005.
- [81]. Michaël Dierkens, (2011). « Principales agressions et attaques du béton », CETE de Lyon – DLL 15 novembre 2011
- [82]. O'Farrell M., Wild S., Sabir B.B, (2000). Resistance to chemical attack of ground brick HPC mortar. Part II. Synthetic seawater, Division of Built Environment, School of Technology, University of Glamorgan, Pontypridd, Mid Glamorgan CF37 1DL, UK”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, pp. 757-765.
- [83]. A.M. Neville, (2000). « Propriétés des Bétons », Traduit par le CRIB (Centre de Recherche Interuniversitaire sur le Béton, SHERBROOKE-LAVAL), septembre 2000.
- [84]. Paillier A.M., Raverdy M., Serrano J.J, (1994). Long term study of the influence of the mineralogical composition of cement on resistance to seawater: test in artificial seawater and in the channel, in the durability of concrete”, *ACI SP-145*, Detroit, Michigan.
- [85]. Conjeaud, M.L.,(1980). “Mechanism of sea water attack on cement mortar, in perfomence of concrete in marin environment”, *ACI SP-65*, 1980, pp 39-61.
- [86]. Lea F.M., “The chemistry of cement and concrete, 3rd edn”, Edward Arnold, London 1970.
- [87]. Taylor H.F.W, (1997). “Cement chemistry, 2nd edn,” Thomas Telford Publishing, London.
- [88]. Gollop R.S. and Taylor H.F.W., (1996). “Microstructural and micro-analytical studies of sulphate attack: IV. Reactions of a slag cement paste with sodium and magnesium sulphate solutions”, *Cement and Concrete Research*, 1996, Vol. 26, N° 7, pp. 1013-1028.
- [89]. Debieb Farid. (2007), ‘ Performances et durabilité du béton à base de granulats recyclés contaminés par les chlorures et les sulfates’, These de Doctorat de L’université USTHB d’Alger, Algérie, 2007
- [90]. S. Kenai, S et Debieb, F. (2011). Characterization of the durability of recycled concretes using coarse and fine crushed bricks and concrete aggregates. *Materials and Structures* (2011) 44: 815-824.

- [91]. Gonçalves J.P., Tavares L.M., Toledo Filho R.D., Fairbairn E.M.R., “Performance evaluation of cement mortars modified with metakaolin or ground brick” *Construction and Building Materials*, (2009), Vol. 23, pp. 1971-1979.
- [92]. Debieb F. and Kenai S., “The use of coarse and fine crushed brick as aggregate in concrete”, *Construction and Building Materials*, 2008, Vol. 22, N° 5, pp.886-93.
- [93]. Kibriya T. and Speare P.R.S, (1996). “The use of crushed brick coarse aggregate in concrete”, *Proceedings of the international conference, Dundee; 1996*, pp. 495-503.
- [94]. Garboczi, E.J., 1993. *Computational materials science of cement-based materials. Mater. Struct.* 26 (4), 191_195.
- [95]. Solyman, M., (2005). *Classification of recycled sands and their applications as fine aggregates for concrete and bituminous mixtures. PhD Dissertation in Civil Engineering, Kassel University.*
- [96]. Evangelista, L., Guedes, M., de Brito, J., Ferro, A.C., Pereira, M.F., (2015). *Physical, chemical and mineralogical properties of fine recycled aggregates made from concrete waste. Constr. Build. Mater.* 86, 178_188.
- [97]. Sanchez, F., Sobolev, K., (2010). *Nanotechnology in concrete _ a review. Constr. Build. Mater.* 24 (11), 2060_2071.
- [98]. Diamond, S., (2001). *Considerations in image analysis as applied to investigations of the ITZ in concrete. Cem. Concr. Compos.* 23 (2_3), 171_178.
- [99]. Diamond, S., (2004). *The microstructure of cement paste and concrete-a visual primer. Cem. Concr. Compos.* 26 (8), 919_933.
- [100]. Véronique Baroghel-Bouny, (1994). « *Caractérisation microstructurale et hydrique des pâtes de ciment et des bétons ordinaires et à très hautes performances* », Thèse doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1994.
- [101]. Zhan, B., Poon, C.-S., Liu, Q., Kou, S., Shi, C., (2014). *Experimental study on CO2 curing for enhancement of recycled aggregate properties. Constr. Build. Mater.* 67(A), 3_7.
- [102]. Wang, X., Eberhardt, A.B., Gallucci, E., Scrivener, K., (2016b). *Assessment of early age properties of cementitious system through isopropanol_water replacement in the mixing water. Cem. Concr. Res.* 84, 76_84.
- [103]. Nisha, M.S., Thangadurai, A., Gobhiga, S., (2017). *An experimental study on bacterial concrete by using recycled coarse aggregates. Int. J. Innov. Res. Technol.* 3 (10), 72_76.
- [104]. Chaid Rabeh, (2006). « *Formulation, Caractérisation et durabilité des BHP aux ajouts cimentaires locaux* », Thèse de doctorat d'état, ENP, Décembre 2006.
- [105]. Zaitri. R., (2015). *Effet de l'ajout de calcaire et de sable de dune broyés sur le comportement physico-mécanique et sur la durabilité des bétons à hautes performances* “. Thèse de doctorat, Université de Laghouat, Algérie.
- [106]. Le Roy R, (1996). « *Déformations instantanées et différées des bétons à hautes performances* » , *Etudes et recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, OA 22* , LCPC, Paris, 1996.

II.1 Introduction

Un plan d'expériences est l'organisation d'une séquence d'essais expérimentaux pour obtenir le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences avec la meilleure précision possible sur les réponses calculées par le modèle [1]. On utilise cette technique de manière à déterminer l'influence des différents paramètres possibles, pour optimiser les performances du système étudié [2].

Dans les plans d'expériences classiques (plans factoriels, plans pour surfaces de réponse) les facteurs sont indépendants. Cela signifie que l'on peut choisir en toute liberté le niveau d'un facteur quels que soient les niveaux déjà attribués aux autres facteurs. Lorsque on étudie des plans de mélange les facteurs sont dépendants, car, on étudie les réponses en fonction des proportions des constituants du mélange. Dans ce cas les facteurs d'étude sont les constituants du mélange. Comme la somme de ces proportions est toujours égale à 100 %, le pourcentage du dernier constituant est imposé par la somme des pourcentages des premiers composés du mélange. Dans cette situation les facteurs ne sont pas indépendants et cela entraîne des problèmes particuliers [3].

Les plans de mélange peuvent accompagner une recherche scientifique, ainsi ils permettent d'éviter les expériences inutiles.

L'objectif est d'obtenir le plus tôt possible, un maximum de réponses, ayant la meilleure précision possible, mais avec un minimum d'essais réalisés [3]

Ce chapitre traite de l'état de l'art des plans d'expériences, en particulier, les *plans du mélange* utilisés dans le cadre de ces travaux. L'utilisation de règles mathématiques est une démarche rigoureuse dont l'objectif est d'établir un lien entre les constituants du mélange et les réponses mesurées. Au fur et à mesure des rappels des principes mathématiques associés à l'emploi des plans de mélange, une génération des polynômes spécifiques associe chaque étude à l'égard des illustrations graphiques de chaque type dans le but d'une meilleure interprétation des résultats ultérieurement.

II.2 Vocabulaire de base des plans d'expériences

II.2.1. Facteur

On appelle facteur, toute série d'éléments de même nature conditionnant le phénomène étudié. Un facteur peut être qualitatif ou quantitatif, continu ou discontinu, contrôlable ou non contrôlable. [4]

Les chercheurs sont souvent amenés à comprendre comment réagit un système en fonction des facteurs susceptibles de le modifier. Pour visualiser cette évolution, ils mesurent une réponse et vont ensuite essayer d'établir des relations de cause à effet entre les réponses et les facteurs à travers le système (figure II.1).

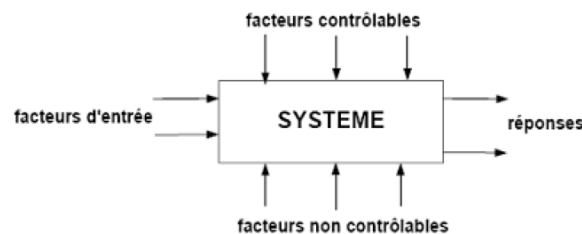


Figure II.1. Principe de base des plans d'expérience.

Parmi les facteurs on distinguera [4] :

- Les facteurs contrôlables qui dépendent directement du choix (pression, température,...)
- Les facteurs non contrôlables qui varient indépendamment du choix, sont des facteurs difficilement maîtrisables et sont la source de variations résiduelles (conditions climatiques, environnement d'utilisation...)
- Les facteurs d'entrée dont on cherche à analyser une influence (matière première, caractéristiques d'un matériau, vitesse de vibration, température, ...)

II.2.2. La réponse :

Une réponse expérimentale ou variable dépendante, est une manifestation mesurable que l'on observe lorsqu'on fait varier les facteurs étudiés.

La méthode des plans d'expériences (MPE) cherche à déterminer une relation entre les deux grandeurs (facteur et réponse).

II.2.3. Domaine expérimental

Le domaine est délimité par les niveaux supérieurs et inférieurs de chaque facteur (figure II.2).

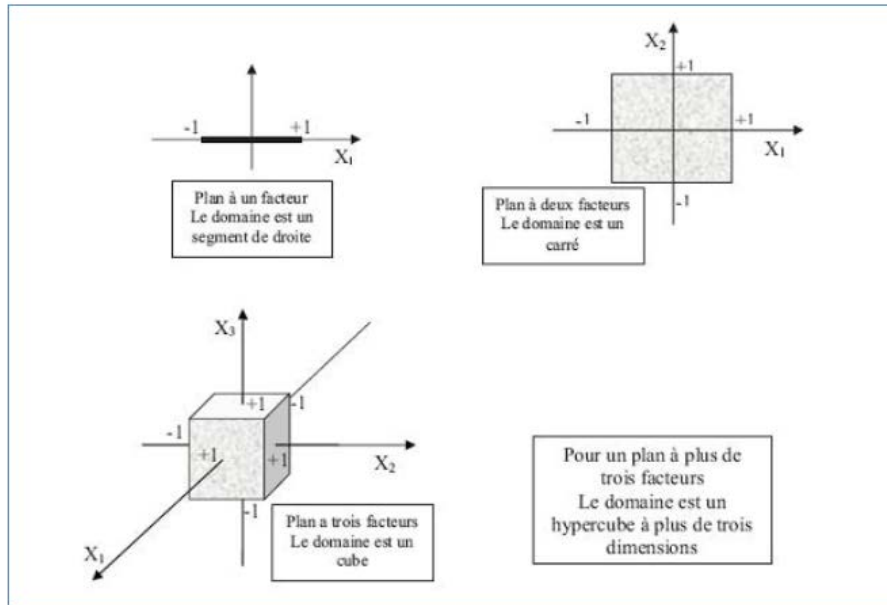


Figure II.2. Dimensions du domaine expérimental

II.2.4. Les surfaces de réponses :

À chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. À l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui se localise sur une surface appelée **surface de réponse** (figure II.3).

En général, on ne connaît que quelques réponses, celles qui correspondent aux points expérimentaux retenus par l'expérimentateur. On interpole à l'aide d'un modèle mathématique, les réponses inconnues pour obtenir la surface de réponse.

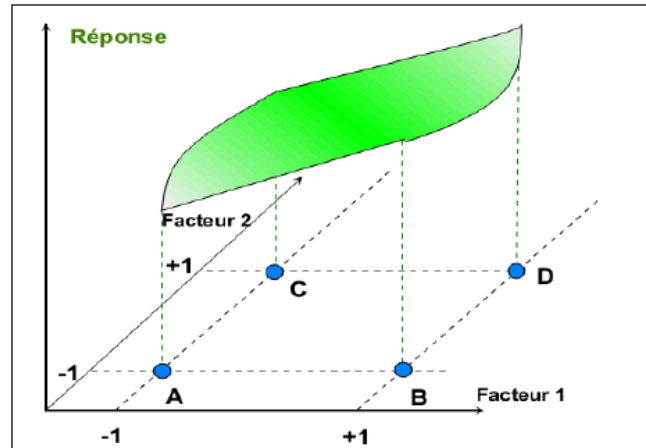


Figure II.3. L'ensemble des réponses qui correspond à tous les points du domaine d'étude forme la surface de réponse.

Les points d'expériences retenus par la théorie des plans d'expériences assurent la meilleure précision possible sur la forme et la position de la surface.

II.3 Méthodologie des plans d'expériences

Dans toutes les disciplines, il est fréquent d'étudier un phénomène dépendant de différents paramètres. La méthode intuitive n'est pas toujours la meilleure et qui consiste généralement à fixer le niveau de toutes les variables sauf une et de mesurer la réponse pour plusieurs valeurs de la variable mobile.

II.3.1 Principe :

La technique des plans d'expériences consiste à faire varier simultanément les niveaux d'un ou plusieurs facteurs (qui sont les variables, discrètes ou continues) à chaque essai. Ceci va permettre de diminuer fortement le nombre d'expériences à réaliser tout en augmentant le nombre de facteurs étudiés, en détectant les interactions entre les facteurs et les optimaux par rapport à une réponse en permettant de modéliser facilement les résultats. Le point crucial dans l'utilisation des plans d'expériences sera donc de réduire le plus possible le nombre d'expériences à mener sans sacrifier la précision des résultats. Donc la construction d'un plan d'expériences consiste à extraire du domaine expérimental, un nombre N suffisant de combinaisons particulières afin d'estimer, avec une incertitude à la fois minimale mais aussi homogène, les p inconnues du modèle (additif ou polynomial) tout en respectant au mieux les contraintes techniques et économiques de l'étude.

Il existe actuellement un nombre important de plans différents. Chacun, par ses propriétés, permet de résoudre certains problèmes particuliers. Nous pouvons cependant citer quelques types des plans d'expériences en trois grandes catégories [5] :

- Les plans pour étudier (estimer et comparer) les effets des paramètres,
- Les plans pour régler les paramètres afin d'atteindre un optimum.
- Les plans de criblage (screening)
- Les plans d'optimisation (MSR)
- Les plans de mélange

L'expérimentateur doit concevoir le plan d'expérience adéquat afin de répondre à une problématique bien précise. Il faut donc choisir ou construire le plan qui donnera les informations recherchées. On ne pourra donc pas utiliser le même plan pour étudier efficacement les effets des paramètres tout en cherchant un optimum.

Pour pouvoir utiliser les plans d'expérience, il existe une démarche bien précise à mettre en œuvre. Cette démarche s'articule selon les étapes présentées sur figure II.4 et qu'on peut résumer en trois grandes lignes :

1) La formalisation du problème expérimental c'est-à-dire les étapes préliminaires qui posent la problématique :

- Connaître les réponses étudiées
- Définir les facteurs à optimiser

2) L'analyse du problème conduit à choisir une stratégie de construction d'un plan d'expérience, dans notre étude on aura accès au plan de mélange (surfaces d'iso-réponses).

3) Les analyses (statistiques et graphiques) et les résultats (interprétation, validation).

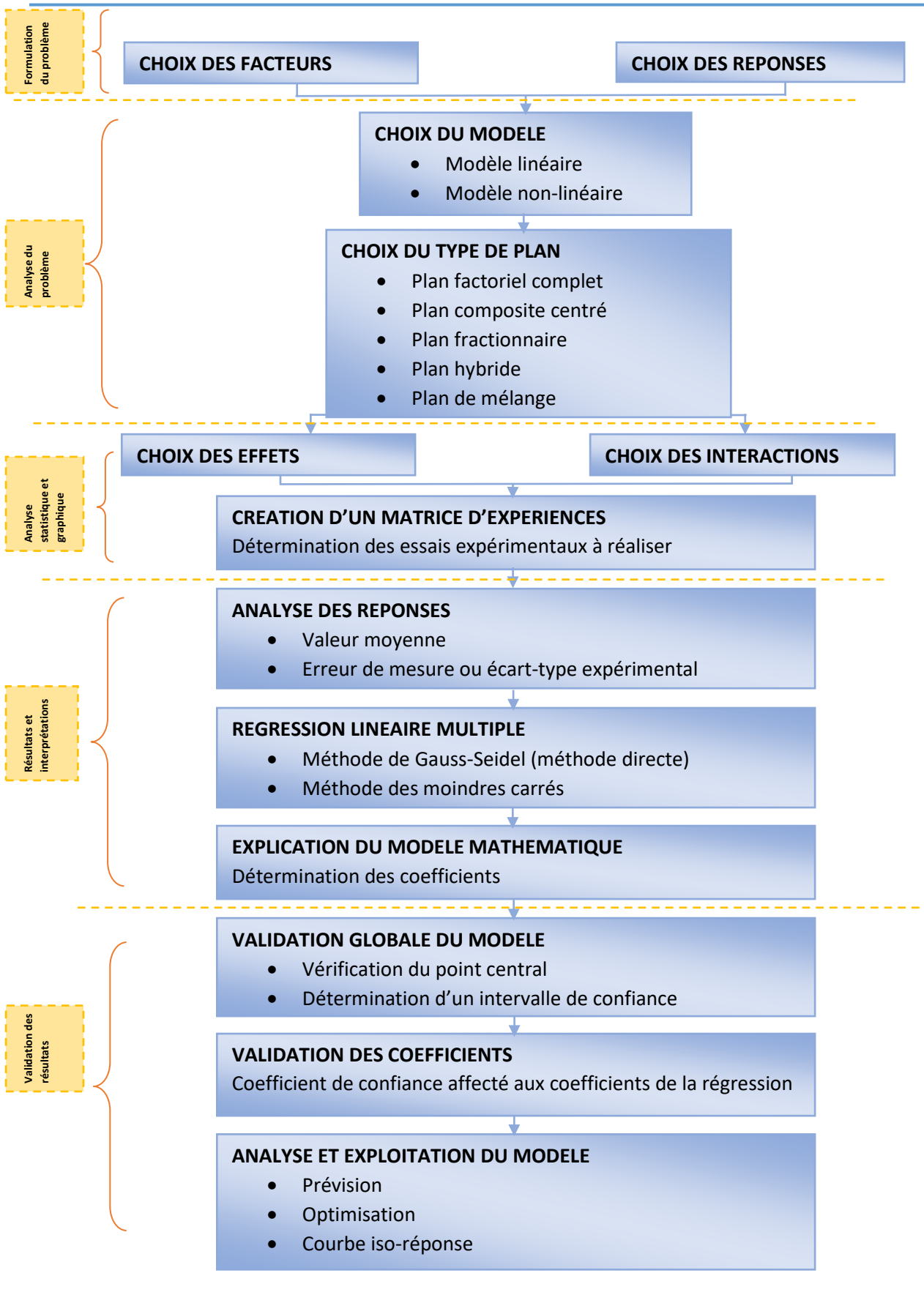


Figure II.4. Démarche pratique des plans d'expériences .

II.3.2 Choix de la méthode d'expérimentation

La méthode d'expérimentation choisie doit faciliter l'interprétation des résultats. Elle doit également minimiser le nombre des essais sans toutefois sacrifier la qualité. La théorie des plans d'expériences assure les conditions pour lesquelles on obtient la meilleure précision possible avec le minimum d'essais. On a donc le maximum d'efficacité avec le minimum d'expériences et par conséquent le coût minimum [3].

II.3.3 Analyse des résultats

L'analyse des résultats d'expériences est facilitée par le choix initial des expériences. Les résultats seront faciles à interpréter et riches d'enseignement si l'on a bien préparé les expériences. Grâce aux ordinateurs et aux logiciels la construction des plans d'expériences et les calculs nécessaires à leur interprétation sont devenus très simples. Ces outils favorisent également les représentations graphiques qui illustrent de manière spectaculaire les résultats et améliorent la compréhension des phénomènes [3].

II.3.4 Modélisation par régression linéaire multiple :

Pour permettre la prévision de la réponse et l'optimisation du système, la méthode des plans d'expériences de part sa conception et sa structure permet une représentation mathématique de la réponse « y » en fonction des facteurs sujets de l'étude.

Nous nous limiterons aux modèles polynomiaux linéaires en utilisant la régression linéaire multiple qui se base principalement sur la méthode des moindres carrés.

Deux conditions doivent être respectées [6] :

- Le nombre minimal des essais effectués doit être égal au nombre des inconnues A_i , et augmente avec le degré du polynôme. Donc il est de notre intérêt de rechercher les modèles les plus simples avant tout.
- Le modèle constitué doit être validé afin que les prévisions soient fiables.

Les modèles recherchés sont des modèles exprimant la ou les réponses «y» en fonction des facteurs « X_i » et leurs interactions.

II.4. Conditions d'application des plans d'expériences

Les plans d'expériences sont des instruments bien adaptés à la recherche à chaque fois qu'intervient un grand nombre de paramètres. Ils permettent de réduire fortement le nombre d'essais, de gagner du temps et de l'argent, tout en parvenant à un meilleur résultat.

Trois éléments sont indispensables pour réussir cette démarche : la planification des essais et la qualité de l'expérience, la maîtrise d'outils mathématiques tels que la régression linéaire multiple ; enfin, l'apport des statistiques pour la validation globale des modèles et la détermination des effets significatifs.

Pour appliquer la méthode des plans d'expériences, il faut que les deux conditions suivantes soient réalisées [7].

- **Condition 1 :**

La valeur que prend chaque variable doit être connue sans erreur, or dans un travail d'expérimentation on ne peut nier la présence d'erreur. Donc pour satisfaire cette condition on doit s'assurer que l'erreur induite sur la valeur de la variable soit minimale, voire négligeable devant la variation de cette même variable lorsqu'elle change de valeur.

- **Condition 2 :**

La réponse doit être homoscedastique. Cela signifie que l'erreur de mesure doit être la même sur tout le domaine expérimental. Pour cela il appartient à l'expérimentateur de garder les mêmes pratiques expérimentales, le même matériel et la même cadence lors de toute la campagne d'expérimentation.

II.5 Les types de plans d'expériences

Il existe plusieurs types de plans d'expériences : les plans de mélange, les plans factoriels, les plans hybrides, les plans fractionnaires et les plans de Plackett et Burman. Pour pouvoir expliquer d'avantage cette méthode de plans d'expériences nous allons donner dans ce qui suit, quelques détails concernant les plans factoriels, les plans de mélanges et les plans hybrides.

II.5.1 Plans factoriels complets

Nous allons dans un premier temps présenter les plans factoriels, Ce sont les plus utilisés car ils sont les plus simples et les plus rapides à mettre en œuvre. Tout d'abord, nous allons traiter

les plans factoriels complets. Avec deux niveaux et k facteurs, ceux-ci sont notés 2^k . Dans un plan factoriel complet, la totalité des expériences doit être réalisée, comme dans la méthodologie standard. Pour un plan factoriel complet optimal à k facteurs, il va donc falloir mener 2^k expériences. Le principe consiste alors à répartir de façon optimale les essais dans le domaine expérimental. Soit par exemple un plan factoriel complet à 2 facteurs, noté : 2^2 . La meilleure stratégie consiste à choisir les points de mesures aux extrémités du domaine expérimental, ce qui accroît la précision du résultat et ne demande que 4 essais notés.

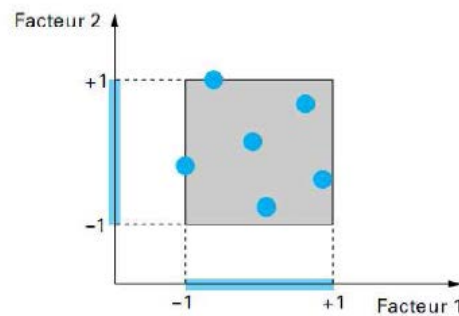


Figure II.5. Plan factoriel complet à 2 facteurs (domaine expérimental à 2 dimensions)

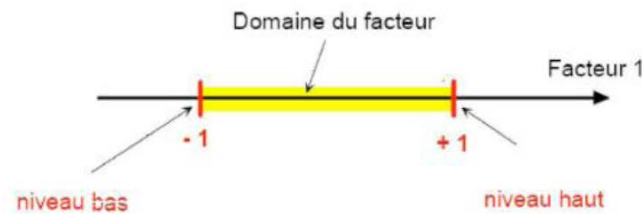


Figure II.6. Domaine de variation d'un facteur (le niveau haut est noté par +1 et le niveau bas par -1)

II.5.1.1 Plans factoriels complets à deux niveaux

Ces plans possèdent un nombre de niveaux limité à deux pour chaque facteur. Toutes les combinaisons de niveaux sont effectuées au cours de l'expérimentation. Ces plans peuvent être utilisés indistinctement pour les variables continues et pour les variables discrètes.

II.5.1.1.1 Plans à deux facteurs

Pour deux facteurs, le domaine d'étude est un carré. Le modèle mathématique postulé est un modèle du premier degré par rapport à chaque facteur :

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_{12}x_1x_2 + e \quad (II.1)$$

Y : est la réponse

$x_{1,2}$: représente le niveau attribué au facteur 1, 2

β_0 : est la valeur de la réponse au centre du domaine d'étude.

β_1 : est l'effet (ou effet principal) du facteur 1

β_2 : est l'effet (ou effet principal) du facteur 2

β_{12} : est l'interaction entre les facteurs 1 et 2

E : est l'écart.

La matrice d'expériences se construit selon le tableau suivant pour le cas des plans 2^2 et avec des facteurs β_1, β_2 .

Tableau II.1 : La matrice d'expériences.

N° Essai	β_1	β_2
1	-1	-1
2	1	-1
3	-1	1
4	1	1

II.5.1.1.2 Plans factoriels à k facteurs

On peut augmenter le nombre de facteurs. L'espace expérimental possède autant de dimensions qu'il y a de facteurs et le modèle mathématique correspond à la relation :

$$y = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \sum \beta_{ij} x_i x_j + \dots + \sum \beta_{ij} x_i^2 + \beta_{ij\dots z} x_i x_j \dots x_z + e \quad (II.2)$$

Un plan comportant k facteurs à deux niveaux est noté 2^k .

Le k en exposant signifie qu'il y a k facteurs étudiés.

Le 2 indique le nombre de niveaux par facteur.

Plus généralement, la matrice d'expériences comporte k colonnes pour les facteurs principaux et 2^k lignes soit 2^k essais. Elle se construit selon la règle suivante :

- Colonne du 1^{er} facteur : alternance de -1 et +1
- Colonne du 2^e facteur : alternance de -1 et +1 de 2 en 2
- Colonne du 3^e facteur : alternance de -1 et +1 de 4 en 4
- Colonne du 4^e facteur : alternance de -1 et +1 de 8 en 8

Et ainsi de suite pour un nombre plus élevé de facteurs.

II.5.1.2 Plans factoriels complets à trois niveaux

S'il y a deux facteurs prenant chacun trois niveaux, il faut exécuter 9 essais. On note ce plan 3^2 . S'il y a trois facteurs prenant chacun trois niveaux (plan 3^3), il faut exécuter 27 essais. En général s'il y a k facteurs prenant chacun trois niveaux, il faut exécuter 3^k essais. Ce qui commence à faire beaucoup. C'est la raison pour laquelle il existe aussi les plans fractionnaires correspondants qui portent le nom de carrés latins.

II.5.2 Plans fractionnaires

Pour les plans factoriels complets, le nombre d'essais augmente de façon exponentielle ($N=n^k$), à partir d'un certain nombre de facteurs et de niveaux, la charge expérimentale devient trop pénible à réaliser. D'où les plans fractionnaires.

Les plans fractionnaires optimaux sont des plans issus des plans factoriels complets. Leur intérêt principal est de réduire cette charge expérimentale en focalisant sur les effets les plus intéressants sans pour autant affecter de façon compromettante l'efficacité du plan [9].

Il existe deux types :

a. Plans fractionnaires (2^{k-p}) :

Ce plan consiste à utiliser pour l'étude de « k » facteurs la matrice d'effet d'un plan factoriel complet $2^{k-1}, 2^{k-2}, 2^{k-3} \dots$. Ce qui permet de réduire le nombre d'essais par 2^p .

Nous remarquons que pour un plan factoriel complet les interactions d'ordre deux et plus sont le plus souvent négligeables. L'astuce est que les interactions les moins influentes sont remplacées par les facteurs « k - p »,.....«k», en suivant leurs mêmes alternances de signes. Le plan obtenu est dit fractionnaire 2^{k-p} [9].

II.5.3 Plans de mélange

Un plan de mélange est une forme particulière d'un plan factoriel complet. Les propriétés d'un mélange dépendent généralement de sa composition et il est fréquent que l'on veuille

traduire les variations d'une propriété en fonction de la concentration des divers constituants[10]. C'est le cas du triangle de Féret (Figure II.7) ou l'on souhaite déterminer la compacité en tout point, caractérisée par les proportions du mélange qu'il représente.

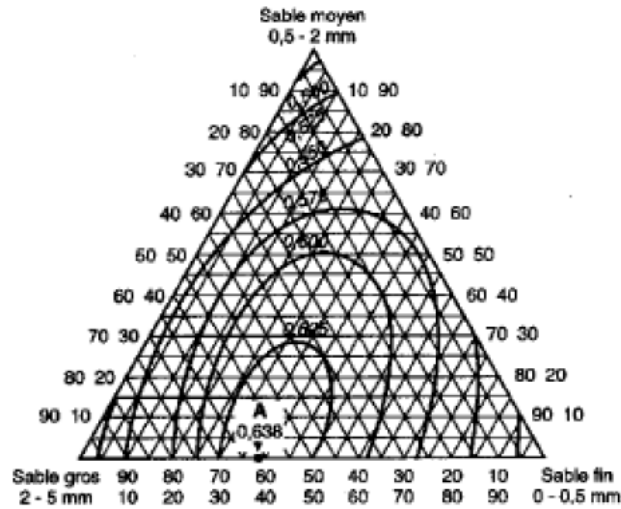


Figure II.7. Triangle de Féret, 1892 [7]

Les sommets de triangle représentent chacun des facteurs. Les courbes d'iso-compacité sont représentées ici et la compacité maximale est obtenue en point A.

II.5.4 Les plans hybrides

Les plans hybrides ont été mis au point par Roquemore [11]. Leur objectif est d'essayer d'approcher deux critères d'optimalité, celui d'orthogonalité et celui d'iso-variance par rotation. L'orthogonalité garantit la meilleure précision possible sur les coefficients du modèle et l'iso-variance par rotation conduit à des erreurs de prévisions identiques à une même distance du centre du domaine. Si l'expérimentateur recherche ces deux propriétés, il doit penser à utiliser un plan hybride.

Les plans hybrides se désignent de la manière suivante : on indique le nombre de facteurs, puis le nombre de points expérimentaux dont un seul point central, enfin une lettre pour distinguer deux plans ayant le même nombre de facteurs et le même nombre de points expérimentaux.

II.6 Modélisation par la méthode des plans de mélange

On spécifie dans cette partie les plans de mélange, car c'est la méthode utilisée dans notre cas et qui fait un intérêt particulier dans notre formulation des bétons. Commencant par la contrainte fondamentale des mélanges, qui impose de faire appel aux modèles mathématiques. En passant par une étude générale des plans de mélange sous ses différents aspects, pour finir par une illustration graphique des résultats qui permettent de visualiser l'intérêt d'utilisation des plans de mélange [9, 13].

II.6.1. Contrainte fondamentale des mélanges

Les plans d'expérience classique ont l'avantage de l'indépendance des facteurs l'un de l'autre, cela signifie que le choix du niveau d'un facteur reste libre, vu qu'il est indépendant des autres facteurs.

Dans le cas d'un mélange, les facteurs sont les des constituants du mélange, le pourcentage du dernier constituant est imposé par la somme des pourcentages des premiers composés du mélange. Dans cette situation les facteurs ne sont pas indépendants.

Si l'on note x_i la teneur en constituant i , la somme des teneurs de tous les constituants du mélange satisfait à la relation :

$$\sum_{i=1}^n x_i = 100\% \quad (II.3)$$

La teneur de chaque constituant reste comprise entre 0 et 100 %. Lorsqu'on augmente la teneur de l'un des constituants, la teneur des autres est automatiquement diminuée pour que la somme de toutes les teneurs reste égale à 100 % [3].

Si, au lieu d'utiliser les pourcentages, on ramène la somme des teneurs des différents constituants à l'unité, on écrira :

$$\sum_{i=1}^n x_i = 1 \quad (II.4)$$

Cette relation s'appelle la *contrainte fondamentale des mélanges*. C'est à cause de cette contrainte que les mélanges doivent être étudiés à part car les représentations géométriques des plans de mélanges sont différentes des représentations utilisées pour les plans d'expériences classiques et les modèles mathématiques sont eux aussi profondément modifiés [3].

II.6.2 Représentation géométrique des plans de mélange

II.6.2.1 Diagramme de mélange binaire

La composition des mélanges à deux constituants (Figure II.8) est représentée par les points du segment de droite (AB) [3] :

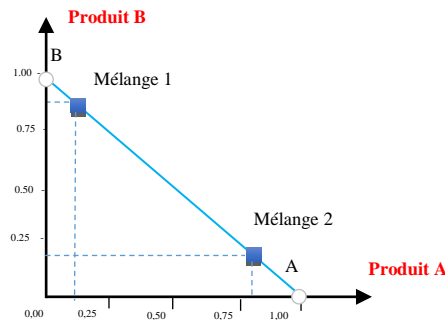


Figure II.8. Représentation d'un mélange à deux constituants.

Le produit pur A est représenté par l'une des extrémités du segment AB. Le produit B est représenté par l'autre extrémité. Ce segment porte une double graduation (Figure II.9), celle des teneurs du premier produit et celle des teneurs du second produit. La lecture de la composition des mélanges sur ce segment demande un certain apprentissage. Elle se lit à la fois de droite à gauche et de gauche à droite [3].

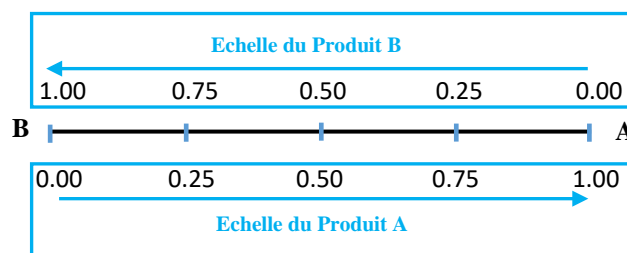


Figure II.9. Représentation des mélanges à deux constituants sur un segment de droite.

Les échelles se lisent, l'une dans un sens, l'autre dans l'autre sens. La somme des teneurs, en un point de l'échelle, est égale à l'unité.

II.6.2.2 Diagramme de mélange ternaire

Dans le cas d'un mélange ternaire, c'est un triangle équilatéral (Figure II.10) qui représente les mélanges, les produits purs sont aux sommets du triangle. À savoir que même sur ce plan les mélanges à deux constituants sont représentables sur l'un des côtés du triangle.

Par exemple le côté gauche du triangle représente le mélange des deux produits A et B, la composition de chaque produit se lit sur chaque côté du triangle [3] .

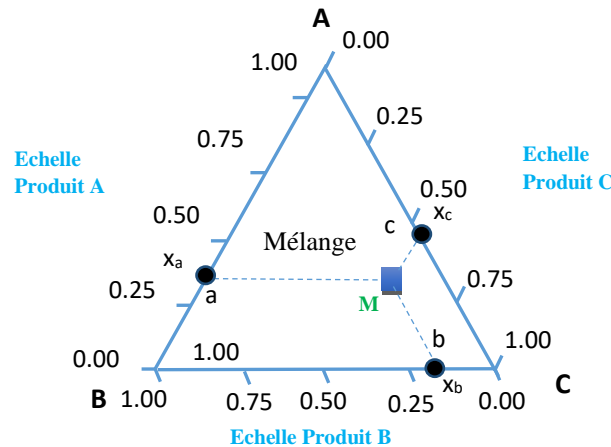


Figure II.10. Représentation des mélanges à trois constituants (triangle équilatéral).

Chaque point dans la surface du triangle présente une possible combinaison du mélange, la propriété géométrique du triangle équilatéral satisfait la condition de la contrainte fondamentale des mélanges, donc la somme des trois constituants sur n'importe quel point sur la surface du triangle est égale à l'unité [3].

Le système de coordonnées triangulaire permet de visualiser les relations entre les trois composantes d'un mélange. Ce diagramme ternaire utilisé indique le zéro (0) comme la valeur minimale de chaque composante A, B, C, 1 représentant la valeur maximale.

II.6.2.3 Diagramme de mélange quaternaire

La représentation des mélanges à quatre constituants est une tétrade régulière, (Figure II.11), Au-delà de quatre constituants, la représentation géométrique n'est plus possible. On utilise alors uniquement la représentation en tableaux [3].

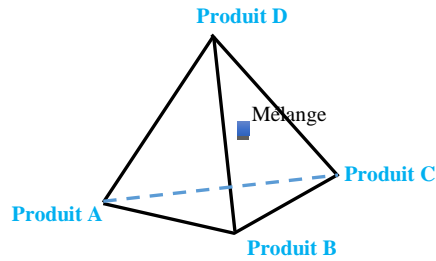


Figure II.11. Représentation des mélanges à quatre constituants.

Tels que les mélanges ternaires, les produits purs sont au sommet de la tétrade, les mélanges binaires sont représentés sur les côtés, alors que les mélanges ternaires seront représentés par les faces de la tétrade qui sont des triangles équilatéraux.

II.6.3. Types des plans de mélanges classiques

Les plans de mélanges classiques supposent que les produits purs ont la propriété d'usage recherchée et qu'il n'y a aucune contrainte qui pèse sur eux.

On distingue trois types de plan de mélange selon la représentation par point de composition, ainsi l'emplacement de ces points dans le triangle équilatéral :

- les plans en réseaux,
- les plans de mélanges centrés,
- les plans de mélanges centrés augmentés.

II.6.3.1 Plans en réseaux

Où les points sont régulièrement repartis dans l'espace d'étude (en anglais ; *simplex lattice designs*).

Le plus simple des plans de mélange en réseaux ne contient que les trois points aux sommets du triangle équilatéral (donc trois produits purs).

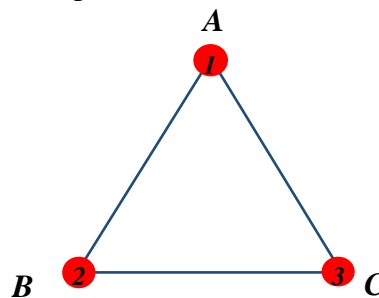


Figure II.12. Plan de mélange ne comportant que les trois produits purs.

Le plan, de plus en plus raffiné serrés, le côté de triangle est divisé par un nombre m plus élevé. On peut construire ainsi des réseaux de pas égale à $1/m$, et les coordonnées des points expérimentaux sont $0, 1/m, 2/m, 3/m$ jusqu'à $m/m = 1$.

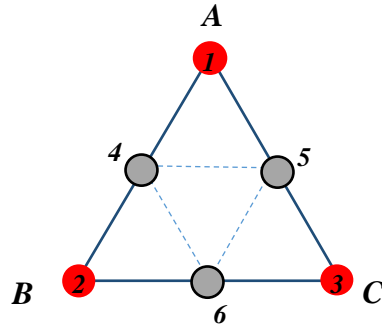


Figure II.13. Plan de mélanges en réseaux (*Simplex lattice designs*) comportant les trois produits purs et les mélanges moitié-moitié.

La notation $\{m, n\}$ utilisé pour nommer un plan de mélange veut dire qu'on a :

m : constituant de mélange,

n : représente le diviseur utilisé pour établir le pas du réseau.

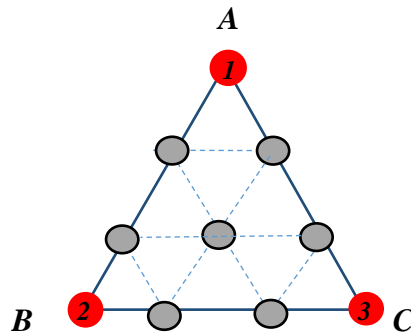


Figure II.14. Plan de mélanges en réseaux (*Simplex-lattice designs*) comportant les trois produits purs, les mélanges $1/3-2/3$ et le mélange $1/3-1/3-1/3$, ce plan est noté $\{3, 3\}$.

Le nombre d'expériences à préparer et étudier est calcul par la relation suivante :

$$C_{q+m-1}^m = \frac{(q+m-1)!}{(m)!(q-1)!} \quad (II.5)$$

Où :

q : est le nombre de facteurs (le nombre de constituants du mélange)

m : le nombre de niveaux.

II.6.3.2 Plans de mélanges centrés

Les plans de mélange centrés (en anglais ; *Simplex-centroid designs*) sont marqués par la présence indispensable d'un point capital au centre de gravité du triangle équilatérale [13], l'utilisation de ce type de plan de mélange produit trois type de composition qui sont :

- trois produits purs (les sommets du triangle),
- trois mélanges binaires contenant moitié-moitié de deux produits purs,
- un mélange ternaires contenant un tiers de chaque produit pur (le point central).

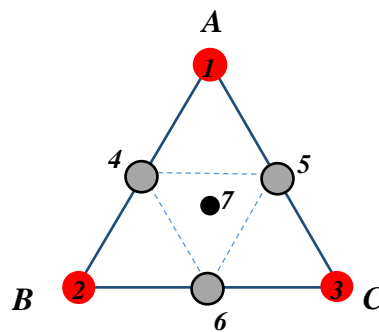


Figure II.15. Plan de mélanges centré (*Simplex-centroid designs*) comportant les trois produits purs et les mélanges moitié-moitié et le mélange équipportionnel des trois produits purs.

Pour un plan de mélange centré à q constituants, le nombre N de compositions à étudier est égale a :

$$N = 2^q - 1 \quad (II.6)$$

II.6.3.3 Plans de mélanges centrés augmentés

Les plans de mélanges centrés augmentés (en anglais : *Augmented Simplex-centroid designs*) sont des plans de mélanges centrés qui possède en plus des points expérimentaux du modèle précédant trois nouveau points placés au centres de gravité des simplex unitaires comme indique la figure II.16.

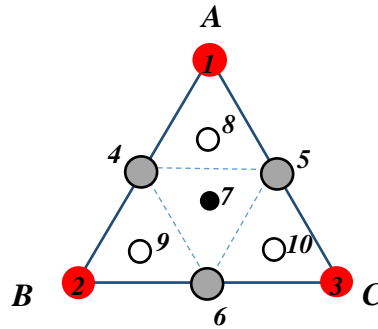


Figure II.16. Plan de mélanges centré augmenté (*Augmented Simplex-centroid designs*) comportant les trois produits purs, les mélanges moitié-moitié, le mélange équiportionnel des trois produits purs et les mélanges situés aux centres de gravité des simplex unitaires.

II.6.4 Modèles mathématiques des plans de mélanges

L'analyse mathématique de la fonction « f » donne un développement polynomial d'ordre plus ou moins élevé des « x_i », l'ordre du polynôme dépend du degré de précision souhaité.

II.6.4.1 Modèle du premier degré

Les constituants d'un mélange sont les facteurs du plan de mélange et les variations des réponses sont relatives aux variations de ces facteurs. Dans un premier lieu, on a opté à un modèle des plans d'expériences classiques, auquel les facteurs sont indépendants, ensuite on applique la condition de la contrainte fondamentale.

Par exemple, on traite un plan de mélange à trois facteurs (x_1, x_2, x_3), on pourrait écrire en un point donné :

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 \quad (II.7)$$

Le domaine expérimental est donc contraint par la relation suivante :

$$x_1 + x_2 + x_3 = 1 \quad (II.8)$$

La relation {II.7} peut alors s'écrire :

$$y = a_0(x_1 + x_2 + x_3) + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 \quad (II.9)$$

Le regroupement des coefficients donne :

$$y = (a_0 + a_1)x_1 + (a_0 + a_2)x_2 + (a_0 + a_3)x_3 \quad (II.10)$$

Ce modèle ne comporte plus de terme constant. Si l'on change de notation et que l'on pose :

$$b_1 = a_0 + a_1, \quad b_2 = a_0 + a_2, \quad b_3 = a_0 + a_3 \quad (II.11)$$

Le modèle prend alors la forme suivante :

$$y = b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 \quad (II.12)$$

La disparition de terme constant est la conséquence directe de la contrainte fondamentale des mélanges.

II.6.4.2 Modèle du second degré

Le modèle mathématique du second degré d'un plan d'expérience classique comprend les termes du premier degré, les termes rectangles et les termes carrés.

Pour un mélange à trois constituants, on pourrait écrire sachant qu'il n'y a pas de constante :

$$y = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{33}x_3^2 \quad (II.13)$$

Prenons en compte la contrainte fondamentale des mélanges :

$$x_1 + x_2 + x_3 = 1 \quad (II.14)$$

Que l'on peut écrire :

$$x_1 = 1 - (x_2 + x_3) \quad (II.15)$$

Multiplions chaque membre par x_1 :

$$x_1^2 = x_1(1 - (x_2 + x_3)) \quad (II.16)$$

$$x_1^2 = x_1 - x_1x_2 - x_1x_3 \quad (II.17)$$

On remarque que les termes carrés sont disparus de la relation initiale, et ils sont converti en un terme du premier degré et en deux termes rectangles.

$$y = b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 \quad (II.18)$$

II.6.4.3 Modèle du troisième degré

Si on applique la contrainte fondamentale sur un polynôme de troisième degré à trois constituants, on aura un nouveau modèle mathématique des plans des mélanges, appelé *modèle cubique complet*, qui est le suivant :

$$y = b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b'_{12}x_1x_2(x_1 - x_2) + b'_{13}x_1x_3(x_1 - x_3) + b'_{23}x_2x_3(x_2 - x_3) + b'_{123}x_1x_2x_3 \quad (II. 19)$$

Le modèle simplifié appelé *modèle cubique restreint*, du mélange précédent (mélange de trois constituants) ne comprend que les termes du premier degré, les termes rectangles et le produit des trois constituants. Il s'écrit sous la forme suivante :

$$y = b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 \quad (II. 20)$$

II.7. Validation du modèle postulé

Un modèle postulé doit surement être validé statistiquement avant d'être utilisé. Une fois les coefficients sont identifiés, il est recommandé de s'assurer de la validité du modèle obtenu dans le domaine concerné.

II.7.1 Analyse de la variance :

L'analyse de la variance est une technique statistique permettant de savoir si une ou plusieurs variables dépendantes (variables à expliquer) sont en relation avec une ou plusieurs variables dites indépendantes (variables explicatives).

La forme générale de l'analyse de variance repose sur le test de Fisher et donc sur la normalité des distributions et l'indépendance des échantillons.

La première étape de l'analyse de la variance consiste à expliquer la variance totale sur l'ensemble des échantillons en fonction de la variance due aux facteurs (la variance expliquée par le modèle) et de la variance résiduelle (la variance non expliquée par le modèle). Le modèle sera explicatif si la valeur de p-value est inférieure au seuil de risque 5%.

La deuxième décomposition de la variance en deux source d'erreur permet de calculer Le « Manque d'ajustement » ou (en anglais : *lack of fit*) qui mesure la différence qui existe entre le modèle a priori (modèle postulé) qui a été choisi par l'expérimentateur et le modèle réel qui

régit le phénomène étudié. Le modèle sera statistiquement accepté (pas de manque d'ajustement) si la valeur de p-value est supérieure au seuil de risque 5% [8].

Pour réaliser la table de l'ANOVA (voir tableau II.2) il faut :

- Déterminer les sources de variation
- Calculer les degrés de liberté (ddl) de chaque source
- Calculer les sommes des carrés des écarts (SCE) de chaque source
- Calculer les carrés moyens (CM) de chaque source

La table d'ANOVA permet de résumer les calculs nécessaires :

Tableau II.2. Exemple de la table d'analyse de la variance.

Source de la variance	Sommes des carrés des écarts	Degrés de liberté	Carré moyen	F	P-value
Modèle	$SCE_{facteur}$	$DDL_{facteur}$	$S_{facteur}^2 = \frac{SCE_{facteur}}{DDL_{facteur}}$	$F = \frac{S_{facteur}^2}{S_{résidu}^2}$	$P(F > F_{Obs})$
Résiduelle	$SCE_{résidu}$	$DDL_{résidu}$	$S_{résidu}^2 = \frac{SCE_{résidu}}{DDL_{résidu}}$		
Total	SCE_{total}	DDL_{total}			

II.7.2 Coefficient de détermination (R^2) :

L'analyse de la variance permet de calculer aussi une statistique très utile nommé coefficient de détermination : R^2 . Cette statistique est le rapport de la somme des carrés des réponses calculées à la somme des carrés des réponses mesurées :

$$R^2 = \frac{\sum(\hat{y} - \bar{y})^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2} \quad (II. 21)$$

Si le modèle permet de retrouver exactement la valeur des réponses mesurées, la somme des carrés des réponses calculées est égale à la somme des carrés des réponses mesurées. Le R^2 est égal à 1.

Si le modèle fournit des réponses calculées égales à la moyenne, la somme des carrés des réponses calculées est égale à 0. Le R^2 est égal à 0. On dit que le modèle n'a pas de puissance d'explication.

- Le R^2 est donc une mesure de la qualité du modèle. S'il est égal à 1, le modèle permet de retrouver la valeur des réponses mesurées. S'il est égal à 0, le modèle n'en dit pas plus que la moyenne des réponses.
- Le R^2 joue véritablement son rôle d'indicateur de la qualité du modèle à condition que les résidus ne soient pas nuls. Si les résidus sont nuls, le R^2 est égal à 1 quelle que soit la qualité du modèle. On observe un tel cas lorsqu'il n'y a pas de degrés de liberté.

II.7.3 Analyse des Résidus :

Les résidus ou " erreurs observées " sont définis comme étant les différences entre les valeurs observées et les valeurs estimées par un modèle de régression, ils ont la particularité de représenter la partie non expliquée par l'équation de régression.

On les note communément comme suit :

$$e_i = y_i - \hat{y}_i \quad (II. 22)$$

L'analyse des résidus a pour objectif de tester la validité d'un modèle de régression. Elle permet de déceler les défaillances d'un modèle, c'est pourquoi il est nécessaire de l'effectuer avant toute analyse de régression. Les méthodes d'analyse des résidus, ou des résidus réduits sont principalement des méthodes d'analyse graphique.

Pour détecter la présence d'une défaillance dans le modèle considéré, deux graphiques peuvent être utilisés :

- Courbe des résidus en fonction des valeurs ajustées de Y
- Courbe des résidus en fonction des valeurs des régresseurs .

L'analyse de ces Courbe est assez simple. En effet, il s'agit de vérifier que la représentation des résidus ne présente aucune structure particulière.

II.7.4 Signification des effets de facteurs :

Le calcul d'un effet de facteur ou d'une interaction entre facteurs fait intervenir l'ensemble des résultats de mesure. Or, ces derniers sont collectés tout le long de la campagne expérimentale, ils sont entachés d'erreurs de mesure. Et que seul l'écart type de mesure permet son estimation.

Après avoir établi le modèle mathématique, il s'agit de savoir si les coefficients du modèle (facteurs et interactions) sont significativement différents de zéro. En effet, des valeurs mathématiques voisines de zéro peuvent être la conséquence de la dispersion expérimentale autour d'une valeur moyenne nulle. On va donc comparer la valeur du coefficient à l'erreur étalon de mesure. Si ces deux valeurs sont du même ordre de grandeur, on conclura à la nullité de l'effet (ou de l'interaction) envisagé. Un **test de Student** est réalisé pour vérifier la signification de ces effets en comparant la valeur de **p-value** (probabilité qu'un coefficient soit négligeable) avec le seuil de risque 5%.

II.7.5 Exploitation du modèle :

Le modèle final retenu sera exploité par intermédiaire des surfaces de réponses, courbes d'iso-réponses et fonction de désirabilité afin de savoir l'effet de chaque facteur, ainsi que les interactions entre les constituants du mélange étudié.

Bibliographie :

- [1]. Goupy J. (2000). *Modélisation par les plans d'expériences*, Technique de l'ingénieur R 275.
- [2]. Copyright Philippe (2015) ALEXIS, Cours de plan d'expérience 'forme littérale'. 15/12/2015, 2/35.
- [3]. Goupy J. et Creighton L. (2006). *Introduction aux plans d'expériences*, Dunod, Paris.
- [4]. Kimouche Karima, Gheribi Z. Thèse de Magistère, (2008). *Etude de quelques plans d'expériences associées aux surfaces de réponse*. Université Mentouri Constantine, Faculté des sciences exactes, Département de mathématiques
- [5]. Simeonov, E., Tsibranska, I., Minchev, A. (1999). Solid – liquid extraction from plants experimental kinetics and modeling, *Chem. Eng. Journal*, 73.
- [6]. N. Bouzouita, F., Kachouri, M. Hamdi., M.M. Chaabounr., R. Ben Aissa., S. Zgoulli, P. Thonart., A. Carlier., M. Marlier et G.C. Lognay. J. (2005). Volatile Constituents and Antimicrobial Activity of *Lavandulastoechas* L. Oil from Tunisia. *Essent. Oil Res.* 17,
- [7]. Ayad.M., yassine.B. (2013). *Modélisation des bétons ordinaires par des plans d'expériences*, université aboubekr belkaid – tlemcen faculté de technologie, département de génie civil. 48-75, juin 2013.
- [8]. BARON J., OLLIVIER J.P. (1996) ; *Les bétons bases et données pour leur formulation*, Edition Eyrolles, Paris, 522 p.
- [9]. Boua et al .J. *Appl. Biosci.* (2013). Criblage phytochimique et érectile de *Turraea Hetero-phylla* de Côte d'Ivoire *Journal of Applied Biosciences* 68.
- [10]. Goupy J. (2003) *Application des plans d'expériences*, Dunod, Paris.
- [11]. Sado G. et Sado M.C. (1991) ; *Les plans d'expériences. De l'expérimentation à l'assurance qualité*, Afnor Technique Ed., Paris.
- [12]. Brereton.R, (2006). Consequences of sample size, variable selection, and model validation and optimisation for predicting classification ability from analytical data. *Trends in analytical chemistry*, 2006, 25 11-1103-1111.
- [13]. Scheffé, H, (1958). Experiments with mixtures, *Journal of the Royal Statistical Society, series B (methodological)*, Blackwell publishing, vol. 20, no 2, 1958, p. 344-360.

- [14]. Scheffe, H. (1963). Simplex-centroid designs for experiments with mixtures. *J. Royal Statistical society*, B-25, 235-263.
- [15]. Cornell, J.A. (2002). *Experiments with mixtures designs, models and analysis of mixture data*, John Willey and Sons, New York.

III .1. Introduction

Le travail expérimental mené a été établi dans le but d'étudier le comportement physico-mécanique d'un béton fait à base d'agrégats recyclés de déchets de brique et des débris de béton démolis. Les granulats utilisés dans les travaux de construction doivent répondre à des impératifs de qualité et à des caractéristiques propres à chaque usage.

Nous avons axé notre recherche sur l'influence de la substitution de sable des déchets de brique et le sable recyclé issu du déchet de démolition, d'une classe granulaire 0-5 mm, sur les propriétés physico-mécaniques et la durabilité des bétons.

Il est nécessaire d'en établir les différentes caractéristiques par différents essais de laboratoire. Pour ce faire, nous avons procédé à la caractérisation des granulats entrant dans la composition des mélanges du béton recyclé. L'objectif de cette partie expérimental, est la caractérisation des granulats utilisés et les techniques expérimentales d'identification des propriétés des matériaux qui rentre dans la composition du béton, Ainsi que tous les essais sont normalisés et réalisés dans le cadre des normes Afnor au Laboratoire Nationale de l'Habitat et de la Construction LNHC de Bejaia, ensuite au niveau du Centre Etude et de Service Technologique de l'Industrie des Matériaux de constructions CETIM de Boumerdes.

III.2. Matériaux utilisés et Essais :

Les matériaux utilisés dans cette recherche sont des matériaux locaux, On a choisi de concevoir trois classes granulaires 0/5 ; 3/8 et 8/15, Celles-ci permettent d'avoir des bétons ternaires avec un étendu granulaire meilleur et une formulation adaptée aux exigences voulues "Consistance et Résistance" (Sánchez et al., 2004 ; Ravindrarajah et al., 2001).

III.2.1. Le sable :

Le matériau « sable » utilisé est un mélange composé de sable alluvionnaire avec substitution des granulats de brique et de béton concassés à différent pourcentage, Afin de récupérer ces matériaux recyclés, on prépare 03 types de granulat :

✓ Sable de type SA :

Sable naturel Alluvionnaire 0/5 (SA) provenant de la commune de M'chedallah à Bejaia. Pour fabriquer la série des éprouvettes du béton qui servent comme un témoin, et même dans les bétons recyclés en différents pourcentages.

✓ **Sable de type SDBt:**

Des éprouvettes cylindrique 16x32 cm² en béton ordinaire confectionnés sur chantiers, avec des granulats naturels des matériaux locaux (dosage en ciment 350 kg/m³), sont d'abord testées en compression à l'âge de 28jour (qui donne une résistance à la compression entre 25 MPa et 30 MPa), et ensuite pré-concassés manuellement afin d'avoir des granulats de taille qui convient au dimension l'entrée de notre machine, ces granulats de béton sont finalement concassés à l'aide d'un concasseur à mâchoires. Le béton concassé est ensuite tamisé pour donner des granulats destinés à la fabrication des bétons à bases des granulats recyclés.

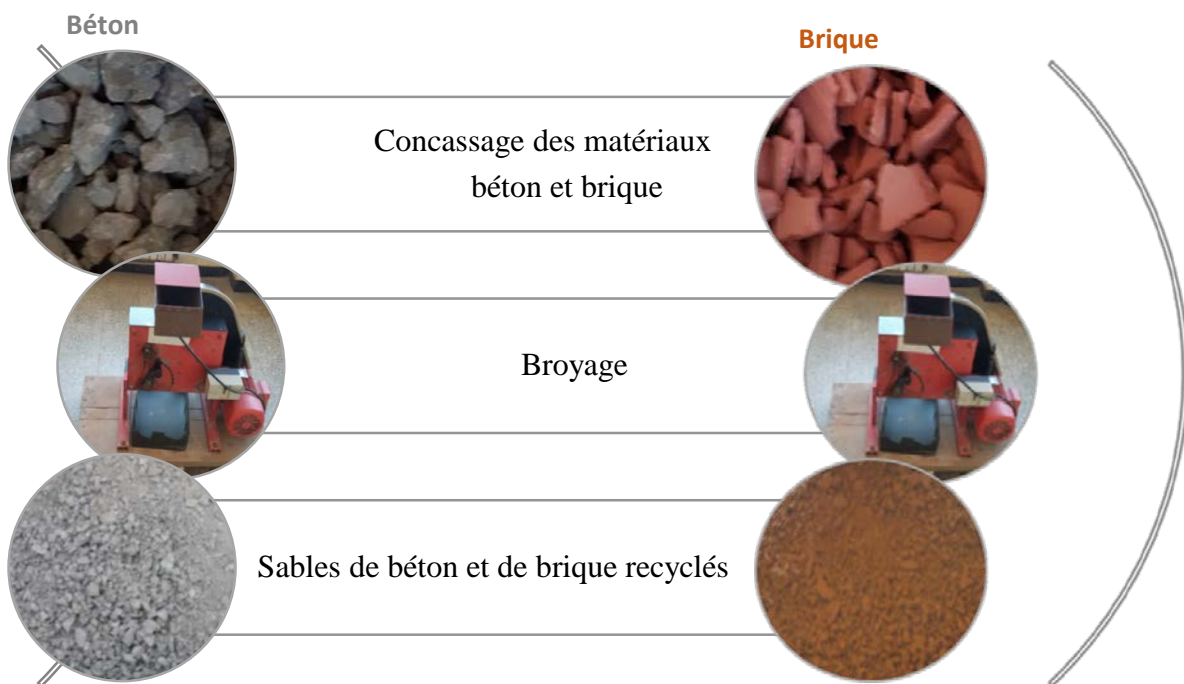


Figure III.1. Préparation des matériaux recyclés.

Le béton concassé est ensuite tamisé (Essai granulométrique 0/5) pour donner des granulats de sable recyclés issu du déchet de démolition du béton (SDBt) destinés à la fabrication des bétons recyclés.

✓ **Sable de type SDBr :**

Les sables de déchets de brique recyclés 0/5 (SDBr) produits par le concassage et le tamisage de la brique cuite de la briqueterie locale de la wilaya de Batna moyennant un pré-concassage manuelle et au concasseur à mâchoire.

Les granulats recyclés à partir des débris de concassage du béton et de déchet de brique servent à la confection d'un béton BHP à base d'agrégats recyclés.

III.2.1.1. Analyse granulométrique NF EN 933-1

L'analyse granulométrique permet de mesurer la distribution dimensionnelle en poids des différents éléments constituant le sable.



Figure III.2. Analyse granulométrique des matériaux recyclés.

Tableau III.1. L'analyse granulométrique du sable alluvionnaire.

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
6,3	3	3	1,15	98,85
4	0,4	27	10,38	89,62
2	23,6	95	36,54	63,46
1	97,8	152	58,46	41,54
0,5	263,8	196	75,38	24,62
0,25	439,1	226	86,92	13,08
0,125	153	254	97,69	2,31
0,063	21,5	260	100,00	0,00

Les trois courbes granulométriques des sables utilisés (SA, SDBt, SDBr), sont présentée graphiquement dans la figure III.7, on constate que la granulométrie de notre sable alluvionnaire est continue, étalée et assez régulière, ce qui représente une répartition assez homogène des classes granulaires. Elle est entièrement enveloppée par le fuseau recommandé pour les bétons, donc c'est un sable acceptable pour l'utilisation dans la confection des bétons.

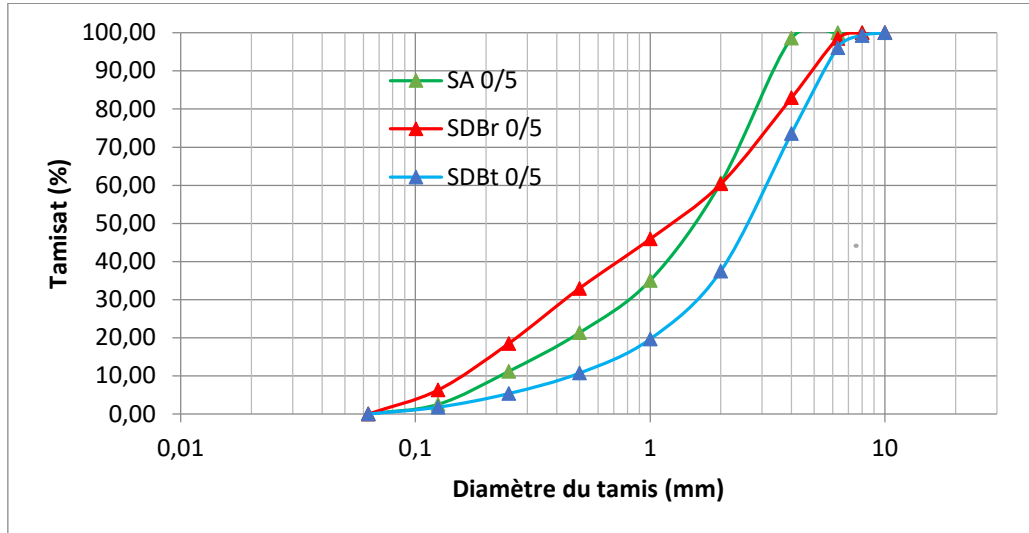


Figure III.3. Courbes granulométriques des trois types de sable utilisés.

On remarque aussi à partir des courbes granulométriques que le sable recyclé SDBt est en effet plutôt grossier. Les principaux éléments sont de petits gravions avec un pourcentage de refus élevé, et d'une faible proportion de sable et une quantité importante de matières fines de pâte de ciment. Ce qui donne une courbe granulométrique au-dessous de la courbe du sable naturel.

La granulométrie du sable recyclé SDBr indique que ce sable a un caractère normal car la courbe SDBr est constamment proche de la courbe SA, et la remarque importante à noter est la distribution ne présente pas de discontinuité des poids de refus partiels ce qui confirme la granulométrie continue.

III.2.1.2. La masse volumique absolue et apparente NF EN 1097-6

Le tableau III.2 présente également ses caractéristiques physiques des trois types de sable :

Tableau III.2. Caractéristiques physiques des sables utilisés.

Caractéristique	SA	SDBt	SDBr
Module de finesse	2,68	4,51	3,53
Densité absolue (g/cm ³)	2,68	2,574	2,322
Densité apparente (g/cm ³)	1,53	1,230	1,131
Equivalent de sable (%)	75,89	75,93	88,22
Absorption d'eau (%)	1	8	14

Tableau II.4. Analyse granulométrique du gravier de classe 8/15

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
20	9,1	9,1	0,2275	99,7725
16	530,7	539,8	13,495	86,505
12,5	1421,9	1961,7	49,0425	50,9575
10	1011,7	2973,4	74,335	25,665
8	674,7	3648,1	91,2025	8,7975
6,3	285,5	3933,6	98,34	1,66
5	40,9	3974,5	99,3625	0,6375
3,15	5,9	3980,4	99,51	0,49

III.2.2. Le gravier :

III.2.2.1. Les masses volumiques apparentes et absolues NF EN 12620

Nous avons déterminé les masses volumiques apparentes et absolues des graviers conformément à la norme NF EN 12620. La masse volumique apparente est comprise entre 1190 kg/m³ et 1600 kg/m³ et la masse volumique absolue est nettement plus élevée et est comprise entre 2550 kg/m³ et 2620 kg/m³. Les résultats des masses volumiques obtenus pour les différents graviers, sont récapitulés sur le tableau suivant :

Tableau III.5. Les Caractéristiques physiques des graviers utilisés

Caractéristiques physiques	Classe du Gravier	
	3/8	8/15
M _{vapp} (g/cm ³)	1,19	1,60
M _{vabs} (g/cm ³)	2,55	2,62
Coefficients d'absorptions Ab (%)	0,04	0,03



Figure III.7. Essai de la masse volumique apparente et absolue du gravier

III.2.2.2. Coefficient d'absorption NF EN 1097-6

Le coefficient d'absorption est défini comme le rapport d'augmentation de la masse d'un échantillon imbibé par l'eau, à la masse sèche de cet échantillon

Le coefficient d'absorption est obtenu par : $Ab = \frac{Ma - Ms}{Ms}$

Ms : masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105 C°.

Ma : masse de l'échantillon imbibé.

Les courbes granulométriques des granulats naturels réalisées selon la norme NF EN 933-3, elles sont présentées sur la figure suivante :

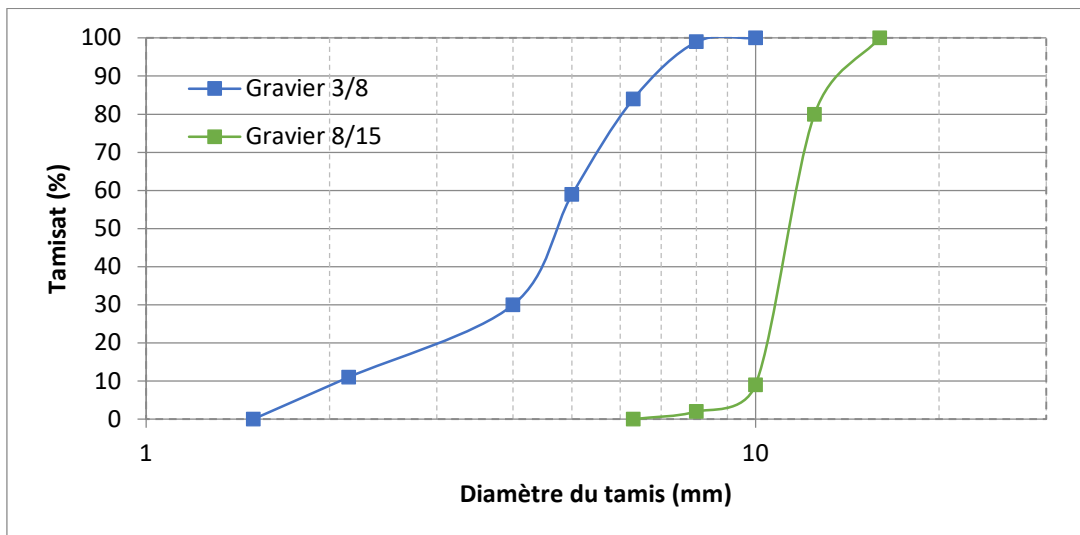


Figure III.8. Analyses granulométriques des deux fractions du gravier (G3/8, G8/15) utilisés.

III.2.3. Le ciment :

Le ciment utilisé est un ciment gris de type CEM I 52,5 N à hautes résistances à court terme et courante, le CEM I est composé généralement de :

- 80% à 94% de clinker.
- 6% à 20% de laitier de haut fourneau ou de calcaire.
- 0% à 5% de constituants secondaires.
- La présence d'une faible quantité de sulfate de calcium assure la régularité de la prise.

Les analyses physiques et mécaniques du ciment sont représentées dans le tableau III.6, et ses caractéristiques chimiques sont données dans les tableaux III.7.

Le détail de ces caractéristiques du ciment sont représentés sur la fiche technique de l'annexe.

Tableau III.6. Propriétés physico-mécanique du ciment utilisé.

Caractéristiques	Ciment grise 52,5	
Masse volumique absolue (kg/m ³)	3150	
Masse volumique apparente (kg/m ³)	1180	
Surface spécifique (A) (cm ² /g)	4950	
Consistance normale (%)	25	
Début de prise (mn)	1 h 45 mn	
Fin de prise (mn)	2 h 60 mn	
Résistance à la compression	2 jours	30,69
	28 jours	57,51

Tableau III.7. Analyse chimique de ciment et du fumé de silice utilisés

Echantillon	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	CaO %	MgO %	SO ₃ %	Na ₂ O %	K ₂ O %	P.A.F. %
Ciment (C)	21.70	4.27	4.83	64.11	1.35	1.59	0.08	0.32	0.99
Fumée de Silice (FS)	93.17	0.60	1.25	1.40	1.02	2.30	1.00	-	-

III.2.4. Fumé de silice

La densité apparente de la fumée de silice est de 650 kg/m^3 , la densité réelle est de 2240 kg/m^3 et sa surface spécifique Blaine est de $23000 \text{ cm}^2/\text{g}$. Le tableau précédant (tableau III.7) présente la composition chimique des fumées de silice (FS).

III.2.5. L'eau de gâchage

C'est l'eau de robinet de laboratoire des travaux de LNHC de Bejaia. De la source de Touja. L'analyse chimique de l'eau a été effectuée au laboratoire de traitement des eaux de Béjaia, l'analyse montre que la potabilité chimique est de bonne à passable. Les détails des analyses chimiques sont récapitulés dans le tableau III.8.

Tableau III.8. Analyse chimique de l'eau utilisée

Espèces chimiques	Quantité (mg/l)
Ca^+	119,04
Mg^{+2}	32,93
Na^+	144,9
K^+	5,69
Cl^-	169,96
SO_4^{-2}	420
HCO_3^-	153,8
NO_3^-	11,07

II.2.6 Adjuvant

MEDAFLOW 30 superplastifiant haut réducteur d'eau à faible rapport E/C pour les hautes performances et le long maintien d'ouvrabilité.

Le MEDAFLOW 30 est un adjuvant d'une nouvelle génération chimique à base d'éther poly carboxylique modifié. Cet adjuvant a été développé pour l'utilisation dans béton ou haute qualité durabilité, performance et ouvrabilité sont requises, tout en améliorant considérablement la fluidité du béton. Il permet aussi d'augmenter les résistances mécaniques au jeune âge et à long terme. La plage d'utilisation recommandée est fixée par la fiche

technique de 0,5 à 2% du poids du ciment. Les caractéristiques physicochimiques de cet adjuvant données par le fabricant sont indiquées dans le (tableau.III.9) suivant :

Tableau III.9 : Caractéristique du super-plastifiant utilisé.

Propriétés	Adjuvant
Densité	1.06
Extrait sec	30.20 ±1.3%
PH	6.00 ±0.01
Couleur	Brun clair
Forme	Liquide
Teneur en ion cl	0.1%
Teneur en Na ₂ O	≤ 1%

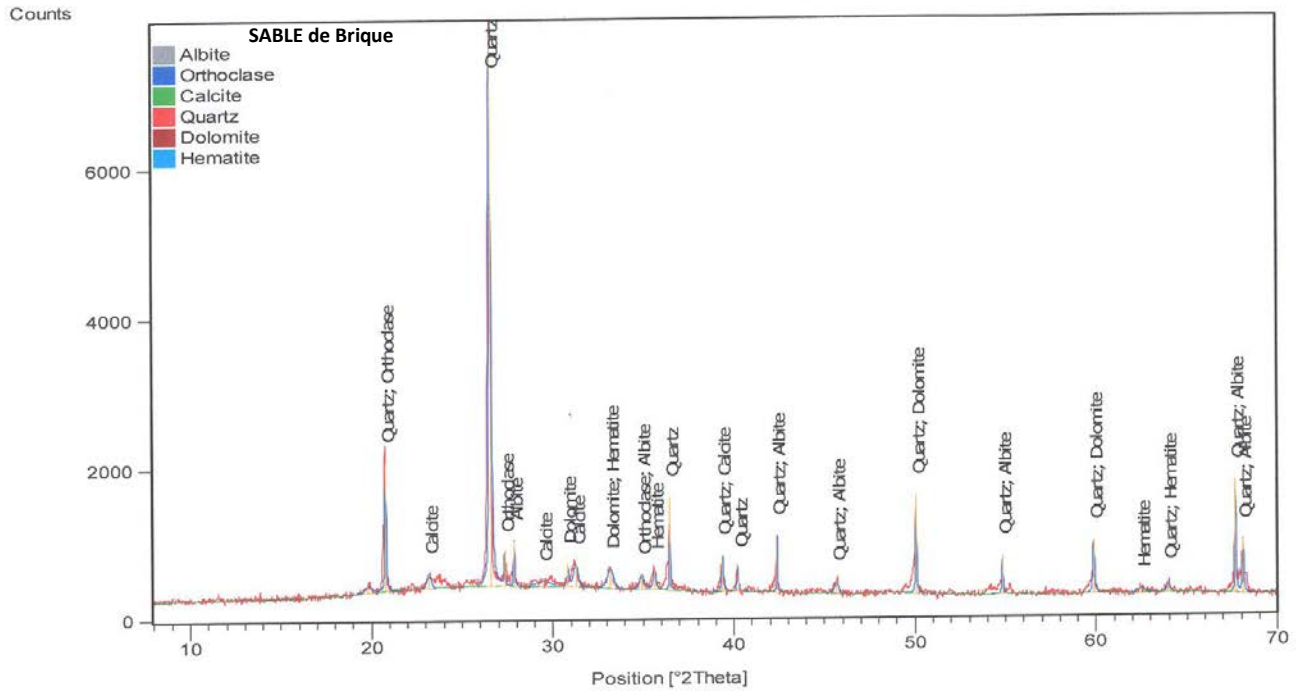


Figure III.11. Diffractogramme X de la poudre du sable du déchet de brique.

Tableau III.10. Composition minéralogique estimative semi quantitative des trois sables

	Sable Alluvionnaire	Sable de déchet de béton	Sable de déchet de brique
Quartz	44 %	11 %	60 %
Calcite	34 %	82 %	09 %
Portlandite	/	01 %	
Dolomite	05 %	04 %	09 %
Albite	05 %	/	04 %
Illite	03%	/	/
Kaolinite	06%	/	/
Minéraux ferrugineux	04%	01%	06 %
Orthoclase (Feldspathes K)	/	/	12 %
Autres	/	01%	/

Tableau III.11. Analyse chimique élémentaires effectuées par Fluorescence X

Echantillon	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	CaO %	MgO %	SO ₃ %	K ₂ O %	Na ₂ O %	P ₂ O ₂ %	TiO ₂ %
Sable alluvionnaire	51.15	4.28	3.92	20.60	1.05	0.07	0.33	0.42	0.09	0.26
Sable de déchet de béton	13.43	1.00	1.03	47.89	0.88	0.42	0.01	0.01	0.05	0.05
Sable de déchet de brique	63.62	16.26	6.01	7.41	1.87	0.23	2.11	0.41	0.27	0.75

La portlandite issue de pâtes de ciment est visible sur tous les diagrammes du sable de béton. Toutefois, leurs pics restent dans des valeurs timides non considérablement dans les pâtes avec substitution de sable de béton. On note ainsi la présence d'un pic important de raies de diffraction X du calcite (calcaire) situé à un angle de diffraction de 29,5 *Theta*, qui est totalement confirmé par la composition minéralogique et l'analyse chimique effectués pour le sable de béton.

De même, le diffractogramme X de la poudre du sable de brique montre l'existence de Quartz et de l'orthoclases détectés par certaines raies de diffraction X, qui sont des espèces minérales du groupe des silicates ce qui explique le taux élevé de silice SiO₂ atteint dans l'analyse chimique de la poudre de brique à l'égard d'une valeur 63.62%. Les hydro-aluminates de calcium sont cristallisés dans la formation des briques sous la forme de C₄AH₁₃ (4CaO, Al₂O₃, 13H₂O) et sont détectés par certaines raies de diffraction X. Par ailleurs, la calcite CaCO₃ est visible sur tous les courbes de diffractogrammes mais elle est beaucoup plus faible en quantité dans le sable de brique par rapport le sable de béton. Nous pouvons prévoir par la suite que les bétons composés des mélanges de granulats du béton et du brique, la réaction des fines de brique riche en SiO₂ et de l'oxyde de calcium (CaO) présent dans le sable de béton va conduire très probablement à la formation des nouveaux silicates C-S-H qui permettent aux bétons des augmentations sensibles de leurs résistances au cours du temps.

III.4 Protocole expérimental

III.4.1 Formulation par la méthode de l'université de SHERBROOKE :

Le principe de base de la méthode de formulation développée à l'Université de Sherbrooke [4-10] est la combinaison entre les calculs des volumes absolus et les résultats empiriques. Elle

permet de formuler un BHP avec une procédure basée sur le choix de cinq caractéristiques particulières des matériaux utilisés dans le BHP.

Le dosage en ciment de notre BHP est pris égal à 500 kg/m^3 . Puis concernant l'addition siliceuse, le pourcentage en silice est fixé à 10% de la masse de ciment, donc pour un dosage en ciment de 500 kg/m^3 , la quantité de silice est égale à 50 kg/m^3 et le dosage en ciment ensuite devient égale à 450 kg/m^3 .

L'organigramme de cette méthode est présenté par la figure III.12.

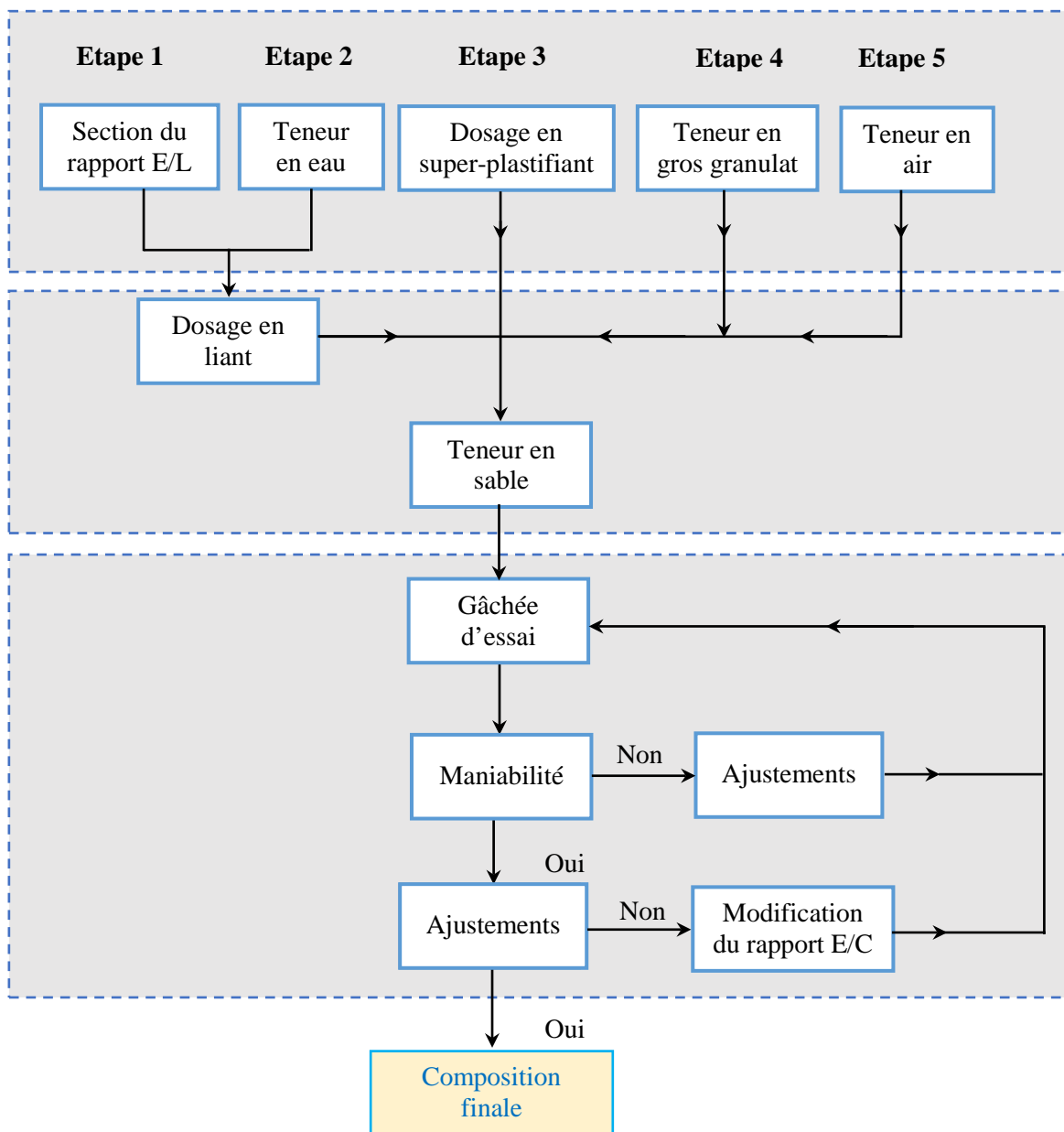


Figure III.12. Organigramme de la méthode de formulation de l'université de Sherbrooke proposée pour formuler des BHP [9].

1. Le rapport 'E/L' :

Quatre valeurs du rapport E/L sont proposées 0.25, 0.3, 0.33, 0.35 respectivement.

2. Teneur en eau :

A partir du rapport E/L, on déduit 04 valeurs de dosage en eau qui sont : 125L, 150L, 165L, 175L respectivement.

3. Dosage en super-plastifiant

Pour une résistance prévisible à 28 jours supérieur à 50 MPa, et une maniabilité acceptable du mélange, le dosage en superplastifiant est prise égal à 2%.

4. Teneur en gros granulats :

La forme des grosses particules est considérée comme moyenne, la quantité prise est égale à 1050 kg/m³.

Les proportions des gros granulats sont déterminées à l'aide de la méthode Dreux-Gorisse.

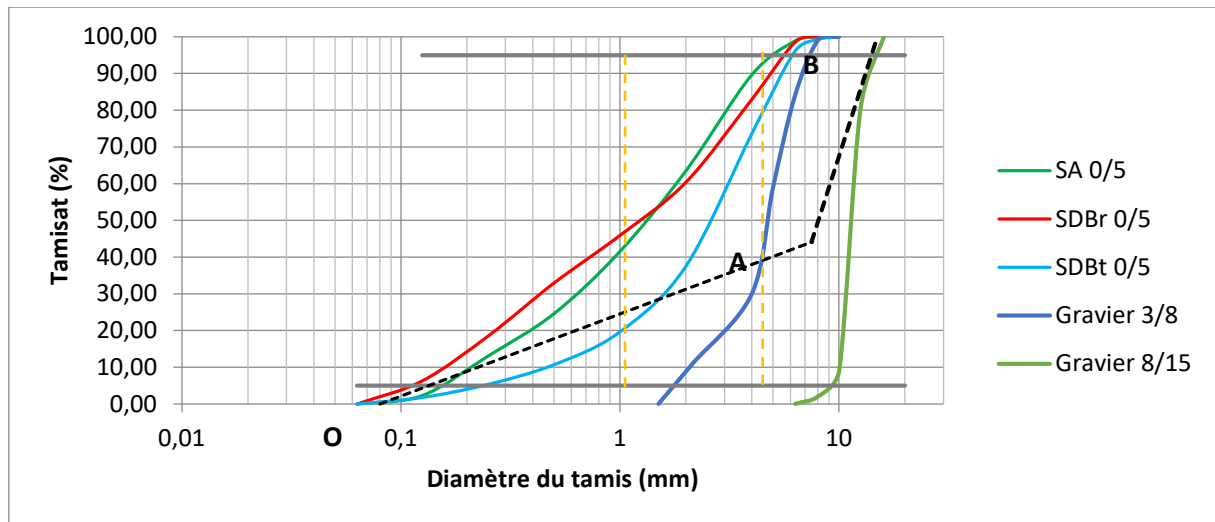


Figure III.13. Courbe granulométrique de Dreux-Gorisse

Après le tracé des coordonnées du point de brisure A et les deux points O et B, ainsi que les lignes d'ordonnée de 95% et 5% sur le schéma des courbes granulométriques.

La ligne de partage joint le point d'ordonnée 95% de la courbe granulométrique du plus petit granulats au point d'ordonnée 5% de la courbe granulométrique du plus gros granulats. Le point d'intersection entre cette ligne et la courbe théorique du mélange optimum indique les proportions en pourcentage de volume absolu de sable et de gravier.

Nous obtenons donc un mélange optimal avec un volume absolu de 32% de sable, 18% de gravier 3/8 et 50% de gravier 8/15.

Ce qui veut dire :

$$\frac{18}{18 + 50} = 26\%$$

La quantité du gravier G3/8 représente 26% de la masse totale du gravier [26 % *(1050)=273 kg/m³].

$$\frac{50}{18 + 50} = 74\%$$

La quantité du gravier G8/15 représente 74% de la masse totale du gravier [74 % *(1050)=777 kg/m³].

5. Le volume du sable

Le dosage en sable pour les différentes formulations de béton a été déterminé d'après les formules suivantes :

$$V_{\text{béton}} = V_{\text{liant}} + V_{\text{gros granulat}} + V_{\text{eau}} + V_{\text{adjuvant}} + V_{\text{air}} + V_{\text{sable}}$$

$$V_{\text{sable}} = 1000 - [V_{\text{liant}} + V_{\text{gros granulat}} + V_{\text{eau}} + V_{\text{adjuvant}} + V_{\text{air}}]$$

Les mélanges à préparer sont résumés dans le tableau III.12 avec un dosage en sable ajusté afin d'obtenir un mètre cube de béton.

Tableau III.12 Composition des bétons formulés.

Mélange N°	Ciment (Kg/m ³)	Silice (Kg/m ³)	SA (kg/m ³)	G (3/8) (kg/m ³)	G (8/15) (kg/m ³)	Eau (l/m ³)	E/L	Superplastifiant (L)
BHP*1	450	50	803,64	273	777	125	0,25	10
BHP*2			736,69			150	0,30	
BHP*3			696,52			165	0,33	
BHP*4			669,74			175	0,35	

Ces quatre BHP (BHP*1, BHP*2, BHP*3, BHP*4) ont été testés en affaissement pour choisir le meilleur rapport E/L. On a adopté BHP*2 (E/L=0.3) après expérimentation au laboratoire.

III.4.2 Mise en place du béton et conservation

Pour les BHP la séquence de malaxage retenue a été la suivante :

1. Mouillage de la paroi interne du malaxeur.
2. Introduction des granulats secs dans le malaxeur (gravier, sable, ciment)
3. Malaxage sec pendant 2 minutes des constituants granulaires (ciment et granulats).
4. Introduction de 2/3 de de l'eau de gâchage plus une partie éventuelle de superplastifiant et malaxage pendant 2 minutes.
5. Introduction de l'eau de gâchage restant plus la partie restante du superplastifiant puis malaxage pendant 1 minute 30 secondes.

La mise en place a été effectuée dans les différents moules destinés aux échantillons correspondants aux essais programmés. Les BHP recyclés ont été mis en place par vibration à l'aide des dispositifs vibratoires traditionnels (la table vibrante).

Après coulage, les éprouvettes sont couvertes par un film plastique pendant 24 heures. Après le démoulage, elles sont conservées dans l'eau à une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ jusqu'à l'âge des tests.

Le programme expérimental vise à réaliser trois teste de caractérisation physico-mécanique : ouvrabilité, résistance à la compression et résistance à la flexion à 7 et 28 jours



Figure III.14. Formulation des BHP recyclés et conservation

III.4.3 Essai d'ouvrabilité des bétons

Les teste d'ouvrabilité ont été réalisés en mesurant l'affaissement à l'aide de teste de cône d'affaissement Abrams. Pour cela, le béton a été introduit dans un moule conique normalisé selon la technique LCPC et conforme à la norme NF EN 12350-2. Il convient d'indiquer que le teste du cône d'Abrams est très simple à réaliser, rapide et relativement fiable.



Figure III.15. Essai d'ouvrabilité au cône d'Abrams.

III.4.4 Résistance des bétons à la compression et à la flexion

La caractérisation mécanique a été réalisée une fois que les résistances à la compression et à la flexion ont été mesurées à 7 et 28 jours. Le comportement mécanique de tous les mélanges BHP a été étudié en flexion simple (3 point) et compression uni-axiale sur des éprouvettes (70x70x280 mm³). De plus trois échantillon ont été testés, à chaque échéance, en flexion simple sur le cadre de pliage d'une presse **Bera-test** d'une capacité maximale de 25 kN. Il est à noter que la vitesse de variation a été fixée à 0.05 ± 0.01 MPa/s jusqu'à défaillance, conformément aux recommandations de la norme NF P 18-407.



Figure III.16. Essai de flexion pour béton.

Les six demi-éprouvettes résultant d'une rupture de flexion ont ensuite été soumises à une compression uni-axiale sur le bâti de compression d'une presse à double quadrant de marque **TONI-TECHNIQUE** d'une capacité maximale de 200 kN, à une vitesse de chargement de 0.5 kN/s.



Figure III.17. Essai de compression pour béton.

III.4.5 Analyse thermique différentielle couplée à l'analyse thermogravimétrique

Cet essai est effectué sur 5 BHP choisis afin (**BHP 15** « témoin », **BHP 2** « l'optimum », **BHP 1** « à 100% SDBt », **BHP 5** « à 100% SDBr » et le **BHP 11** composé de mélange ternaire des sables « 50% SN, 25% SDBr et 25% SDBt ». Cet essai permet de voir le comportement des poudres en fonction de la température. Cela nous permet de déterminer la perte de masse et la chaleur absorbée ou dégagée en fonction de la température.

Les échantillons des BHP utilisés pour les essais ATG/ATD sont broyés au vibrobroyeur. Le matériel est constitué d'un bol et d'une garniture en tungstène. Les échantillons sont introduits dans le bol avec la garniture. L'ensemble est solidement fixé sur une table vibrante à l'aide d'un levier (Figure III.18). Un mouvement vibratoire circulaire et horizontal entraîne la plaque. La force centrifuge de la garniture réduit les échantillons en poudre. La poudre ainsi obtenue est constituée de grains dont les dimensions sont inférieures à 30 μm .



Figure III.18. Vibrobroyeur à disque et sa garniture.

Les produits d'hydratation du ciment, lorsqu'ils sont soumis à de hautes températures, se décomposent et libèrent de l'eau et/ou du dioxyde de carbone. La mesure de ces différentes pertes d'eau à travers l'analyse thermogravimétrique permet d'évaluer la teneur en portlandite et la part d'eau liée ayant réagi avec le liant du matériau.

L'évolution de la perte de masse entre 100°C et 500°C correspondant à la quantité d'eau liée du ciment hydraté nous donne une indication sur le taux d'hydratation. Il est donc possible d'évaluer le degré d'hydratation du liant à travers l'analyse thermogravimétrique, en prenant

pour hypothèse que le degré d'hydratation est proportionnel à la quantité d'eau liée. La représentation de l'évolution du flux thermique, lors d'une analyse thermique différentielle, menée en parallèle de l'analyse thermogravimétrique, permet d'identifier les différents produits d'hydratation formés. Chaque phase hydratée est représentée par un pic endothermique ou exothermique.

L'analyse calorimétrique différentielle couplée à l'analyse thermique gravimétrique (DSC/ATG) et l'analyse thermique différentielle couplée à l'analyse thermique gravimétrique (ATD/ATG) ont été enregistrés à l'aide de la machine Netzsch STA 449F1 de l'université de Bejaia (Figure III.19). Le mode opératoire adopté pour ces essais, est une vitesse de chauffe de 10°C/minute sur les différents mortiers réduit au préalable en poudre en utilisant le vibrobroyeur. Les poudres sont introduites dans les creusets de l'appareil sous atmosphère contrôlée. La température varie de 20°C à 1000°C. Les flux de chaleurs accompagnés de variations en poids sont associés aux transitions de phase dans les différents BHP en fonction de la température et du temps.



Figure III.19. Machine utilisé pour l'essai ATD/ATG.

III.4.6 Essais au microscope électronique à balayage

La microscopie électronique à balayage (MEB) est une technique de microscopie électronique capable de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon en utilisant le principe des interactions électrons-matière.

S'appuyant sur les travaux de Max Knoll et Manfred Von Ardenne dans les années 1930, la MEB consiste en un faisceau d'électrons balayant la surface de l'échantillon à analyser qui, en réponse, réémet certaines particules. Ces particules sont analysées par différents détecteurs qui permettent de reconstruire une image en trois dimensions de la surface.

Un certain nombre de facteurs influencent la morphologie des hydrates de la pâte cimentaire. Il est cité notamment le rapport eau sur ciment, le PH de la solution interstitielle, la nature des produits de base en présence et leur quantité. Les hydrates formés peuvent aussi changer au cours du temps (conversion des hydrates). Celle-ci peut avoir un effet positif s'il s'agit d'une densification de la matrice ou négatif si elle s'accompagne d'une augmentation importante en volume (formation d'ettringite supplémentaire). Les quantités d'hydrates n'augmentent pas forcément lors de ces modifications. Une observation de la microstructure au moyen de la microscopie électronique à balayage est alors utile pour obtenir ces informations. Cette technique apporte des informations sur les faciès cristallins des matières premières et des hydrates formés au cours du durcissement.



Figure III.20. Microscope électronique à balayage.

III.5 Organigrammes des essais expérimentaux

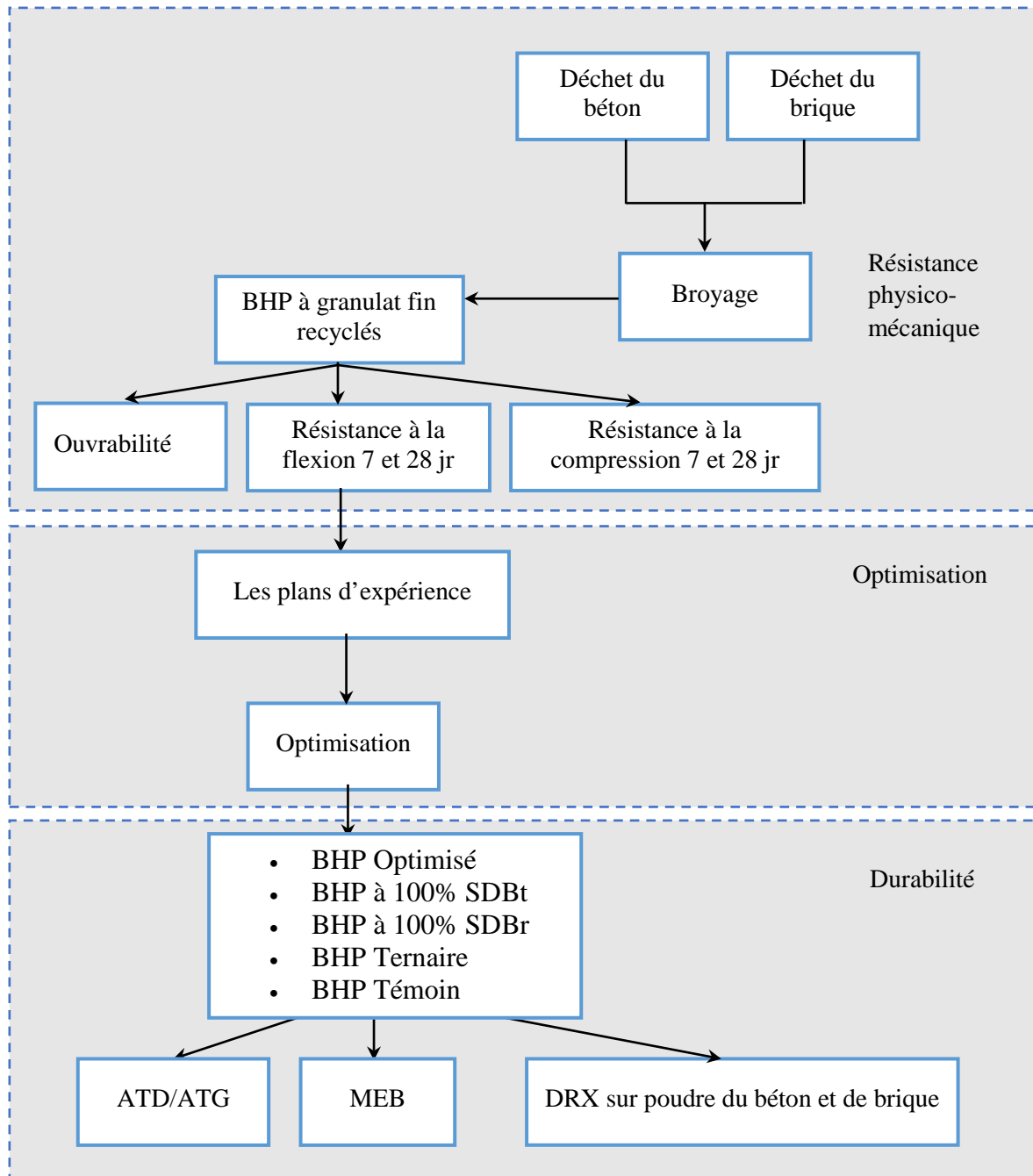


Figure III.21. Programme expérimental de l'étude sur BHP recyclés à base de déchet de brique et de béton.

III.6 CONCLUSION

Les courbes granulométriques des sables et des gravillons utilisés dans cette étude sont à noter qu'une projection expérimentale a également été réalisée au laboratoire pour une meilleure exploitation des matériaux. La synthèse bibliographique et l'analyse des résultats expérimentaux nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

Concernant la classification granulométrique des granulats recyclés et du gravier selon les normes de spécification, donne :

- Les granulats recyclés utilisés sont différents de ceux du sable alluvionnaire. On constate aussi que l'équivalent de sable des granulats naturels et celui des granulats recyclés dépassent 70%, donc les sables produit à partir des déchets de brique et des bétons concassés peuvent servir à confectionner un nouveau béton, et ils sont considéré comme des sables propres.
- On constate aussi, que les granulats recyclés à base des granulats de béton ordinaire et de déchet de brique concassé présentent une faible masse volumique par rapport aux granulats naturels (Sable alluvionnaire).
- Les gravillons concassés 3/8 et 8/16 utilisés, présentent une granulométrie régulière et continue convient parfaitement à la confection du béton à haute performance.

Et de coté de protocole expérimentale. Ce troisième chapitre a pour objectif de présenter l'ensemble du contexte expérimental, qui a servi de support à cette thèse. Un aperçu sur les essais expérimentaux ainsi que la préparation des mélanges et les variables étudiées sont rapportés dans ce travail.

Bibliographie

- [1]. Sánchez de Juan M. et P. Alaejos Gutierrez (2004), Influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate, RILEM, Actes du colloque Use of Recycled Materials in Building and Structures, Barcelone, Espagne ;
- [2]. Ravindrarajah R.S., Steward M. & Greco D. (2001), Variability of Recycled Concrete Aggregate and its Effects on Concrete Properties, 2nd International Conference on Engineering Materials, San Jose, USA;
- [3]. Behim M. et Ali Boucetta T, (2009). Effet des additions micronisées sur L'écoulement des bétons autoplaçant (laitier de haut fourneau, fi lier calcaire et poudre de verre, SBEIDCO, ENSET - Oran (Algérie), 12-14 Octobre 2009.
- [4]. Aitcin P C, (1995). Developments in the application of high-performance concretes», Construction and building materials, Vol. 9, No. 1, 1995.
- [5]. MALIER Y, (1990). « Les bétons à hautes performances — Du matériau à l'ouvrage », Presses de l'ENPC, Paris, 1990, 2e éd., 550 p.
- [6]. MALIER Y, (1991). « The French Approach to using HPC », Concrete International, American Concrete Institute, New York, July 1991, Vol 13, n° 7, p. 28-33
- [7]. Aitcin C P, (2001). « Bétons Haute Performance », Edition Eyrolles, ISBN 2-212-01323-X, 683 pages, Paris (2001).
- [8]. Helland S., (1996). « Utilization of HP », In : Fourth International Symposium on the utilization of high strength-high performance concrete, Edited by F. De Larrard and R. Lacroix, Paris, p.67-81.
- [9]. Malier .Y, (1992). « Les Bétons à Hautes Performances : caractérisation, durabilité, applications », Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (1992).
- [10]. Richard P., (1996). « The futur of HS-HPC », In : Fourth International Symposium on the utilization of high strength-high performance concrete, Edited by F. De Larrard and R. Lacroix, Paris, 1996, p.101-106.

Les normes

- NF EN 933-1(2012). Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 1 : détermination de la granularité. Analyse granulométrique par tamisage.
- NF EN 933-8 (2015). Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 8 : Evaluation des fines – Equivalent de sable.
- NF EN 1097-6 (2014). Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats- Partie 6 : détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau.

- NF EN 933-3 (2012). Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 3 : détermination de la forme des granulats- Coefficient d’aplatissement.
- NF EN 12620 (2008). Granulats pour le béton
- EN 934-2 (2012). Adjuvant pour le béton, mortier et coulis – Partie 2 : Adjuvant pour bétons – Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage.

IV.1. Introduction

Plusieurs recherches ont été menées dans de nombreux pays dans le but d'étudier la possibilité de récupérer les déchets de construction et de les utiliser comme granulats dans de nouveaux types de béton [1-8]. En effet, de comparer les caractéristiques à l'état frais et durci ainsi que la durabilité des bétons recyclés au béton de référence [4-7].

Cette étude vise à examiner l'effet de l'incorporation des agrégats fin recyclés sur le comportement physico-mécaniques des BHP.

Pour y parvenir, une approche théorique et expérimentale contribuant à la formulation du béton, en utilisant une technique moderne telle que l'approche des plans d'expériences est applicable [9-13]. Un modèle du plan de mélange réseau de 3 facteurs et 4 niveaux basé sur la méthodologie des plans d'expériences a été appliqué. Nous présentons les résultats obtenus à partir des tests expérimentaux et de l'analyse statistique, de chaque modification apportée par les différents facteurs utilisés, en fonction de leur taux de substitution. Afin de valoriser correctement l'incorporation les granulats de brique et de béton concassé, aussi pour choisir les couples optimaux les plus performants à l'état frais et durci du béton, nous avons quantifié leurs effets sur l'ouvrabilité, la résistance à la compression et à la flexion (à 7 et 28 jours) sous forme de diagramme ternaire d'iso-réponse. Les modèles développés ont ensuite été comparés quant à leur aptitude à prédire les réponses visées, en analysant le coefficient de détermination (R^2), le coefficient de détermination ajusté (R^2_{adj}), l'erreur quadratique moyenne (RMSE), la variance résiduelle (p -valu <0.05) et le graphique des résidus en fonction des réponses prévue.

IV.2. Méthodes utilisées

IV.2.1 Méthode des plans d'expériences

Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles [2], [9-13]. Ils sont applicables à de nombreuses disciplines et à toutes les industries à partir du moment où l'on recherche le lien qui existe entre une grandeur d'intérêt 'Y' et des variables 'xi'. En général, il faut penser aux plans d'expériences si l'on s'intéresse à une fonction du type :

$$Y = f(xi) \tag{IV.1}$$

Ainsi, nous aurons à traiter un plan de mélange à 3 facteurs (Sable Alluvionnaire SA, Sable de Déchet de Brique SDBr et Sable de Déchet de Béton SDBt) pris en proportions massiques, dont

la somme est égale à l'unité en remplaçant 75% de sable alluvionnaire (Figure IV. 1) ; ce qui veut dire que ces facteurs sont dépendants les uns des autres. Le domaine expérimental est donc contraint par la relation suivante :

$$\%SA + \%SDBr + \%SDBt = 100\% \quad (IV.2)$$

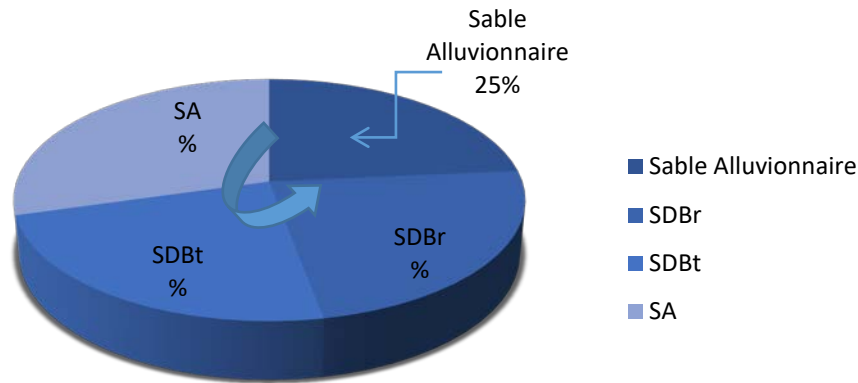


Figure IV. 1. Substitution du sable alluvionnaire jusqu'à 75 % par les trois types de sable (SA, SDBr et SDBt).

Le nombre d'expériences générés par le logiciel est calculé par la relation suivante :

$$C_{q+m-1}^m = \frac{(q+m-1)!}{(m)!(q-1)!} = \frac{720}{24*2} = 15 \quad (IV.3)$$

Où :

'q' est le nombre de facteurs, et 'm' le nombre de niveaux.

Avec 3 facteurs et 4 niveaux, un plan de mélange comprenant 15 compositions a été préparé pour évaluer l'influence de ces trois facteurs sur les caractéristiques des bétons recyclés étudiés.

L'analyse mathématique de la fonction « f » donne un développement polynomial d'ordre plus ou moins élevé des « xi », l'ordre du polynôme dépend du degré de précision souhaité.

La forme canonique du modèle polynomial à trois variables de degré 2 (06 coefficients) est la suivante :

$$y = a_1 * SA + a_2 * SDBr + a_3 * SDBt + a_4 * SA * SDBr + a_5 * SA * SDBt + a_6 * SDBr * SDBt \quad (IV.4)$$

Y est la réponse et a_i ($a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$) sont les coefficients du modèle qu'il faut identifier et expriment l'effet de la réponse à chaque facteur et à chaque interaction.

Dans cette étude, un modèle polynomial d'ordre 02 a été utilisé à trois variables non indépendantes (SA, SDBr et SDBt) et 04 niveaux. Le modèle est exprimé par la deuxième forme canonique précédente. Considérons ici un modèle tenant compte des effets linéaires des différents facteurs mais aussi d'éventuels effets d'interactions entre couples de facteurs.

Les proportions de ces facteurs d'expérience générés par le logiciel JMP sont présentées dans le tableau IV. 1.

Tableau IV. 1. Les proportions des facteurs dans les compositions étudiées.

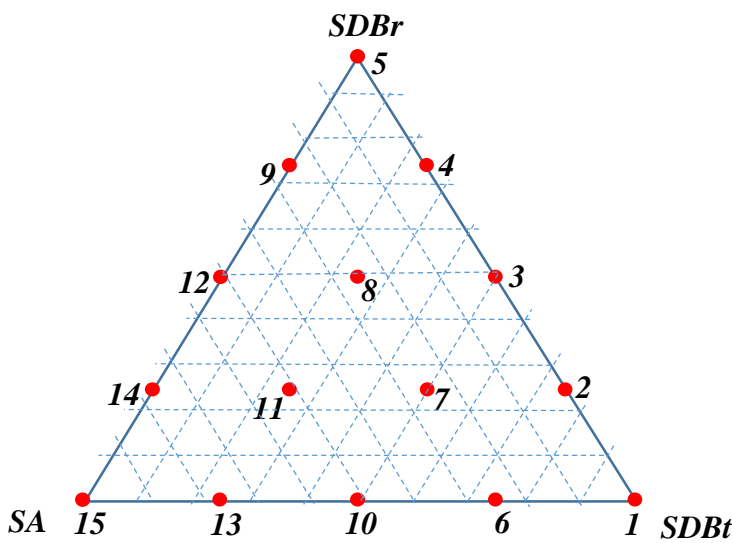


Figure IV. 2. Représentation du réseau triangulaire à 15 combinaisons étudiées (15 Essais).

N°	SA (%)	SDBr (%)	SDBt (%)
1	0	0	1
2	0	0,25	0,75
3	0	0,5	0,5
4	0	0,75	0,25
5	0	1	0
6	0,25	0	0,75
7	0,25	0,25	0,5
8	0,25	0,5	0,25
9	0,25	0,75	0
10	0,5	0	0,5
11	0,5	0,25	0,25
12	0,5	0,5	0
13	0,75	0	0,25
14	0,75	0,25	0
15(BT)	1	0	0

IV.2.2 Méthode de formulation (Préparation des spécimens)

La formulation des bétons à haute performance est basée sur la méthode de composition de l'université de Sherbrooke [14] et les proportions du granulats du gravier sont calculées par la méthode de Dreux-Gorisse [15-16].

Un béton témoin BHP15 (BT) est fabriqué à base de granulats naturels, du gravier concassé et du sable alluvionnaire (G4/8, G8/16 et SA). Seuls les sables recyclés (SDBr et SDBt) ont subi

un pré-mouillage pendant 24 h avant gâchage pour s'affranchir d'une probable absorption par les granulats recyclés de l'eau de gâchage [17-19]. Ils sont introduits dans le malaxeur à l'état saturé à surface sèche (SSS) et les autres granulats sont utilisés à l'état naturel. L'étude porte sur quinze BHP de compositions différentes (naturels/recyclés), avec différentes proportions granulaires du sable (SA, SDBr et SDBt) comme montré dans le Tableau IV. 2.

De plus, il semble que les granulats du sable de déchets de briques concassées absorbent une quantité d'eau plus élevée que les éléments de sable recyclé issu de déchet de béton. Cela signifie que, les granulats fins recyclés influent beaucoup plus sur la quantité d'eau de gâchage [20]. La nécessité dans les bétons recyclés d'une quantité d'eau supplémentaire (approximativement 15% et 8% pour les SDBr et SDBt respectivement) est importante pour l'obtention d'une ouvrabilité plastique similaire à celle d'une composition de béton de granulats naturels. Ce résultat concorde parfaitement avec la littérature [21-22].

Tableau IV. 2. Quantités des différents constituants des BHP recyclés selon le plan de mélange proposé.

Mélange N°	Ciment (kg/m ³)	Silice (kg/m ³)	SA (kg/m ³)	SDBr (kg/m ³)	SDBt (kg/m ³)	G (3/8) (kg/m ³)	G (8/15) (kg/m ³)	Eau (l/m ³)	E/L	Sp (l/m ³)
BHP1	450	50	182,70	0,00	532,32	273	777	150	0,3	6
BHP2			182,70	120,05	399,24					
BHP3			182,70	240,10	266,16					
BHP4			182,70	360,15	133,08					
BHP5			182,70	480,20	0,00					
BHP6			321,16	0,00	399,24					
BHP7			321,16	120,05	266,16					
BHP8			321,16	240,10	133,08					
BHP9			321,16	360,15	0,00					
BHP10			459,61	0,00	266,16					
BHP11			459,61	120,05	133,08					
BHP12			459,61	240,10	0,00					
BHP13			598,07	0,00	133,08					
BHP14			598,07	120,05	0,00					
BHP15			736,53	0,00	0,00					

IV.3. Résultats et discussions

Les réponses des mélanges étudiés, en fonction du taux de substitution des trois facteurs (SA, SDBr et SDBt) peuvent être pleinement exploités dans le développement de modèles

mathématiques. Ces modèles facilitent l'évaluation de l'effet de chaque facteur séparément et en combinaison avec les autres types pour comprendre les interactions entre les différents paramètres étudiés sur les propriétés des bétons en utilisant des diagrammes ternaires avec des courbes d'iso-réponse [12].

Aussi, l'intérêt de modéliser la réponse par un polynôme est de pouvoir calculer ensuite toutes les réponses du domaine d'étude sans être obligé de faire les expériences. En connaissant les coefficients, on peut écrire le modèle de régression qui servira à faire des prévisions [13]. La validité des modèles peut être testée par la méthode statistique basée sur le calcul des erreurs des expériences et du modèle (p-value). Les modèles les plus appropriés ont des coefficients de corrélation relativement élevés, plus le nuage de points se resserre autour de la droite de régression, plus le modèle est correct [12].

Le tableau IV. 3 montre les résultats des tests expérimentaux de caractérisation réalisés au laboratoire obtenus sur la base du plan de mélange développé.

Tableau IV. 3. Résultats expérimentales en fonction des proportions des facteurs dans les compositions étudiées.

BHP N°	Aff (cm)	RC à 7jr (MPa)	RC à 28jr (MPa)	Rf à 7jr (MPa)	Rf à 28jr (MPa)
1	18	58.76	82.54	7.40	12.13
2	16.5	55.52	82.8	8.02	11.37
3	13	52.07	81.72	7.75	11.52
4	9	51.6	81.83	7.97	11.58
5	6	46.88	77.1	7.55	11.53
6	14	54.97	76.45	7.52	10.17
7	10	52.4	78.14	7.74	10.29
8	8	47.32	77.1	7.33	10.3
9	7	45.49	75	7.17	10.72
10	9	50.35	72.1	7.72	9.97
11	8	50.22	74	7.42	10.87
12	8	43.83	74.26	7.07	10.91
13	9	55.33	71.84	8.21	10.86
14	10	53.55	76.3	7.62	11.63
15(BT)	16	63.2	80.24	8.75	12.55

IV.3.1 Modélisation de l'affaissement

Les essais de maniabilité par mesure de l'affaissement ont été réalisés à l'aide de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams selon la technique LCPC définie par la norme NF-EN 12350-2 [23]. La substitution simultanée en masse du sable par des granulats recyclés génère une variation de la maniabilité du mélange frais caractérisé par l'affaissement des bétons à l'état frais.

Les valeurs de l'affaissement mesurées par le cône d'Abrams des différents bétons recyclés et témoin sont représentées graphiquement dans la figure IV. 3.

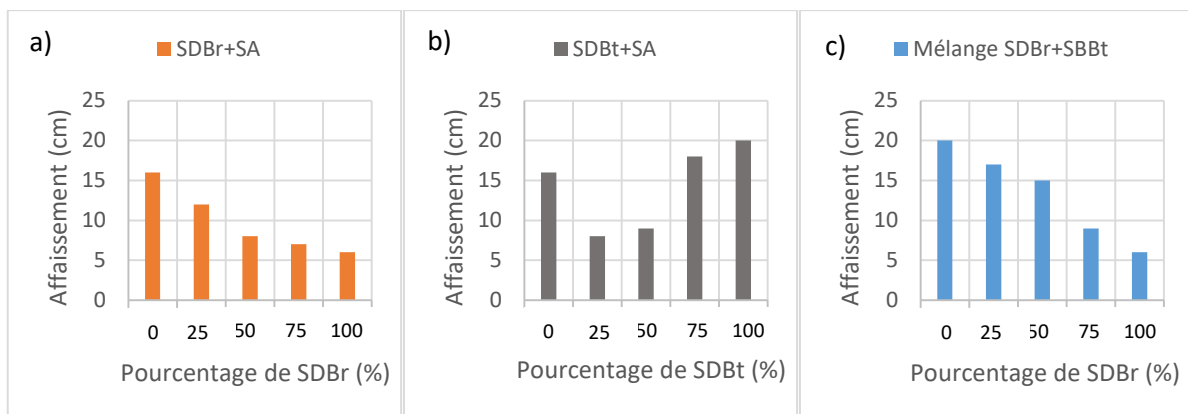


Figure IV. 3. Variation de l'affaissement en fonction du pourcentage de substitution du sable recyclé. a) Substitution du sable de déchet de brique SDBr. b) Substitution du sable de déchet de béton SDBt. c) Remplacement du sable alluvionnaire par un mélange binaire de SDBr et SDBt.

La figure IV.3 montre que le BHP témoin testé a une valeur d'ouvrabilité très plastique qui dépasse 15 cm. Ainsi, pour une incorporation de sable de déchet de brique dans les bétons recyclés, on constate que l'affaissement mesuré passe d'une ouvrabilité très plastique à une ouvrabilité plastique (Affaissement égal à 6 cm pour une substitution de 100% de SDBr). Par contre, on remarque que l'incorporation de sable de déchets de béton concassé produit une diminution d'affaissement du béton recyclé pour les deux pourcentages de 25% et 50%, puis une augmentation de la maniabilité qui peut dépasser celle de béton témoin pour des pourcentages de SDBt élevé (de 75% et 100%) [24]. Pour un remplacement total du sable alluvionnaire par un mélange binaire de SDBr et SDBt l'affaissement diminue avec l'accroissement de pourcentage de sable déchet de brique. Ce mélange de SDBr et SDBt améliore la maniabilité pour un pourcentage SDBr qui ne dépasse pas 25% ce résultat concorde

bien avec la littérature [25-27]. En plus, avec les différentes proportions des granulats recyclés, l'affaissement augmente sensiblement pour les bétons avec incorporation de sable de déchets de béton recyclé issu de démolition par rapport au déchets de briques. Cela est peut-être dû à la grande capacité d'absorption des granulats de déchets de briques [28].

Les mesures de l'affaissement du béton au cours des essais sont comparées dans le tableau IV.4 avec les résultats de prédiction du modèle généré. Dans le tableau IV. 5, les paramètres d'estimation du modèle de la réponse étudiée (l'Affaissement du béton recyclé) sont montrés. Le modèle mathématique retenu pour l'affaissement au cône d'Abrams est donné par l'équation suivante :

Affaissement (cm)

$$= 14.757142857 \times SA + 6.5428571429 \times SDBr + 22.185714286 \times SDBt + SA \times (SDBr \times -14) + SA \times (SDBt \times -36) + SDBr \times (SDBt \times -4.857142857) \quad (IV. 5)$$

Tableau IV. 4. Comparaison entre les résultats mesurés dans l'expérimentation et estimés par le modèle d'affaissement des BHP recyclés.

BHP	Affaissement expérimental (cm)	Affaissement prévu par le modèle (cm)
1	18	19,17142857
2	16.5	15,95714286
3	13	12,72500000
4	9	9,47500000
5	6	6,207142857
6	14	12,17142857
7	10	10,20714286
8	8	8,22500000
9	7	6,22500000
10	9	9,153571429
11	8	8,439285714
12	8	7,707142857
13	9	10,11785714
14	10	10,65357143
15	16	15,06428571

Selon le modèle statistique dérivé de la maniabilité, il est clair que les paramètres étudiés (SA, SDBr et SDBt) ont un effet sur la valeur de l'affaissement telle qu'elle est indiquée par les coefficients de chaque paramètre, et donnent des valeurs plus ou moins satisfaisantes pour l'ouvrabilité. A partir du modèle, nous observons que la mesure de l'affaissement est conditionnée fortement par l'augmentation de la proportion massique de SDBt, suivi par le dosage en SA et SDBr. L'augmentation de l'affaissement a été attribuée au comportement physique des fines des SDBt, Ces fines sont très fluides et se mettent en œuvre sous le seul effet de la gravité, l'accroissement du taux du SDBt pouvant entraîner une augmentation significative des valeurs de maniabilité. Les sables issus de béton de démolition riches en fines, peuvent être utilisés efficacement pour augmenter la maniabilité du béton. Des résultats similaires obtenus par Khatib, J. (2005) [26] ont également montré que les sables de déchets de béton améliorent considérablement la maniabilité du béton.

Alors qu'on constate des influences négatives des différents effets couplés, cela est expliqué par la demande en eau élevée des fines de SDBr. En effet, plus la teneur en couple recyclé est élevée, plus la demande en eau requise pour mouiller toute la surface des grains est élevée, ce qui diminue l'affaissement de ces bétons [29].

Tableau IV.5. Paramètres d'estimation du modèle pour le résultat d'affaissement étudié.

Résumé de l'ajustement	
R carré	0.955131
R carré ajusté	0.930203
Racine de l'erreur quadratique moyenne	0.994628
Moyenne de la réponse	10.76667
Observations (ou sommes pondérées)	15

Les valeurs d'ouvrabilité, mesurées par l'essai d'affaissement au cône d'Abrams des différents mélanges optimisés, sont représentées dans un graphique qui présente les valeurs observées en fonction des valeurs attendues (voir figure IV. 4) et sous forme de diagrammes ternaires sur la figure IV. 5 qui illustre les effets des trois facteurs étudiés.

Les courbes d'iso-réponse de l'affaissement des BHP en fonction de pourcentage de substitution des trois sables ont été représentés sur la figure IV. 5, on constate que la présence des granulats recyclés réduit l'ouvrabilité des bétons à l'état frais, notamment pour les dosages (proportion) supérieur à 75% de SDBr (c'est-à-dire : 56,25% de la masse totale du sable) avec

un faible pourcentage de SDBt par rapport au béton de référence (BHP15). Par contre, les sables issus de déchet de démolition de béton améliorent significativement l'ouvrabilité, particulièrement au-delà de 75% de SDBt (BHP2 et BHP6) qui ont les affaissements les plus élevés (17cm et 18 cm respectivement) par rapport aux autres bétons étudiés.

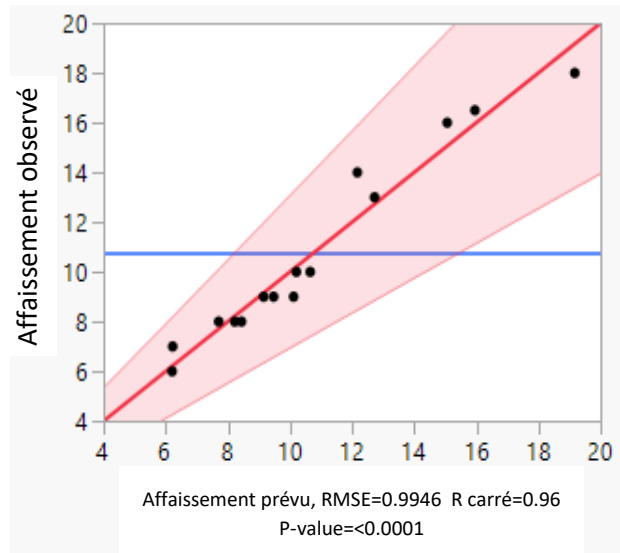


Figure IV. 4. Représentation graphique de l'affaissement observé dans l'expérimentation en fonction des valeurs prévue pour les 15 BHP recyclés.

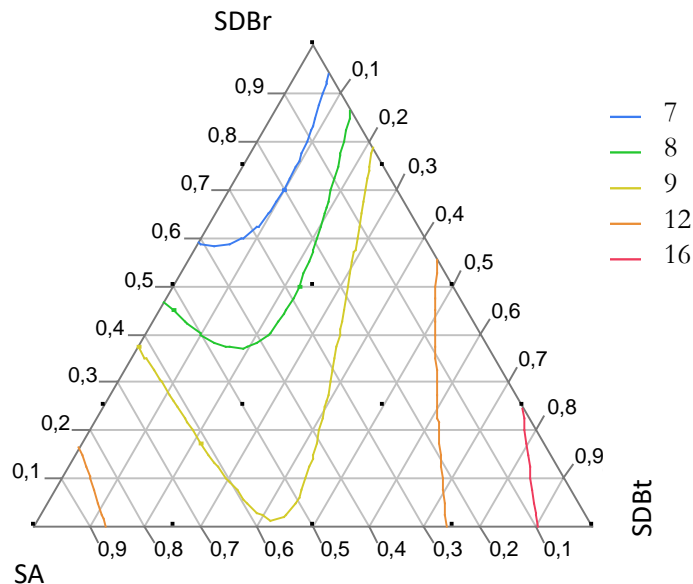


Figure IV. 5. Courbes d'iso-réponse de l'affaissement des BHP en fonction de pourcentage de substitution des trois sable (SA, SDBr et SDBt).

IV.3.2 Modélisation de la résistance mécanique

La caractérisation mécanique est obtenue en utilisant les mesures de résistance à la compression et à la flexion sur des éprouvettes de $70 \times 70 \times 280$ mm, selon les normes NF EN 196-1 [30]. Les résistances à la flexion et à la compression sont indiquées par la moyenne de trois spécimens et de six spécimens, respectivement.

En considérant la résistance à la flexion des BHP, la figure IV. 6 présente les résultats d'évolution des résistances à la flexion des BHP en fonction de leurs âges et de taux de substitution des granulats recyclés.

Le développement des résistances en flexion des BHP à base des SDBr est plus rapide que celui des BHP avec substitution du SDBt. La densification de la matrice et l'évolution de l'interface pâte-granulat sont à l'origine de l'amélioration de la résistance en flexion. A l'âge de 28 jours, la résistance à la flexion atteint 11,53 MPa pour le BHP15 (béton témoin), 10,91 MPa pour le BHP12 (avec 50% de SDBr) face à 9,97 MPa pour le BHP10 (avec 50% de SDBt), et 10,72 MPa pour le BHP14 (avec 75% de SDBr), par rapport à 10,17 MPa pour le BHP13 (avec 75% de SDBt).

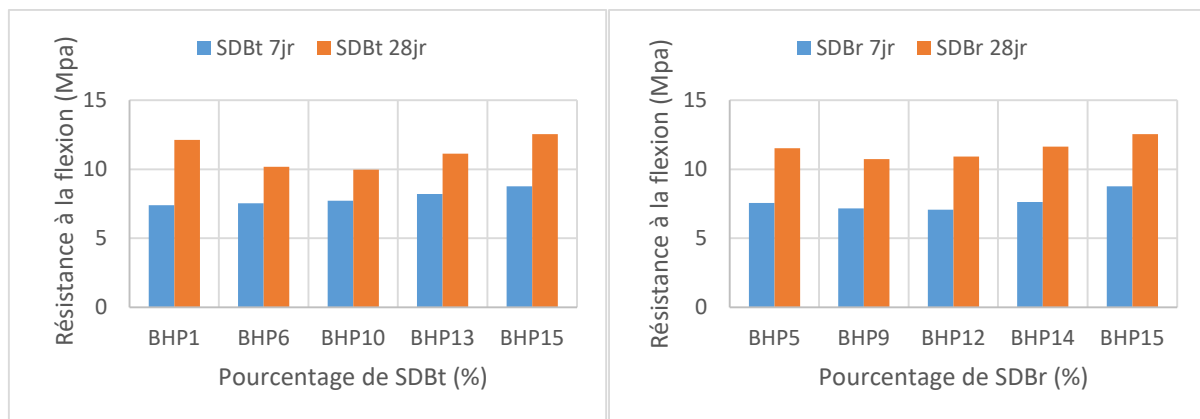


Figure IV.6. Evolution de la résistance à la flexion à 7 et 28 jours en fonction des taux de substitution des sables recyclés SDBr et SDBt.

Les estimations des paramètres du modèle des réponses étudiées (résistance à la compression et à la flexion à 28 jours) sont données dans les tableaux IV.6 et IV.7 respectivement. Selon ces

tableaux, les modèles mathématiques retenus pour les réponses de résistance à la compression et à la flexion à 28 jours sont respectivement écrits comme suit :

$$R_c 28jr (Mpa) = 79.258 \times SA + 77.443714286 \times SDBr + 82.763 \times SDBt + SA \times (SDBr \times -14.10857143) + SA \times (SDBt \times -34.82) + SDBr \times (SDBt \times 10.951428571) \quad (IV.6)$$

$$R_f 28jr (Mpa) = 12.721428571 \times SA + 11.49928571 \times SDBr + 11.911428571 \times SDBt + SA \times (SDBr \times -4.768571429) + SA \times (SDBt \times -9.291425871) + SDBr \times (SDBt \times -1.151428571) \quad (IV.7)$$

Tableau IV.6. Les paramètres d'estimation du modèle pour la résistance à la compression (Rc 28jr) étudiée.

Résumé de l'ajustement				
R carré	0.940175			
R carré ajusté	0.906939			
Racine de l'erreur quadratique moyenne	1.566473			
Moyenne de la réponse	52.09933			
Observations (ou sommes pondérées)	15			
Estimations des coefficients				
Terme	Estimation	Erreur standard	t ratio	p-value. > t
a1: SA(Mélange)	79.258	0.956768	82.84	<,0001*
a2: SDBr(Mélange)	77.443714	0.956768	80.94	<,0001*
a3: SDBt(Mélange)	82.763	0.956768	86.50	<,0001*
a4: SA*SDBr	-14.10857	4.071967	-3.46	0,0071*
a5: SA*SDBt	-34.82	4.071967	-8.55	0,0011*
a6: SDBr*SDBt	10.951429	4.071967	2.69	0,0248*

Tableau IV.7. Les paramètres d'estimation du modèle pour la résistance à la flexion (Rf 28jr) étudiée.

Résumé de l'ajustement	
R carré	0.922873
R carré ajusté	0.880024
Racine de l'erreur quadratique moyenne	0.259156
Moyenne de la réponse	11.09333
Observations (ou sommes pondérées)	15

Estimations des coefficients

Terme	Estimation	Erreur standard	t ratio	p-value. > t
a1: SA(Mélange)	12.721429	0.225502	56.41	<,0001*
a2: SDBr(Mélange)	11.499286	0.225502	50.99	<,0001*
a3: SDBt(Mélange)	11.911429	0.225502	52.82	<,0001*
a4: SA*SDBr	-4.768571	0.959728	-4.97	0,0008*
a5: SA*SDBt	-9.291429	0.959728	-9.68	<,0001*
a6: SDBr*SDBt	-1.151429	0.959728	-1.20	0,2609

Comme indiqué dans les tableaux IV.6 et IV.7, les modèles ont des coefficients de corrélation relativement élevés ($R^2 = 0,94$ pour Rc 28 jours et $R^2 = 0,92$ pour Rf 28 jours). Il ressort de ces deux tableaux que, les coefficients linéaires ($a1$, $a2$, $a3$), et les coefficients de produit ($a4$, $a5$, $a6$) étaient très significatifs, avec de très petites valeurs P ($P < 0,01$). Les autres coefficients de terme n'étaient pas significatifs ($p > 0,05$). Ceci montre une bonne corrélation entre les réponses obtenues par l'expérimentation et les valeurs prédites par les modèles ainsi trouvés.

Les coefficients du polynôme de signe négatif indiquent qu'une augmentation de la valeur de la variable associée diminue la réponse. Contrairement aux coefficients de signe positif qui augmente la réponse. Par exemple, l'augmentation du couple SA*SDBt diminue la résistance à la compression mesurée. Par contre, l'augmentation du dosage de SA ou de SDBt augmente cette dernière.

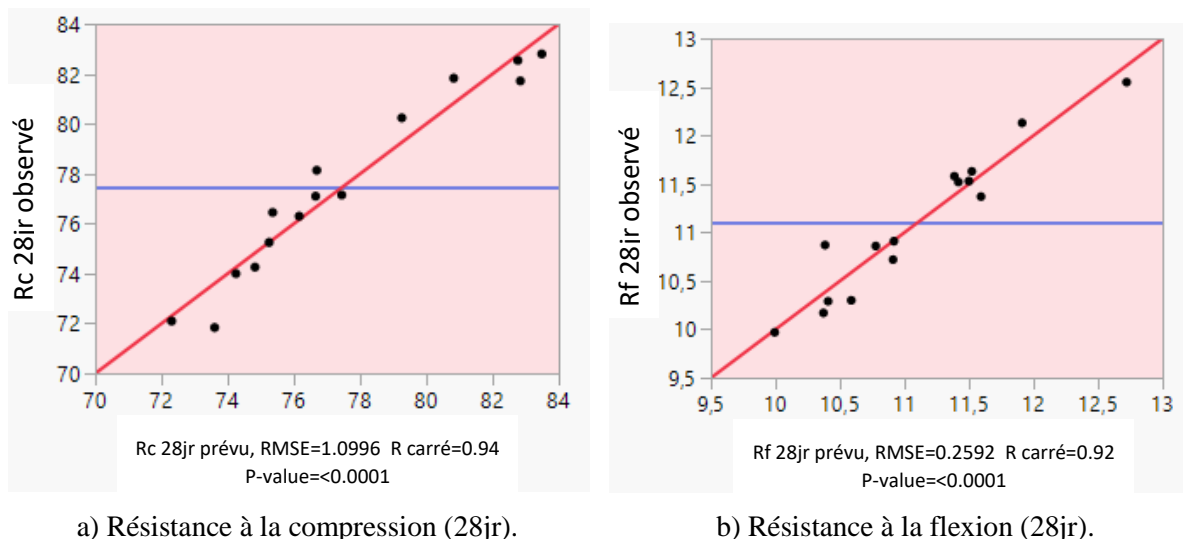


Figure IV.7. Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues de la résistance mécanique.

Les résultats obtenus sur la résistance mécanique lors des essais sont comparés au tableau 12 par rapport aux réponses attendus par le logiciel JMP7, et sont représentés graphiquement sur la figure IV. 7. Les modèles développés ont ensuite été comparés quant à leur aptitude à prédire les réponses visées, en analysant le coefficient de détermination (R^2), le coefficient de détermination ajusté (R^2_{adj}), l'erreur quadratique moyenne (RMSE), la variance résiduelle (p -valu <0.05) et le graphique des résidus en fonction des réponses prévue, Si ce résidu est trop important, on peut alors envisager d'enrichir ou de corriger le modèle, puis éventuellement de mettre à jour le plan expérimental et de répéter d'autres tests [11].

Tableau IV. 8 : Comparaison des valeurs de la résistance mécanique mesurées (expérimentalement) et les valeurs prévues du modèle mathématique à l'âge de 28jours.

BHP	Résistance à la compression 28j		Résistance à la flexion 28j	
	valeurs mesurées	valeurs prévues	valeurs mesurées	valeurs prévues
HPC1	82.54	82.763000000	12.13	11.911428571
HPC2	82.8	83.486571429	11.37	11.592500000
HPC3	81.72	82.841214286	11.52	11.417500000
HPC4	81.83	80.826928571	11.58	11.386428571
HPC5	77.1	77.443714286	11.53	11.499285714
HPC6	76.45	75.358000000	10.17	10.371785714
HPC7	78.14	76.691571429	10.29	10.407500000
HPC8	77.1	76.656214286	10.3	10.587142857
HPC9	75	75.251928571	10.72	10.910714286
HPC10	72.1	72.305500000	9.97	9.9935714286
HPC11	74	74.249071429	10.87	10.383928571
HPC12	74.26	74.823714286	10.91	10.918214286
HPC13	71.84	73.605500000	10.86	10.776785714
HPC14	76.3	76.159071429	11.63	11.521785714
HPC15	80.24	79.258000000	12.55	12.721428571

La représentation graphique des résidus en fonction des réponses prévue (voir figure IV. 8), nous permet de faire en sorte qu'il ne reste pas d'information à extraire de nos résultats. Les fluctuations des résidus sont relativement petites et régulières pour Rc 28jr et Rf 28jr. Les modèles présentés montrent une faible déviation dans les deux cas. En d'autres termes, les graphes de résidus donnent une idée de la capacité des modèles postulés à représenter les valeurs

observées. En effet, il semble que les résidus soient faibles et distribués aléatoirement (pas une tendance particulière) [31].

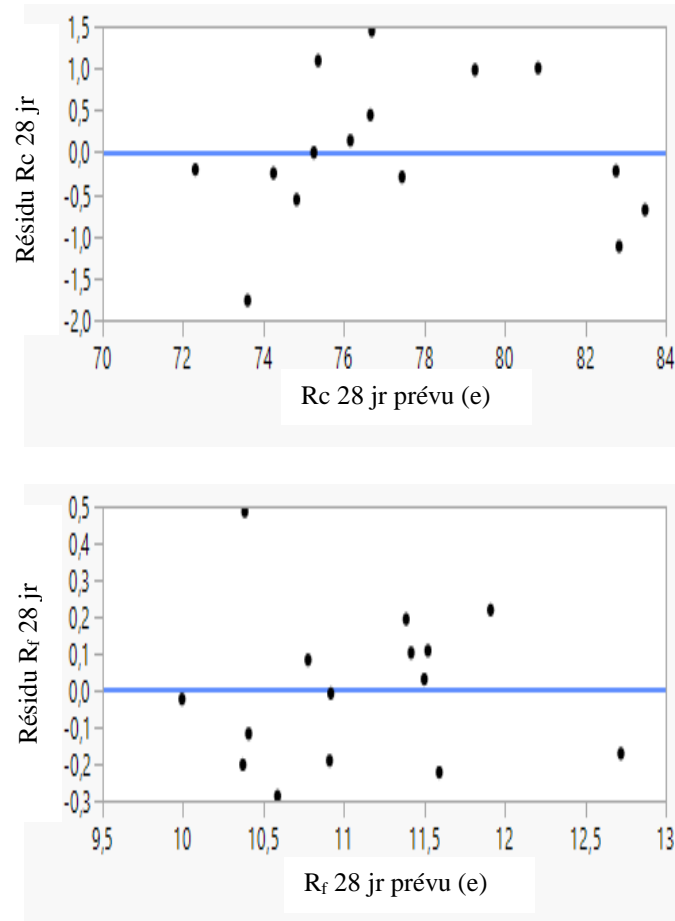
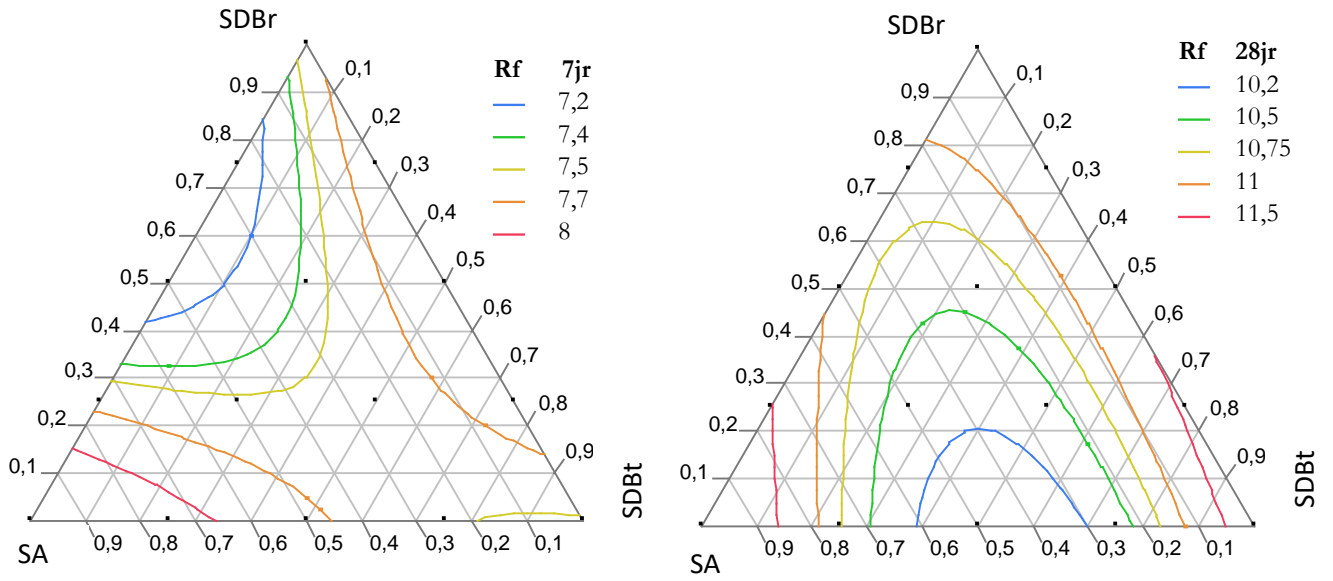


Figure IV. 8. Graphique des résidus en fonction des valeurs prévues a) Rc 28jr b) Rf 28jr.

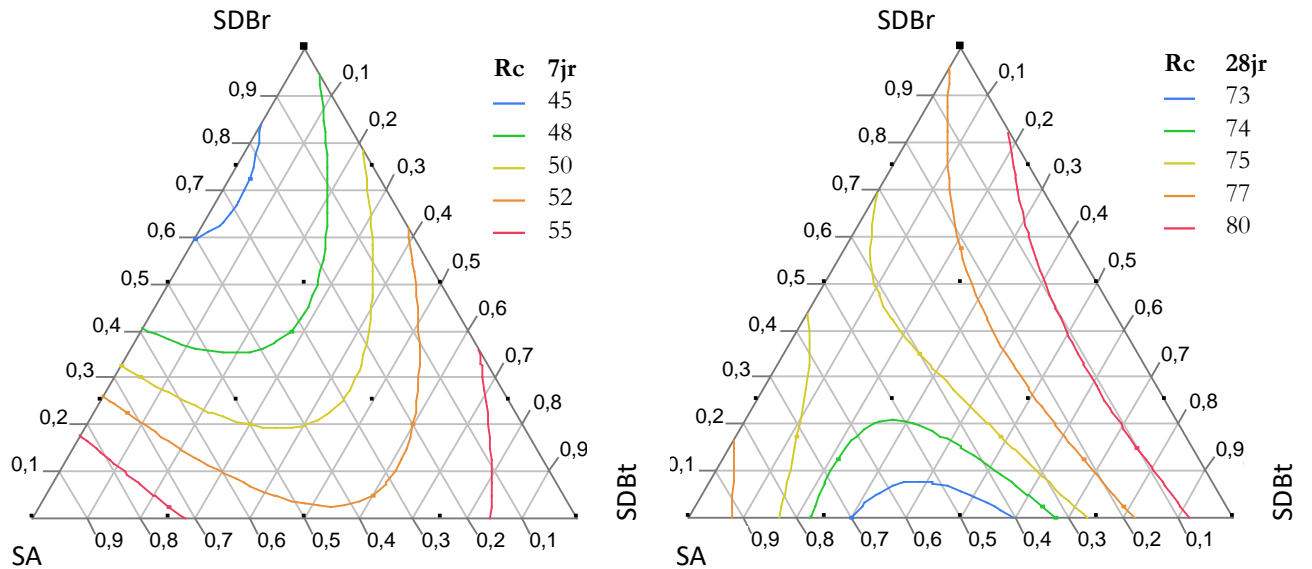
Ainsi, nous pouvons dire que les modèles résultant de l'application de la méthode des plans de mélange expliquent bien les résultats expérimentaux. Les modèles statistiques dérivés pour la résistance mécanique à 28 jours reflètent significativement chaque paramètre sur la réponse étudiée. A partir de ces modèles dérivés, on peut remarquer que la résistance à la compression à 28 jours est d'abord conditionnée par l'effet du SDBt, suivie de l'augmentation de la teneur SA, puis de la teneur en SDBr et enfin de l'effet couplé SDBr*SDBt. Par contre, l'effet couplé SA*SDBr et SA*SDBt diminue la résistance à la compression.



a) Résistance à la flexion 7 jr

b) Résistance à la flexion 28jr

Figure IV. 9. Courbes iso-réponses de la résistance à la flexion à 7 jours et à 28 jours.



a) Résistance à la compression 7jr

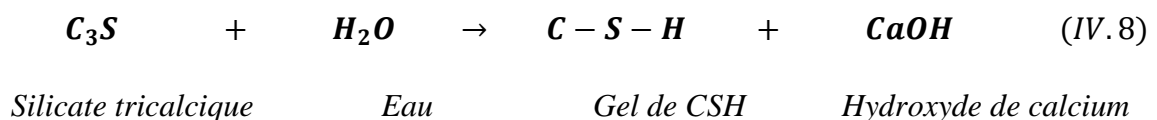
b) Résistance à la compression 28jr

Figure IV. 10. Courbes iso-réponses de la résistance à la compression à 7 jours et à 28 jours.

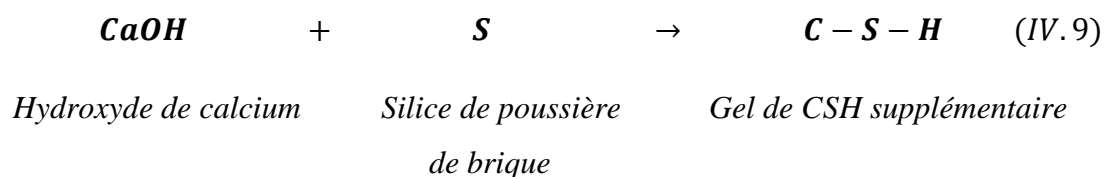
La Figure IV. 11 illustre le profileur de prévision de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de substitution des trois facteurs avec des taux de substitution varies de 0 à 100%. Elle indique que la résistance à la compression maximale des BHP peut être atteinte lorsque les proportions des trois facteurs ont les valeurs 0% SA, 25% SDBr et 75% SDBt, respectivement, pour lesquelles la résistance à la compression (R_c) atteint une valeur maximale de 82.8 MPa (Tableau IV.8). L'incorporation de SDBt au-delà de 75% conduit à un effet inverse. D'autre part, le SDBr a une influence négative sur la R_c 28jr et dérive constamment des réponses inférieures à celle du béton témoin. Cette diminution peut s'expliquer également par l'observation suivante : les granulats recyclés sont moins résistants, surtout les sables de brique, donc, la résistance mécanique du béton diminue. Aussi, la chute de la résistance à la compression des sables recyclés est attribuée à la présence de poussière de concassage dans les granulats recyclés ce qui augmente la quantité d'eau efficace pour maintenir la consistance et par la suite diminue la résistance [20].

En ce qui concerne la résistance à la flexion, elle est également influencée par le pourcentage de substitution de SDBr et SDBt. On peut observer qu'au bout de 28 jours, les résistances à la flexion les plus élevées sont celles de béton BHP1 (12,13 MPa), BHP4 (11,58 MPa) et BHP14 (11,63 MPa), avec un effet optimal pour le BHP1 (respectivement environ 75% de SA, 25% de SDBr et 0% de SDBt). Les résistances à la flexion élevées dans BHP4 (0% SA, 75% de SDBr et 25% SDBt) et BHP14 (75% SA, 25% SDBr et 0% de SDBt) est attribué à la réaction pozzolanique des fines du sable de déchet de brique SDBr (l'argile calcinée) [32-33], ce qui aura pour effet la baisse du taux de portlandite (CH) et la production des nouveaux C-S-H [34 - 36], ce qui a apporté une meilleure densification de la matrice cimentaire [34]. Le mécanisme de la réaction pozzolanique est expliqué par les deux équations chimiques suivantes :

La réaction d'hydratation de ciment :



La réaction pozzolanique :



Les pouzzolanes sont des matériaux à contenu siliceux et alumineux amorphes qui réagissent avec l'hydroxyde de calcium en présence d'eau pour former du calcium les hydrates de silicate (CSH) et les hydrates de silicate de calcium et d'aluminium (CaSH), renforcent les propriétés des matériaux à base de ciment [37 - 38].

IV.4. Optimisation

La recherche des proportions optimales de granulats fins recyclés conduisant à l'optimisation de la valorisation des granulats fins recyclés (SDBr et SDBt) ayant des réponses optimales [39-40], à partir du modèles préalablement établis.

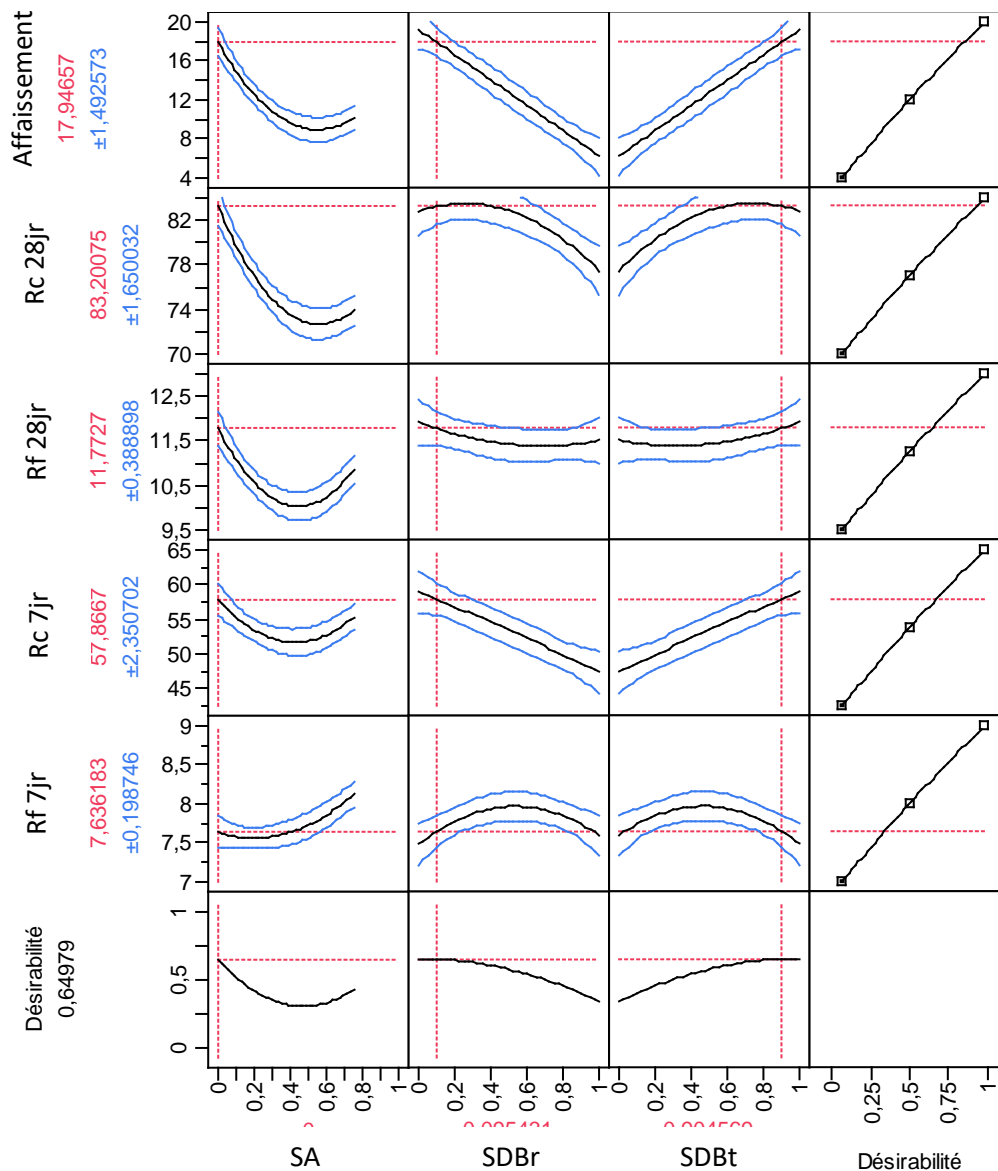


Figure IV. 11. Profileur de prévision de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de SA, SDBr et SDBt.

L'optimisation a été effectuée à l'aide du profleur de réponse dont la valeur de désirabilité proche de 1 correspond à la valeur maximale des propriétés physico-mécanique. L'optimisation a été effectuée en utilisant la fonction de désirabilité qui combine toutes les cibles d'optimisation en une seule (désirabilité).

Selon cette étude, la désirabilité maximale est de 0.65 (profleur de prévision) qui peut être atteinte pour le BHP sans sable naturel, en mélangeant les deux sables recyclés 9.5% de SDBr et 90.5% de SDBt. La composition optimisée du mélange donne : Affaissement=17.94 cm , $R_f 7jr=7.63$ MPa, $R_f 28jr=11.77$ MPa, $R_c 7jr=57.86$ MPa et $R_c 28jr=83.20$ MPa.

De plus, cette optimisation montre également que le BHP peut être produit avec des sables recyclés à partir de déchets de briques et de béton et permet d'obtenir de meilleures propriétés que les BHP naturels (BHP 15).

IV.5. Conclusion

L'évaluation correcte de l'effet de l'incorporation des granulats de sable de briques et de béton concassé sur les propriétés physico-mécaniques des bétons est l'objectif principal de cette recherche. À travers des tests expérimentaux et des analyses de chaque modification apportée par les différents facteurs utilisés en fonction de leur taux de substitution en utilisant l'approche de modélisation des plans du mélange, on constate un bon accord entre les résultats des modèles mathématiques et les tests expérimentaux, ce qui valide les différentes informations importantes sur les effets de chacun de ces paramètres relevés.

Sur la base des résultats de cette étude, les conclusions suivantes pourraient être tirées :

- L'approche de plans du mélange utilisée dans ce travail expérimental s'est révélée être une technique efficace pour étudier les effets des trois types de sable (SA, SDBr et SDBt), dans les systèmes binaires et ternaires sur les propriétés physico-mécaniques des bétons. L'intérêt de modéliser la réponse étudiée par un polynôme, est que celui-ci est alors capable de calculer toutes les réponses du domaine d'étude sans être obligé de faire toutes les expériences. Les mesures obtenues lors des essais effectués nous ont permis de déterminer des modèles prédictifs d'ouvrabilité, de résistance à la compression et à la flexion à 7 et 28 jours.

- On constate que la présence du SDBr diminue la maniabilité des bétons à l'état frais notamment pour les proportions qui dépassent 50% (soit 37,5% de la masse totale du sable) par rapport au béton de référence (BHP15). Par contre, les sables recyclés (SDBt) ont un effet moins négatif sur l'affaissement, et donne des résultats meilleurs surtout pour les pourcentages de 50% et 75%.
- Les bétons recyclés ont une capacité d'absorption d'eau remarquable, elle augmente en fonction du pourcentage de substitution en granulats recyclés, notamment pour le SDBr et les couples SDBr et SDBt en même temps. Cela est dû principalement aux taux élevés des pores capillaires dans les granulats de brique recyclés. L'introduction de SDBr et SDBt dans le mélange de béton (par substitution) conduit à influencer sur la résistance mécanique. La résistance à la compression est comparable à celle du béton témoin pour des faibles pourcentages de substitution en granulats recyclés, puis diminue pour des pourcentages plus élevés. On peut observer aussi qu'au bout de 28 jours, les résistances à la flexion les plus élevées sont celles des bétons BHP7 et BHP9, avec un effet optimal pour le béton BHP9 (respectivement environ 75% de SA, 25% de SDBr et 0% de SDBt).
- L'optimisation par fonction de désirabilité donne une valeur maximale de 0.65 présentée moyennant du profileur de prévision. En conséquence, le BHP peut être obtenue sans sable alluvionnaire en mélangeant les deux types de sable recyclés 9.5% de SDBr et 90.5% de SDBt.
- Enfin, il convient de noter que non seulement les propriétés physico-mécaniques des bétons sont encourageantes, mais les considérations économiques, environnementales et techniques sont également très intéressantes pour la valorisation des déchets de construction (pareillement pour la brique et le béton).

Bibliographie

- [1]. Tayeh, B. A. M. Al Saffar, D. M. and Alyousef, R. (2020). The utilization of recycled aggregate in high performance concrete: a review. *J. of Mat. Res. And Tech.*, 9(4), pp. 8469–8481. <https://doi:10.1016/j.jmrt.2020.05.126>
- [2]. Anamarie, C.R. Saylisse, D.W. Torres, G. and Arsenio, C.F. (2020). Experimental design of concrete mixtures using recycled plastic, fly ash, and silica nanoparticles. *Construction and Building Materials.*, 254, 119207. <https://doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.119207>
- [3]. Silva, R.V. de Brito, J. and Dhir, R.K. (2018). Fresh-state performance of recycled aggregate concrete: A review. *J. Constr. and Build. Mater.*, 178, pp. 19–31. <https://doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.05.149>
- [4]. Zheng, C. Lou, C. Du, G. Li, X. Liu, Z. Li, L. (2018). Mechanical Properties of Recycled Concrete with Demolished Waste Concrete Aggregate and Clay Brick Aggregate, *Results in Physics.* <https://doi:1016/j.rinp.2018.04.061>
- [5]. Job Thomas, Nassif Nazeer Thaickavil and P.M. Wilson. (2018). Strength and durability of concrete containing crushed concrete aggregates, *J. of Build. Eng.*, <https://doi:10.1016/j.jobe.2018.05.007>
- [6]. Omary, S. Ghorbel, E. and Wardeh, G. (2016). Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concretes properties. *J. Constr. and Build. Mater.*, 108, pp. 163–174. <https://doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.01.042>
- [7]. Berredjem, L. Arabi, N. Molez, L. and Jauberthie, R. (2015). Propriétés mécaniques et durabilité des bétons à base de graviers et sables recyclés issus de béton de démolition. *Deuxième Conférence Internationale Francophone Nouveaux Matériaux et Durabilité (NoMad 2015)*, Nov 2015, Douai, France. *Nouveaux Matériaux et Durabilité*, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01366521>
- [8]. Rawaz Kurda, Jorge de Brito, José D. Silvestre (2017). Combined influence of recycled concrete aggregates and high contents of fly ash on concrete properties, *Construction and Building Materials* 157 (2017) 554–572. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817319529>
- [9]. Goupy J, Creighton L, (2007). *Introduction to design of experiments with JMP examples*. 3rd ed. Cary (NC): SAS Institute; p. 438.
- [10]. Goupy J, (2000). *Plans d'expériences : les mélanges [Experiences plans: the mixtures]*. Collection technique et ingénierie, p. 285. ISBN 2 10 004218 1. Paris : Dunod.
- [11]. Gendre L, Savary A, Soulier B, (2009). *Les plans d'expériences [Design of experiments]*. France : ENS Paris-Saclay; 2009 Dec.
- [12]. GOUPY J, (2005). "Pratiquer les Plans d'Expériences". Dunod. Paris. 560 pages.

- [13]. Patrícia S. Lovato, Edna Possan, Denise Carpena Coitinho Dal Molin, Ângela B. Masuero, José Luis D. Ribeiro, (2012). Modeling of mechanical properties and durability of recycled aggregate concretes, *Construction and Building Materials* 26 437–447. <https://doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.06.043>
- [14]. Aitcin C P, (2001), *Bétons Haute Performance*, Edition Eyrolles, IBSN 2-21201323-X, 683 pages, Paris.
- [15]. Malier Y, (1991). The French Approach to using HPC, *Concrete International*, American Concrete Institute, New York, July 1991, Vol 13, n° 7, p. 28-33
- [16]. Dreux G. and Festa J, (1998). “Nouveau guide de béton et de ces constituants”, Edition Eyrolles.
- [17]. Arabi N, Berredjem L, (2011) « Valorisation des déchets de démolition comme granulats pour bétons », *déchets - revue francophone d'écologie industrielle*, vol. 60, p. 25-30. <https://hal.archive-ouvertes.fr/hal-03172026>
- [18]. Hussain H, Levacher D, (2003). « Recyclage de béton de démolition dans la fabrication des nouveaux bétons », *XXIemes Rencontres Universitaires de Génie Civil*.
- [19]. Mefteh H., Kebaïli O., Oucief H., Berredjem L. Arabi N, (2013). « Influence of moisture conditioning of recycled aggregates on the properties of fresh and hardened concrete », *Cleaner Production*, vol. 54, p. 282-288. <https://doi:10.1016/j.jclepro.2013.05.009>
- [20]. Kenai S., Debieb F. (2011), Caractérisation de la durabilité des bétons recyclés à base de gros et fins granulats de briques et de béton concassé, *Materials and Structures*, 44: 815–824 ; <https://doi:10.1017/S11527-010-9668-7>
- [21]. Wirquin E., (2000). « Utilisation de l'absorption d'eau des bétons comme critères de leur durabilité- Application aux bétons de granulats recyclés », *Materials and Structures*, 33 pp. 403-408. <https://worldcat.org/issn/13595997>
- [22]. Rebih Zaitri, Madani Bederina, Fodil Dif, Youcef Guetaf, (2015). Etude de l'influence des fines calcaires sur le comportement du béton formulé à base des granulats recyclés. *Rencontres Universitaires de Genie Civil*, May 2015, Bayonne, France. <https://hal.archive-ouvertes.fr/hal-01167746>
- [23]. NF EN 12350-2, Juin 2019. Essais pour béton frais – Partie : essais d'affaissement.
- [24]. Md El K. Bouarroudj, C. Colman, E. Robinet, Z. ZhaoA , F. Michel, L. Courard, S. Remond, D. Bulteel (2017). Utilisation du béton recyclé dans la formulation des bétons auto-compactants, 18e édition des Journées scientifiques du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton (RF)²B.
- [25]. Cachim. (2009). Mechanical properties of brick aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.* 23(3), 1292- 1297. <https://doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.07.023>
- [26]. Khatib, J. (2005). Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. *Cem. Concr. Res.* 33(4), 763– 769. <https://doi:10.1016/j.cemconres.2004.06.017>
- [27]. Khalaf, F. M., & DeVenny, A. S. (2004). Performance of brick aggregate concrete at high temperatures. *J. Mater. Civ. Eng.*, 556-565.
- [28]. Khudhair M.H.R., Elyoubi M.S., Elharf A., (2017). “Formulation and characterization of a new ecological cementitious material at base of different percentage of limestone fillers: Study of physical -chemical and mechanical properties”,

- Materials and Environmental Science, 2017 Vol. 8, N° 11, pp. 3973-3985.
<https://www.jmaterenvirosnci.com>
- [29]. Bederina M, Makhloufi Z, Bouziani T. (2011). Effect of limestone fillers the physic-mechanical properties of limestone concrete. *Phys Proc.* 21:28–34.
<https://doi:10.1016/j.phpro.2011.10.005>
- [30]. NF EN 196-1, Septembre 2016. Méthodes d'essais des ciments – Partie 1 : détermination des résistances.
- [31]. Rebih Zaitri, Salim Guettala & Madani Bederina, (2018). Physico mechanical properties of mortars based on the addition of dune sand powder and the recycled fines using the mixture design modelling approach, *Journal of Adhesion Science and Technology*, <https://doi:10.1080/01694243.2018.1434032>
- [32]. Bektas, F., Ceylan, H., & Wang, K. (2009). Effects of crushed clay brick aggregate on mortar durability. *Constr. Build. Mater.*23(5), 1909-1914.
<https://doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.09.006>
- [33]. Bazaz, J. B., & Khayati, M, (2012). Properties and performance of concrete made with recycled lowquality crushed brick. *J.Mater. Civ. Eng.* 24(4), 330-338.
- [34]. Ge, Z., Gao, Z., Sun, R., & Zheng, L, (2012). Mix design of concrete with recycled clay-brick-powder using the orthogonal design method. *Constr. Build. Mater.* 31, 289–293. <https://doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.01.002>
- [35]. Afshinnia, K., & Poursaeae, A. (2015). The potential of ground clay brick to mitigate Alkali–Silica Reaction in mortar prepared with highly reactive aggregate. *Constr. Build. Mater.*95, 164–170.
- [36]. Navratilova, E., & Rovnanikova, P. (2016). Pozzolanic properties of brick powders and their effect on the properties of modified lime mortars. *Constr. Build. Mater.* 120, 530–539. <https://doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.05.062>
- [37]. Patrícia S. Lovato, Edna Possan, Denise Carpena Coitinho Dal Molin, Ângela B. Masuero, José Luis D. Ribeiro, (2012). Modeling of mechanical properties and durability of recycled aggregate concretes, *Construction and Building Materials* 26, 437–447. <https://doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.06.043>
- [38]. Antonio Eduardo Bezerra Cabral, Valdir Schalch, Denise Carpena Coitinho Dal Molin, José Luis Duarte Ribeiro, (2010). Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials* 24, 421–430.
<https://doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.10.011>
- [39]. Mayandi Venkatesan, Qammer Zaib, Izhar Hussain Shah, Hung Suck Park. (2019). Optimum utilization of waste foundry sand and fly ash for geopolymer concrete synthesis using D-optimal mixture design of experiments. *Resources, Conservation & Recycling*, 148, pp. 114–123. <https://doi:10.1016/j.resconrec.2019.05.008>
- [40]. Varanda, C. Portugal, I. Ribeiro, J. Silva, A.M.S. Silva. C.M. (2017). Optimization of bitumen formulations using mixture design of experiments (MDOE). *J. Constr. and Build. Mater.*, 156, pp. 611-620.
<https://doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.08.146>

V.1 Introduction

Au fur et à mesure de l'accélération de l'urbanisation en Algérie, la pénurie de sable et de granulats et l'augmentation des déchets solides de construction ont émergé et sont devenues plus sévères [1]. Dans ce contexte, la réutilisation des agrégats de béton recyclé a été promue pour les avantages spécifiques de résoudre cette situation de dilemme. Les structures en béton à haute performance ont été largement utilisées dans le génie civil, les ponts autoroutiers, les ponts maritimes transversaux et les ponts ferroviaires [2,3]. Les eaux salées et les sols salins des zones côtières ou aride de notre territoire sont riches en ions agressifs (c'est-à-dire sulfate, chlorure et magnésium) [4,5]. Les structures en béton ancrées dans des sols salins et de l'eau de mer sont exposées à l'environnement de corrosion à un âge très précoce et plus vulnérables au risque potentiel de problèmes de durabilité, mais moins d'attention a été reçue [6].

L'expérience montre que l'attaque chimique des matériaux cimentaires lorsqu'ils sont exposés à l'eau de mer est plus complexe que ceux qui sont exposés aux sulfate de sodium, à cause du nombre important de sels dissous qui sont présents. L'eau de mer contient des chlorures de sodium, chlorures de magnésium, des bicarbonates de potassium, et surtout du magnésium, ainsi que les sulfates de calcium et du gypse. L'attaque au sulfate présenté dans l'eau de mer peut induire de graves problèmes de dilatation interne, de dégradation de la résistance et de durabilité du béton [7]. L'ion sulfate externe pénètre dans le béton et réagit avec l'hydroxyde de calcium dissous pour former du gypse, et peut en outre réagir avec les produits d'aluminate d'hydratation de la pâte de ciment, de même que l'aluminate tricalcique, l'aluminate tétracalcique, le monosulfoaluminate de calcium pour former l'ettringite [8-10]. Les produits coûteux en volume de l'ettringite se développent dans les micropores du béton, puis la contrainte expansive s'exerce sur la paroi des pores, provoquant des micro-fissures et des dommages au béton [11,12].

Généralement, les analyses des caractéristiques de la durabilité du béton recyclé sont relativement inférieures au béton à granulats naturels [17,18]. L'agrégat recyclé obtenu par concassage mécanique induit des micro-fissures à l'ancien mortier collé, ce qui va augmenter l'absorption d'eau, la perméabilité, l'indice de concassage et diminuer la densité apparente [20,21]. La quantité de mortier collé et la qualité relative du béton d'origine ont un impact important sur la durabilité du béton recyclé [22]. La structure multi-interface de l'interface est

la région faible des agrégats du béton recyclé, et en particulier pour la zone de transition interfaciale qui est généralement la région la plus faible [20]. La durabilité du béton à granulats recyclés est également affectée par l'interface de la zone de transition, car il possède une perméabilité et une porosité plus élevées que le béton naturel [24]. À cet égard, des recherches ont fait des amples efforts sur la façon d'améliorer les performances du béton à granulats recyclés, comme l'utilisation d'une approche de mélange en deux étapes et de superplastifiants dans la préparation du béton [25,26], le prétraitement de carbonatation [27], l'ajout d'adjuvants minéraux de fumée de silice, cendres volantes et cendres volcaniques [28].

Ces dernières années, un grand nombre d'études ont montré que le béton recyclé était plus vulnérable aux attaques de chlorure, à la carbonatation, aux attaques de gel et de dégel, au retrait de séchage et à d'autres problèmes de durabilité [29]. Cependant, peu de recherches ont rendu compte de la résistance aux sulfates du béton recyclé. Zega [30] a réalisé une expérience de terrain à long terme de dix ans sur le béton à granulats recyclés partiellement immergé dans le sol sulfaté, et a révélé que la teneur en granulats recyclés n'a pas d'impact significatif sur la résistance au sulfate. Xiao [31] a étudié le béton à granulats recyclés avec différents taux de remplacements soumis aux cycles combinés d'attaque au sulfate et de gel-dégel. Bing [32] a révélé que la résistance aux sulfates des agrégats recyclés exposés à des cycles de séchage-mouillage est significativement affectée par le remplacement des granulats recyclés, et que la durabilité peut être modifiée par l'ajout de minéraux de FA et de GBFS. Xie [33] a découvert que l'utilisation de laitier granulé de haut fourneau (GGBS) et d'un géopolymère à base de cendres volantes peut améliorer efficacement la résistance aux sulfates du béton recyclé.

Afin d'étudier le mécanisme de dégradation et de corrosion des bétons à granulats recyclés exposés à l'attaque du sulfate dans des conditions d'immersion totale. Cinq types d'échantillons en béton recyclé ont été préparés et la proportion d'agrégats recyclés remplaçant les agrégats fins naturels sont détaillés par la suite. Les échantillons ont été entièrement immergés dans de l'eau de mer. La micro-observation et l'analyse ont ensuite été effectuées par des tests MEB et des analyses thermique ATG-DSC et ATD-DSC.

V.2 Procédure expérimentale des analyses de durabilité MEB et ATG/ATD

Les différentes éprouvettes de BHP préparées sont conservées en salle humide (20°C, 95% HR) pendant 24 h. Elles sont ensuite mises dans un bain de conservation (eau de mer). La durée de conservation a été fixée à 28 jours et 180 jours.

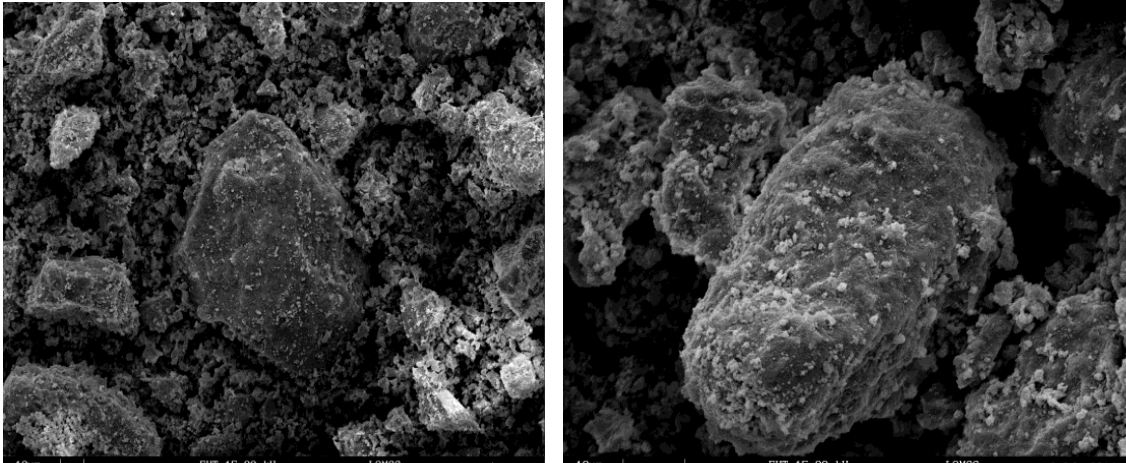
Cette prospection rapporte les résultats de la microstructure des BHP réalisés avec un sable alluvionnaire seul servant de référence et un sable substitué partiellement par du sable de brique et du sable de béton.

L'évolution des différentes phases cristallines présentes dans le béton ou nouvellement formées est suivie par des observations au microscope. L'appareil utilisé est un Microscope Electronique à Balayage destiné à l'observation d'échantillons secs et rendus conducteurs par dépôt d'Or-Palladium superficiel et à l'analyse par un spectromètre de dispersion d'énergie. Les minéraux sont observés au MEB, la micro-analyse qui lui est associée permet de confirmer leurs compositions chimiques.

Ces déterminations concernent aussi bien les formations superficielles dues aux bains de conservation que les formations internes initiales et leurs évolutions dans le temps. En parallèle à ces essais, nous avons suivi l'évolution la variation de masse en utilisant l'analyse thermique différentielle et l'analyse thermique gravimétrique des BHP recyclés.

V.3 MEB sur les fines de déchets de brique et du béton

Les photos de microscopie à balayage (Figure V.1) montrent que les fines obtenues après le broyage des déchets de brique et du béton, ont en général des formes plutôt cubiques angulaires, avec différentes dimensions, de diamètre inférieur à 80 μm , et une surface externe rugueuse et poreuse.



a) Béton broyé

b) Brique broyée

Figure V.1. Photos MEB des poudres de déchets de béton et de brique broyés.

V.4 MEB sur BHP recyclés à base de déchet de brique et de béton concassé

Les essais de microscopie électronique à balayage ont été effectués sur des bétons à haute performances à base du granulats fin recyclé issue de déchets de brique et de béton concassé et sur le BHP témoin.

Les bétons choisis pour ses essais de MEB sont ceux définis dans le chapitre précédent :

- Le BHP1 qui est composé de 100% de substitution de sable de déchet de béton (100% SDBt),
- Le BHP2 qui présente la composition optimale (25% SDBr et 75% SDBt),
- Le BHP5 qui est composé de 100% de substitution de sable de déchet de brique (100% SDBr),
- Le BHP11 qui est composé du trois sable (50% SA, 25% SDBr et 25% SDBt),
- Le BHP15 qui présente le béton témoin

Les essais effectués après 180 jours de cure humide ont montré les résultats rapportés sur les figures V.2, V.3, V.4, V.5 et V.6.

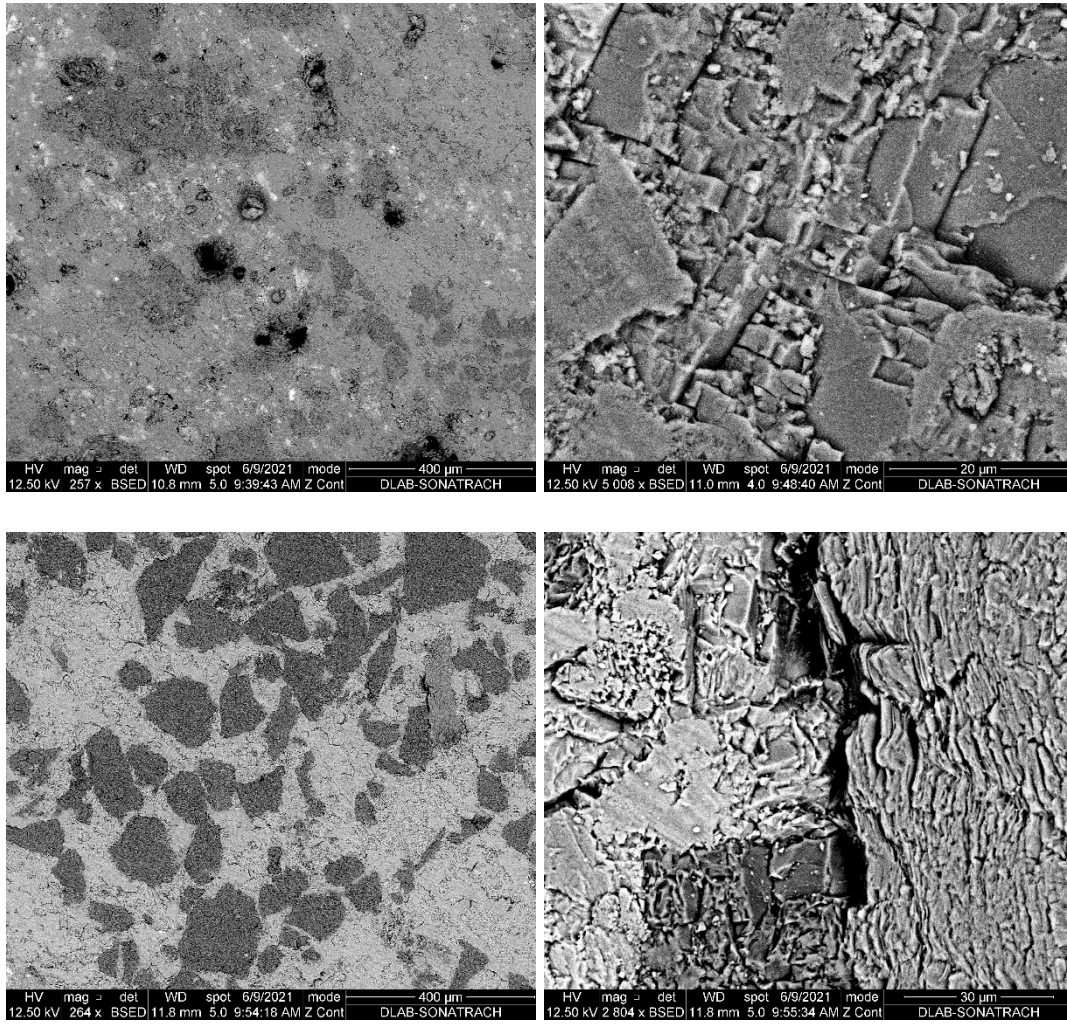


Figure V.2. MEB sur béton de référence BHP15.

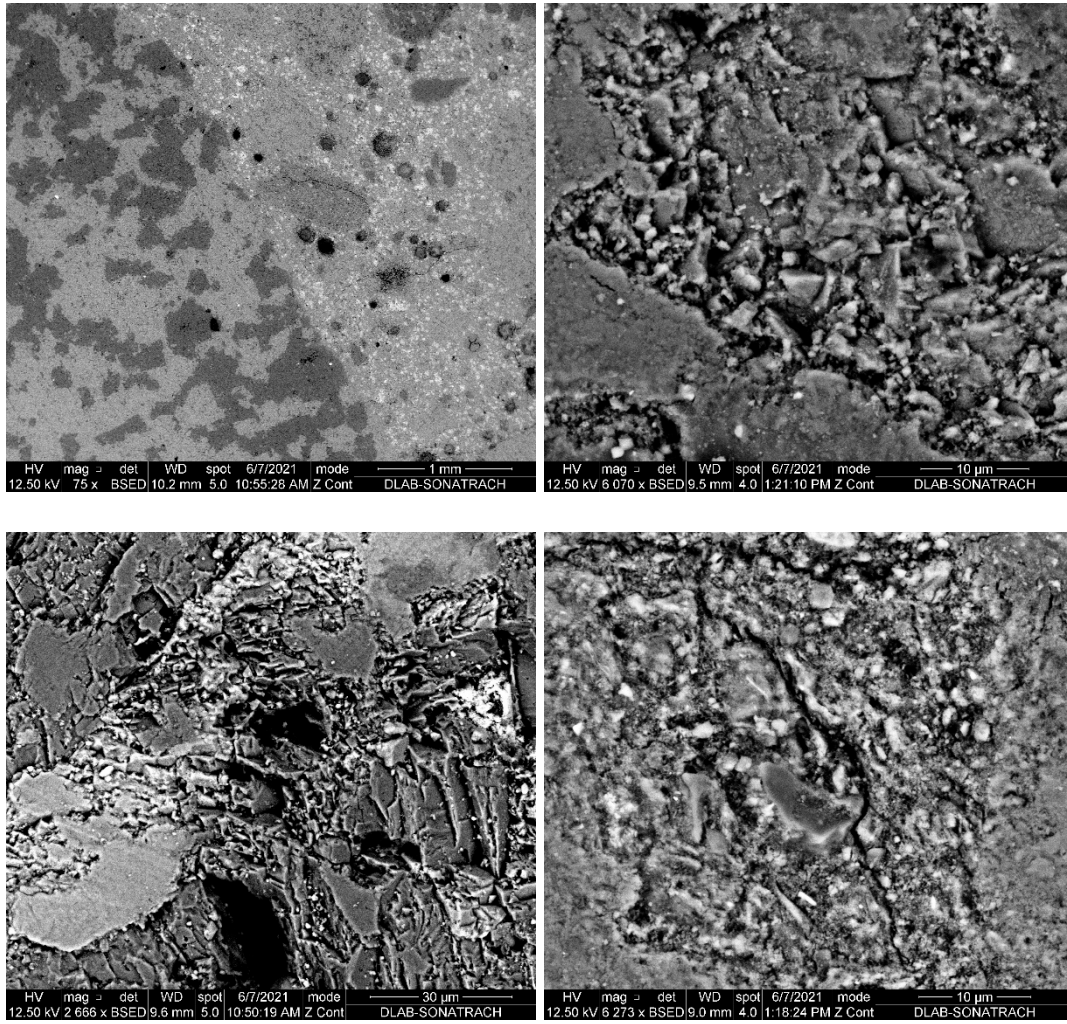


Figure V.3. MEB sur béton BHP1 à base du granulats fin de déchets de béton (100% SDBt).

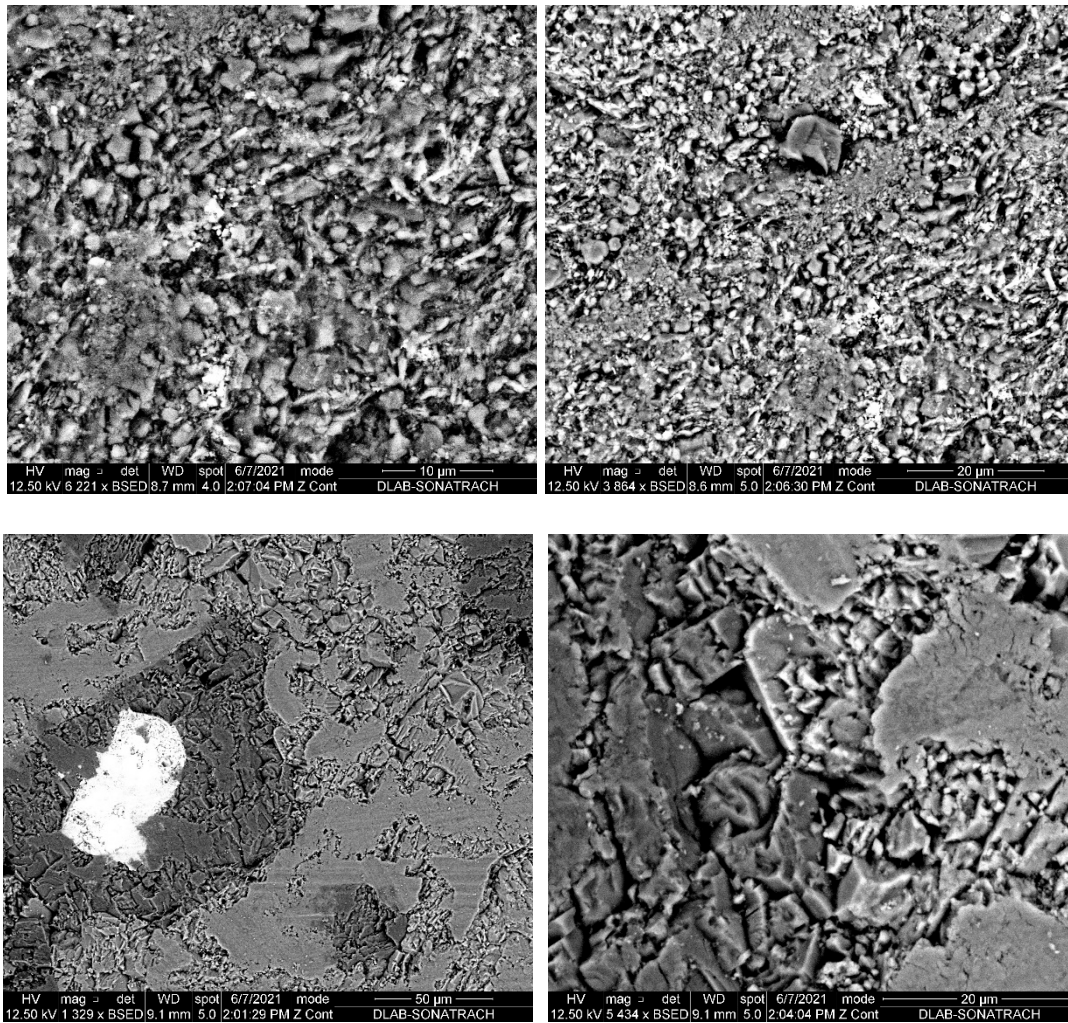


Figure V.4. MEB sur béton BHP2 à base du granulats fin de déchets de brique (0%SA, 25% SDBr, 75% SDBt). « BHP optimum ».

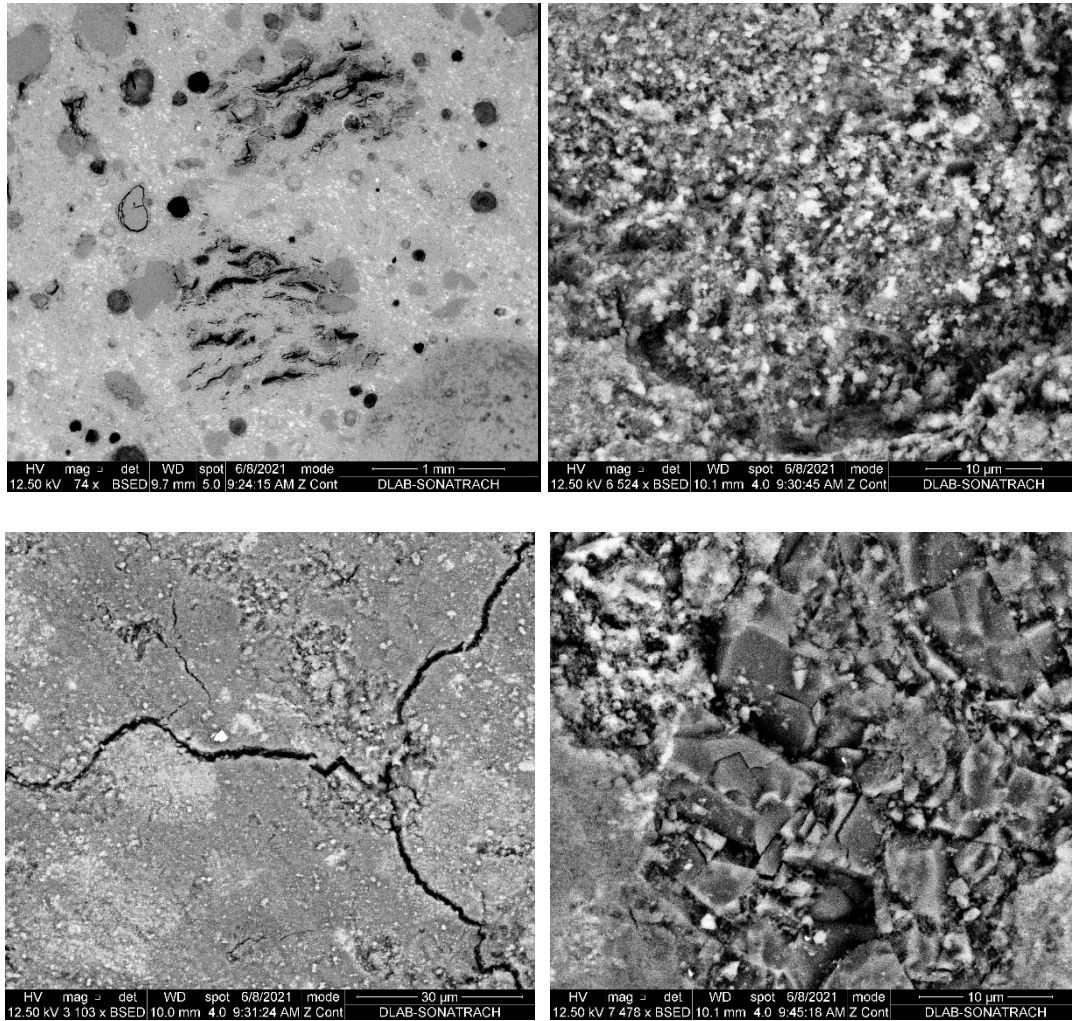


Figure V.5. MEB sur béton BHP5 à base du granulats fin de déchets de brique (100% SDBr).

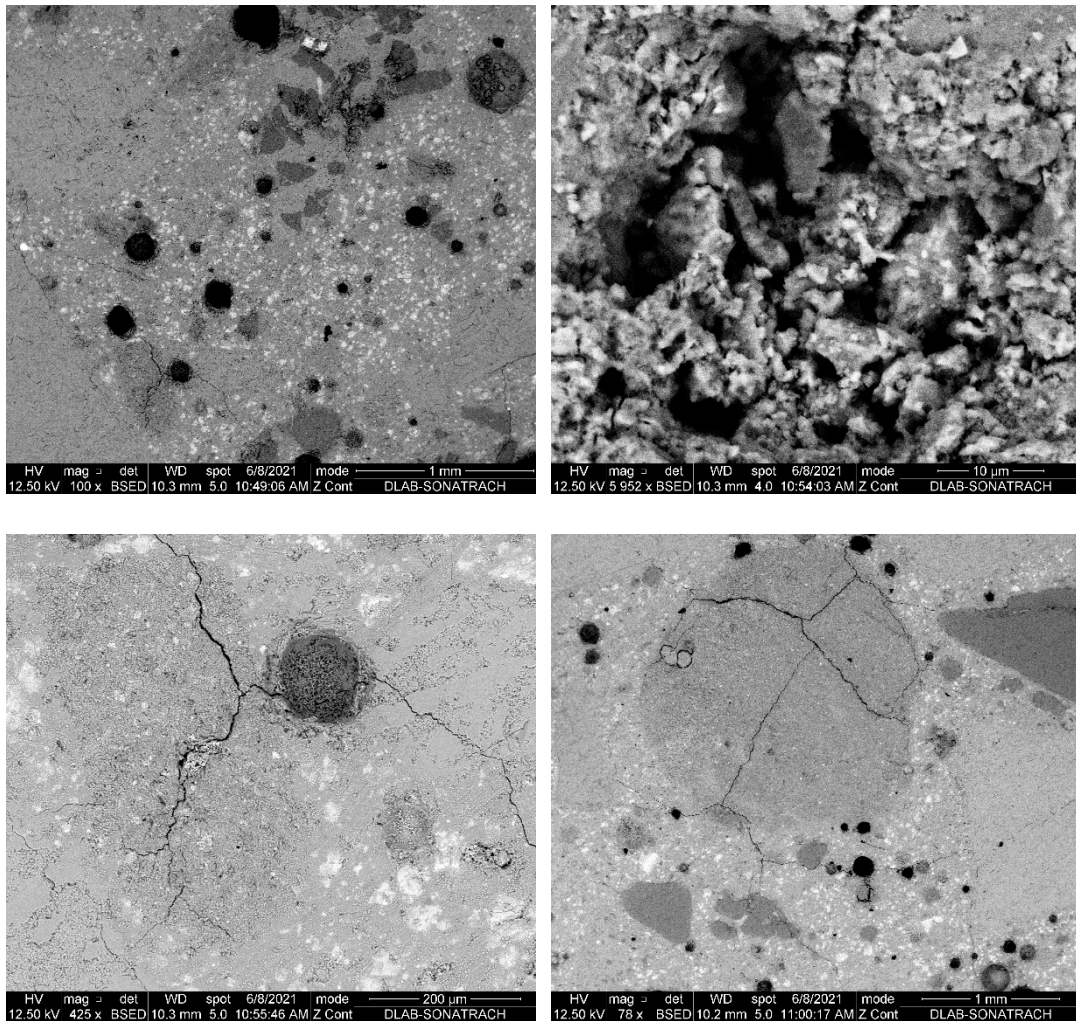


Figure V.6. MEB sur béton BHP11 à base du granulat fin de déchets de béton et brique concassé (50%SA, 25% SDBr, 25% SDBt).

L'analyse au microscope à balayage, montre que la morphologie des BHP à base des sables des déchets de briques et de béton recyclés est très différente par rapport aux BHP témoin. On constate l'apparition de nombreux petits cubes dans les BHP à base de sable de béton concassé (BHP1 et BHP2). Ces petits cubes représentent la calcite qui empêche de voir les hydrates (Fig V.3 et V.4). On remarque aussi dans les bétons à haute performance (BHP15, BHP1 et BHP2), qu'il y a plus d'hydrates en forme d'aiguilles représentant l'ettringite. Cependant il faut noter qu'on ne trouve pas de différences morphologiques importantes entre les bétons à base de fines de brique BHP5 et le BHP11.

La comparaison des photographies des bétons à haute performances à base du SDBt (BHP1) avec celui à base SDBr (BHP5), montre que le premier BHP1 présente une texture bien

homogène, compacte et riche en cristaux au contraire que BHP5 qui a une structure clairement moins compacte.

Les photographies ainsi obtenues montrent que la différence entre le béton à base du sable de déchet de brique BHP5 et le béton témoin-BHP15 devient plus visible. Ces photographies montrent clairement que le béton BHP5 a une structure très poreuse par rapport au béton témoin ; on constate aussi que des pores se développent surtout autour des grains de sable (voir BHP11). En examinant la photographie obtenue avec BHP5, on s'aperçoit rapidement que la structure de cette dernière apparaît moins compacte (apparition des vides et des fissures), notamment dans la zone de transition autour des grains de sable et/ou dans les grains. De plus, dans les bétons BHP1 et BHP2 (optimum), les grains de sable apparaissent bien enveloppés dans la matrice cimentaire, ce qui augmente l'adhérence (pâte-granulats).

L'utilisation de la fumée de silice favorise la formation de nouveaux produits d'hydratation (comme le C S H) et le colmatage des fissures existantes, conduisant à une diminution du ratio local w/c et à une densification de la zone de transition inter-faciale pâte/agrégat recyclé, ce qui densifie la surface des granulats recyclés et empêcheront l'absorption d'eau en créant une surface imperméable. En effet, le BHP a une matrice bien compacte qui empêche la pénétration des agents agressifs à l'intérieur du béton recyclé.

V.5 ATD/ATG appliqué sur les différents bétons à haute performance

Lors d'une analyse calorimétrique/gravimétrique, les composants du produit, sont soumis à de hautes températures : ils se décomposent et libèrent de l'eau et/ou du dioxyde de carbone. La mesure de ces différentes pertes de masse permet d'évaluer la part d'eau ayant réagi lors de la fabrication de ces matériaux.

Lors d'une analyse calorimétrique différentielle, menée en parallèle de l'analyse thermo gravimétrique, la présentation de l'évolution du flux thermique permet d'identifier les différents produits d'hydratation formés. Chaque pic endothermique peut être attribué à une phase hydratée.

Exemple : - Le pic à 575°C correspond au quartz (la silice)
- Le pic à 766°C correspond à la calcite.

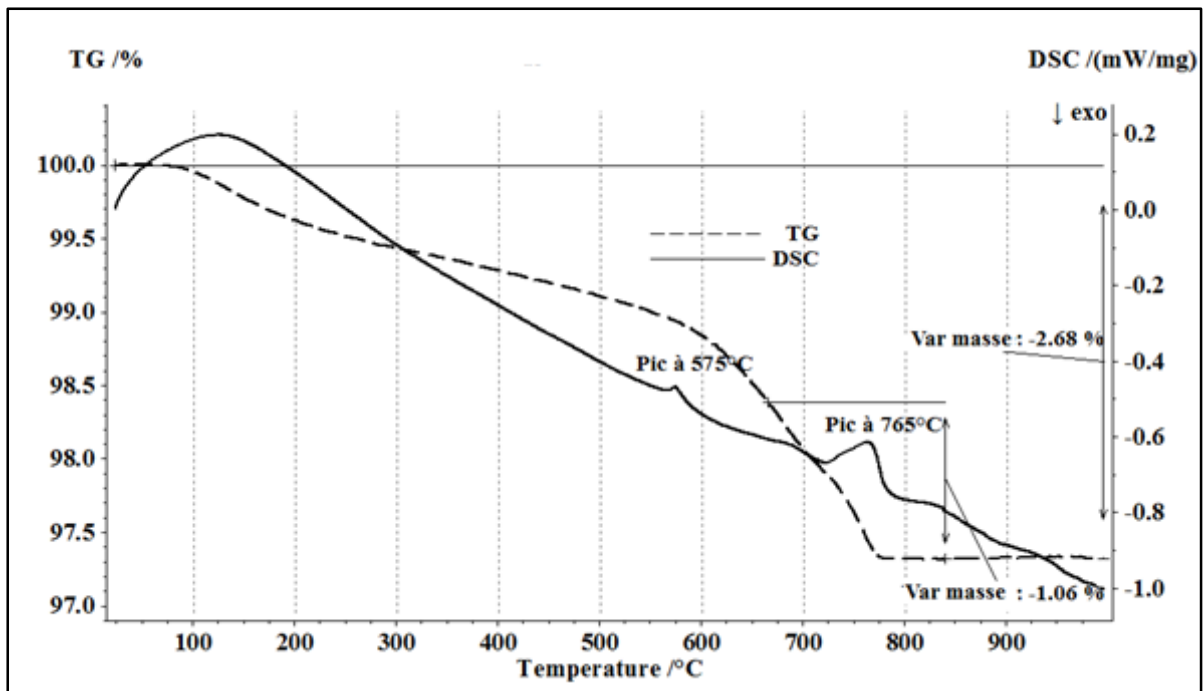


Figure V.7 : Analyse calorimétrique différentiel des fines de brique.

La figure V.7 montre les résultats de l'analyse calorimétrique différentielle de la fine de brique. On remarque que le pic de la calcite pour la fine de déchets de brique, apparaît à la température de 766°C. Etant donné que les briques sont des matériaux qui ont déjà reçu un traitement thermique lors de leur fabrication, ils ne sont pas censés réagir face à la chaleur, sauf si la température dépasse celle de leur calcination initiale. Le pic de la calcite apparaissant autour de la température de 766°C, il devient évident que la température maximale utilisée pour la fabrication de ces briques était d'environ 760°C.

Il est à remarquer de même, que la perte de masse totale est de 2.68% alors que la perte de masse correspondant à la réaction de la calcite est de 1.06%. Ces résultats dépendent du temps de calcination utilisé lors de la fabrication des briques. Ces taux peuvent diminuer, par exemple, avec l'augmentation de la durée de calcination à l'usine.

V.5.1 ATD/ATG sur les BHP recyclés et témoin à différents âges

Les figures V.8, V.9, V.10, V.11 et V.12 montrent les résultats de l'analyse calorimétrique différentielle des cinq BHP à différentes proportions des trois sables utilisés.

Pour la température varie entre $100 \leq T \leq 500$ °C, la perte de masse correspond à l'évaporation de l'eau liée et elle nous renseigne sur l'état d'hydratation des différents liants.

Par contre pour la température qui varie entre $400 \leq T \leq 500$ °C correspond à la réaction thermique de la portlandite.

On remarque que plus le taux de substitution du sable par les déchets de brique augmente, plus l'hydratation du liant diminue, car la perte de masse entre la température $100 \leq T \leq 500$ °C est plus faible dans le BHP5 (100% SDBr) par rapport au BHP15 (100% SA). L'hydratation de BHP5 est réduite de 26%. Ce qui est autant valable pour le mélange ternaire des trois sables ou la diminution de masse de BHP11 est de l'ordre de 46%.

Par contre on constate pour le même intervalle $100 \leq T \leq 500$ une augmentation de masse avec l'augmentation de taux de substitution du sable par les déchets de béton pour le BHP1 et BHP2 de l'ordre de 18,67% et 4,03% respectivement.

Après 180 jours de cure humide, on remarque que les taux d'hydratation de l'ensemble des mélanges incorporant les sables de déchet de brique dépassent nettement celui de BHP témoin. A cet âge, le taux d'hydratation de BHP15 a baissé par rapport aux résultats obtenus à 28 jours. Le BHP 2 donne les meilleurs résultats, et les taux d'hydratation ont été améliorés pour le BHP5 et le BHP11 de l'ordre de 12% et 5% respectivement.

D'après les données de la littérature nous savons que les fillers calcaires influencent sur l'hydratation du béton à court terme [34-36]. Plusieurs chercheurs ont montré que les fillers calcaires ont une influence physico-chimique sur la matrice cimentaire [37, 38]. Les particules de fillers calcaires qui agissent comme un site de nucléation pour les produits d'hydratation, réduisent les barrières énergétiques et permettent une précipitation plus rapide des produits d'hydratation. De ce fait, les taux d'hydrations augmentent à court terme, ce qui est décrit comme un effet d'accélération [39-40]. Dans notre cas l'augmentation des taux d'hydratation à court terme dans les BHP composé du sable de béton est attribuée en grande partie au fait que le ciment utilisé contient environ 20% de filler calcaire, et la substitution de sable alluvionnaire par le sable de béton riche en calcaire (82% de calcite dans le sable de déchet de béton recyclé, (voir tableau III.10 et tableau III.11 du chapitre III) a augmenté les taux de calcaire ce qui a provoqué alors des augmentations dans les taux d'hydratation à court terme.

Les fumées de silice permettent d'augmenter très rapidement la résistance en compression des bétons et des mortiers surtout entre 7 et 28 jours de mûrissement, ainsi qu'à long terme, plus de 91 principalement à l'effet jours, la progression de la résistance en compression est légèrement ralentie par la présence des fumées de silice. L'activité pouzzolanique des fumées de silice permet la formation d'un nouveau type de CSH plus dense, ce qui a pour effet de réduire plus rapidement la porosité totale initiale des bétons et des mortiers. Ceci a été simultanément observé lors de l'analyse de la microstructure de spécimens examinés au microscope électronique à balayage [Pinsonneault, Philippe. 1983].

En contrepartie, les fines de brique retardent l'hydratation du BHP, au jeune âge jusqu'à 28 jours d'hydratation à cause d'une baisse de l'activité cimentaire. Cette baisse d'activité cimentaire est attribuée à la substitution de sable par les fines de brique riche en silice.

Entre 28 et 180 jours, l'amélioration de l'hydratation de tous les mélanges incorporant les sables du déchet de brique est dû pouzzolanique entre la silice provenant de la brique et la portlandite provenant de l'hydratation du ciment, voire aussi à l'hydratation du ciment qui est prolongé par la présence des fines de brique, ou à une combinaison de ces deux réactions. Enfin, la chute du taux d'hydratation après 28 jours pour les BHP témoins est probablement due à la carbonatation de la portlandite par la réaction suivante :

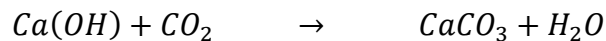


Tableau V.1 : ATG pour les BHP recyclés à base de déchet de brique et du béton après 28 jours et 180 jours de cure humide.

T (°C)	% de substitution				Perte de masse à 28 jours (%)				Perte de masse à 180 jours (%)					
	SA (%)	SDBr (%)	SDBt (%)	SDBt (%)	31-275	275-579	100-579	579-788	788-900	31-275	275-579	100-500	500-788	788-900
BHP1	0	0	1	1	5.646	1.683	7.329	4.889	22.687	6.84	1.78	8.62	5.081	21.753
BHP2	0	0,25	0,75	1	5.158	1.267	6.425	4.574	23.647	7.594	1.886	9.48	5.805	22.58
BHP5	0	1	0	0	3.561	1.007	4.568	4.803	17.368	4.335	1.12	5.455	4.914	16,43
BHP11	0,5	0,25	0,25	0,25	3.345	/	3.345	26.888	4.248	0.665	4.913	25.06		
BHP15	1	0	0	0	5.027	1.149	6.176	4.271	21.518	4.223	1.288	5,511	5.846	19.781

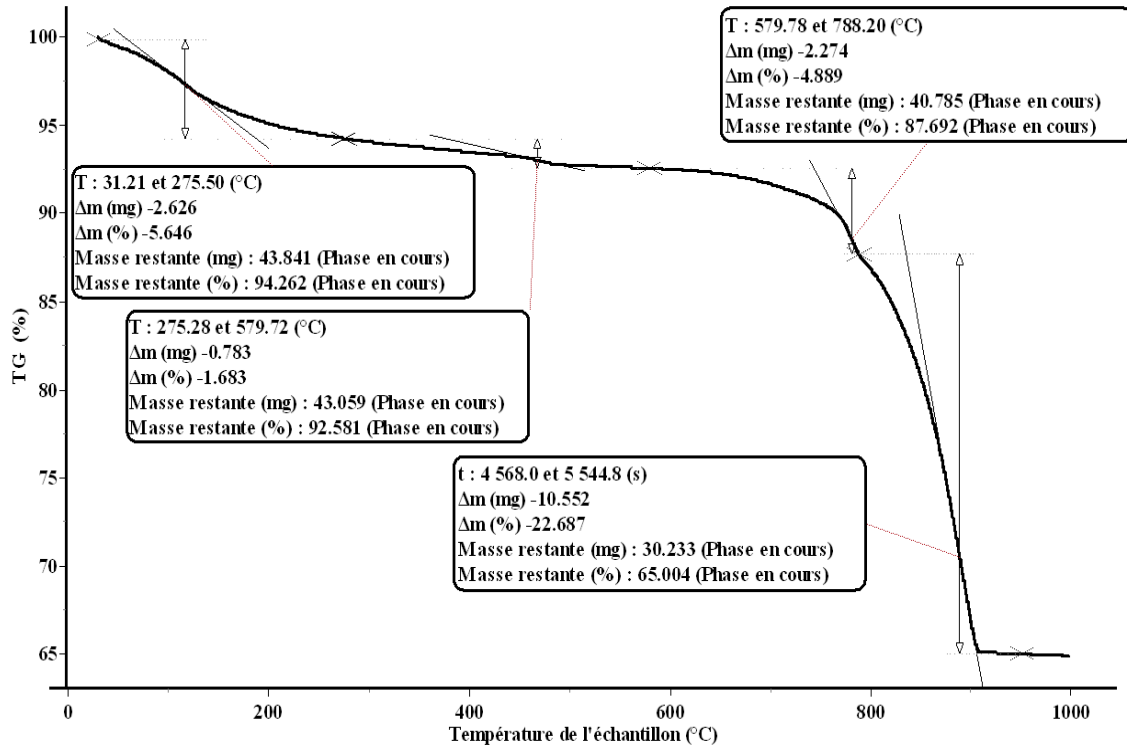


Figure V.8 : ATG sur mortiers BHP1 à base 100% de SDBt (100% sable de béton recyclé), après 28 jours de cure humide.

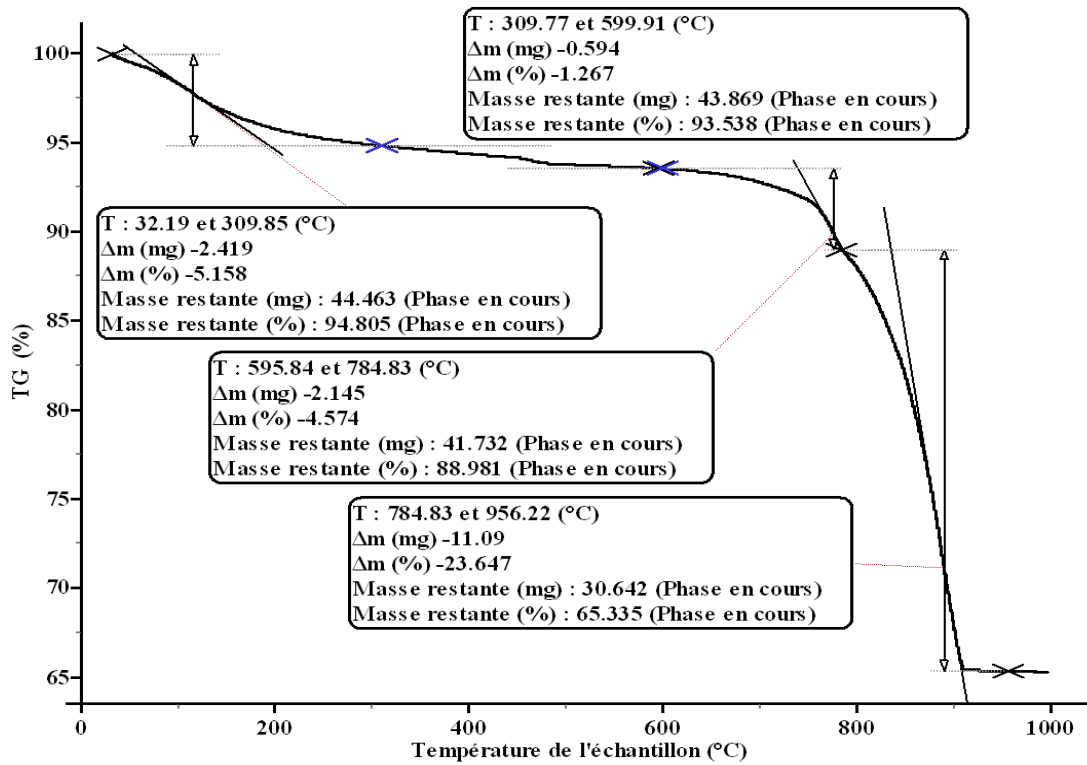


Figure V.9 : ATG sur mortiers BHP2 « optimum » (25% SDBr et 75% SDBt), après 28 jours de cure humide.

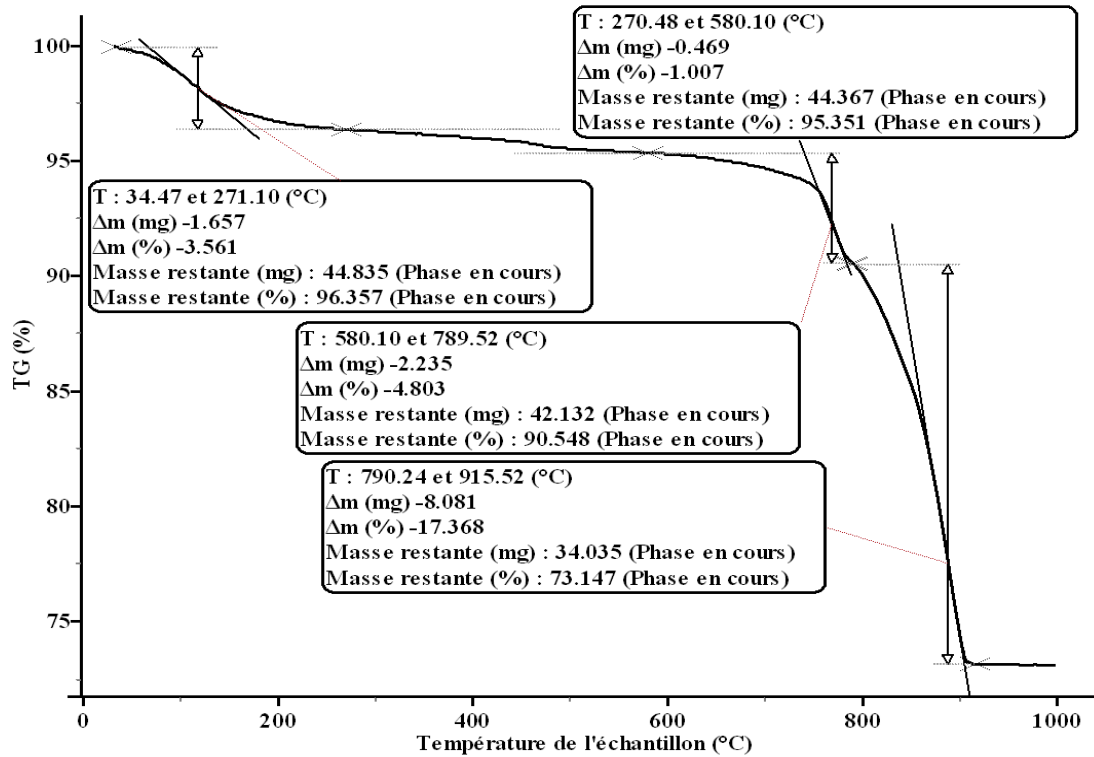


Figure V.10 : ATG sur mortiers BHP5 à base 100% de SDBr (100% sable de brique recyclé) , après 28 jours de cure humide.

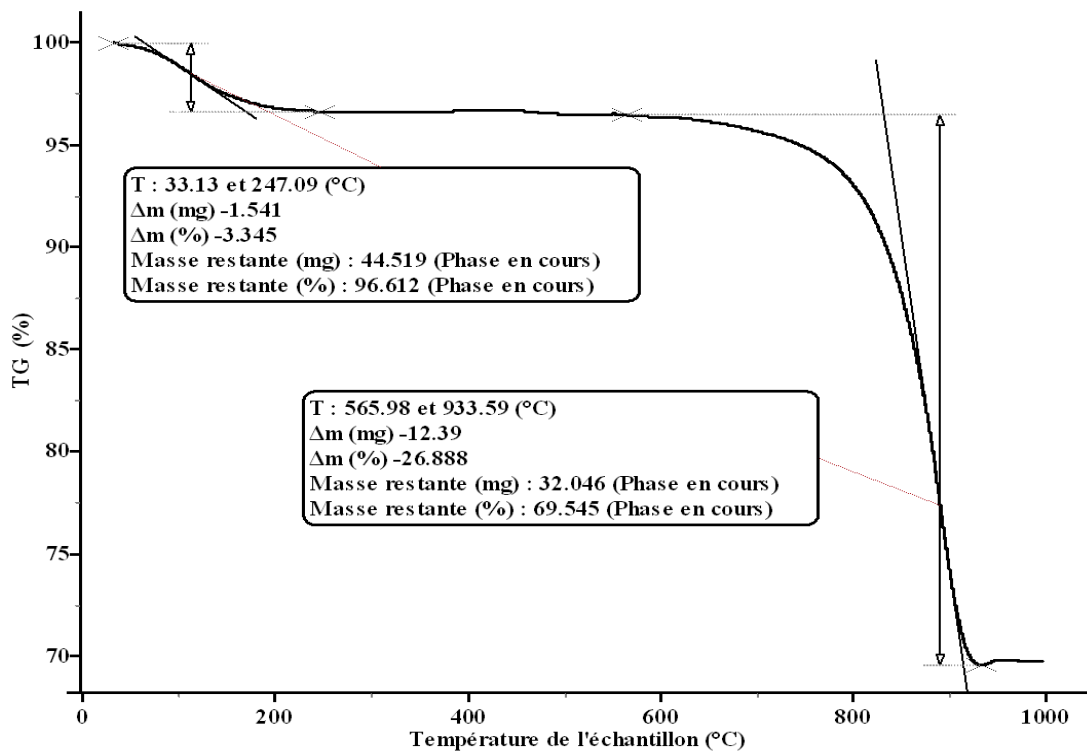


Figure V.11 : ATG sur mortiers BHP11 « béton ternaire » (50% SA, 25% SDBr et 25% SDBt) , après 28 jours de cure humide.

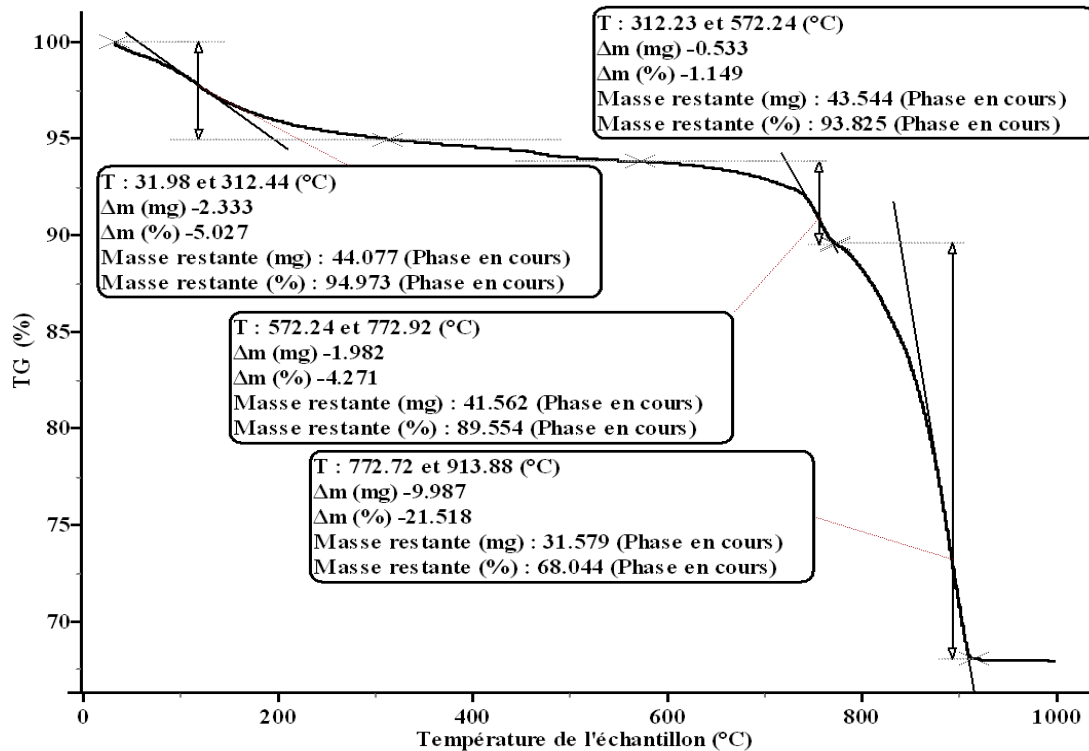


Figure V.12 : ATG sur mortiers BHP15 « béton témoin de référence », après 28 jours de cure humide.

La comparaison des graphiques ATG/ATD du BHP1 (100% SDBt), BHP5 (100% SDBr) et le BHP15 (BHP de référence) présenté dans les figures V.8, V.10 et V.12 respectivement, montre que dans la gamme 30-312 °C tous les échantillons ont montré une perte de masse significative, ce qui peut s'expliquer par des réactions de déshydratation d'hydrates tels que le silicate de calcium hydraté (CSH), l'ettringite et le monosulfoaluminate [43–46]. On remarque ainsi, les fines de brique présentes dans BHP5 produit des retards dans l'apparition des pics de flux de chaleur à une température de 34.5°C (par rapport le $T_{BHP15} = 31.98^{\circ}C$). Et une réduction de la chaleur d'hydratation à une valeur de $T_{BHP5} = 271.10^{\circ}C$ (par rapport le $T_{BHP15} = 312.44^{\circ}C$) à l'égard d'une perte de masse de 29% ($\Delta m = -3.561\%$) par rapport au BHP15 de référence. Tandis qu'on constate un gain de masse pour BHP1 de 12.31% par rapport au béton témoin sans effet significatif sur la chaleur d'hydratation à 28 jours de cure humide.

Aqel et Panesar [48] ont montré que la présence des fillers calcaires dans la matrice cimentaire augmente l'hydratation du ciment au jeune âge, et par conséquent la production de portlandite. Plus la finesse des fillers calcaires est élevée et plus la production de portlandite est importante.

Chikouche et all [49] ont étudié la substitution de ciment par des argiles de barrages d'eau, préparés de différentes manières de cuisson. Ils trouvent que pour certains mélanges, la teneur

en portlandite libre augmente avec le temps de murissement jusqu'à 90 jours en raison de l'hydratation de l'alite (C3S) et de la Belite (C2S), produisant les C-S-H et CH d'une part et la faible activité pouzzolanique des ajouts causés par un mode de calcination non adéquat.

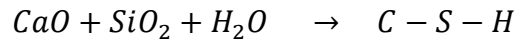
Afin de suivre de la variation de la quantité de portlandite, l'exploitation des résultats de ATD/ATG en utilisant des mélanges à base de SDBr, SDBt et SA dans l'intervalle 400-500 °C, sont donnés dans les figures V.8, V.10 et V.12 et le tableau V.1.

Dans l'intervalle 312-580 °C, la production de portlandite est réduite pour les mélanges incorporant de 100% des sables de déchet de brique « BHP5 » de 12.35% par rapport au BHP15 de référence, cependant les taux de portlandite augmentent pour les BHP comprenant des sables de déchet de béton (BHP1 et BHP2) par rapport au BHP sans substitution. L'augmentation significative du taux de portlandite pour les BHP1 et BHP2 en comparaison avec le BHP15 est due à une accélération de l'hydratation durant cette période. Il a été constaté précédemment que le taux d'hydratation des BHP1 et BHP2 est augmenté de 6 et 12% par rapport au BHP15.

L'absence du pic dans le graphique ATG/ATD du BHP11 (voir la figure V.11) pour l'intervalle 247°C-566°C, peut être expliqué par l'absence de la portlandite dans la pâte de ce mélange. Sachant que la production de portlandite est liée directement à l'hydratation du ciment, on peut alors déduire qu'à 28 jours de cure humide, la diminution de la quantité de portlandite dans les bétons contenant les fines de brique est due à une baisse de l'activité cimentaire « l'hydratation du ciment pour BHP11 est la plus faible, elle diminue de 33% par rapport au BHP15 ». Cette baisse d'activité cimentaire est attribuée en grande partie à la substitution des fines du sable alluvionnaire de type calcaire par les fines de brique qui a réduit la quantité de fillers calcaires. La présence de la moindre quantité de calcaire dans les mélanges conduit principalement à une baisse production de C-S-H et à une baisse de production de Ca(OH)₂.

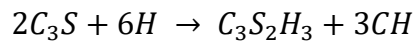
La figure V.9 montre une baisse quantité de portlandite dans le BHP2 « optimum » par rapport au BHP1 dans l'intervalle 309.77-599,91°C (figure V.8), causée par la consommation d'une partie de la portlandite issue de l'hydratation du ciment par la silice provenant des fines de brique et par conséquent une formation supplémentaire de C-S-H. Nous considérons en fin que l'effet de la substitution du sable SA par le sable de déchet de brique provoque un allongement de l'hydratation pendant des périodes pouvant être longues, ce qui atteint une température de 600°C pour BHP2 par rapport au $T_{BHP15} = 572,24°C$. L'incorporation du sable de déchet de

brique SDBr retarde légèrement l'hydratation à court terme et favorise ensuite l'effet pouzzolanique selon la réaction suivante :

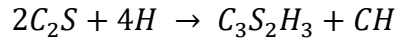


On constate que le taux de calcite est aussi réduit de 19.29% dans le BHP5 avec substitution totale de déchet de brique.

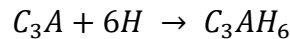
Il est bien connu que le C_3S s'hydrate rapidement et contribue largement au durcissement de la pâte de ciment à un âge précoce. Il assure donc les résistances initiales :



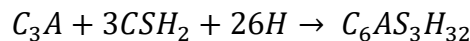
Tandis que le C_2S s'hydrate lentement et sa résistance évolue à long terme :



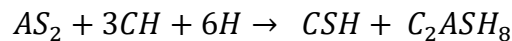
Inversement, le C_3A s'hydrate rapidement et contribue légèrement à la résistance initiale :



Ainsi que le C_4AF qui s'hydrate lentement. L'addition de sulfate de calcium permet de contrôler l'hydratation du C3A par la formation de composés moins réactifs comme l'ettringite et les sulfoaluminates :



Lorsque l'ettringite termine sa transformation, les aluminates restants réagissent avec l'eau pour former d'autres phases (C_2AH_8 , C_4AH_{13} , C_3AH_6). Dans les ciments mélangés, les composants des matières pouzzolaniques ajoutés au clinker (silice et / ou alumine) réagissent avec le portlandite pour produire plus de phases hydratées C-S-H ou CASH [50, 51]. :



Après 180 jours de cure humide (voir tableau V.1), on remarque que la production de portlandite des BHP de référence reste toujours inférieure aux productions de portlandite des mélanges BHP1 et BHP2, mais il dépasse la portlandite de BHP5. On constate ainsi que la quantité de portlandite augmente au jeune âge par rapport aux tous les mélanges. Le taux de portlandite de BHP témoins dépasse celui de BHP5 à base de fines de brique avec une marge

de différence de 13%. Les taux de portlandite pour les BHP1, BHP2 sont supérieurs par rapport au béton de référence respectivement de 38%, 46%. On constate ainsi que la restriction de l'écart entre les taux d'hydratation des BHP témoins et les BHP2 incorporant les fines de brique est dû à une augmentation de production de C-S-H. L'effet des fines de brique semble retarder l'hydratation au jeune âge puis l'accélère, sauf pour le BHP11 où son retard dans la production de C-S-H perdure jusqu'à cet âge.

Le taux de portlandite est alors presque le même pour l'ensemble des mélanges. Le BHP2 produit le plus de taux de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ par rapport au BHP1 et BHP5, en conséquence de plus de production de C-S-H. Une bonne proportion dans la matrice liante des fines de brique et de fines de béton recyclés (calcaire) semble favoriser la production de C-S-H à long terme. Dans notre cas la substitution de 25% de sable alluvionnaire par les sables de déchets de brique et 75% du sable de déchet de béton nous paraît être la meilleure formule pour le long terme.

Ces résultats nous amènent à énoncer que l'effet principal des fines de brique sur les BHP est la prolongation de l'hydratation jusqu'à de longues périodes. L'effet pouzzolanique est peu visible.

La comparaison de ces résultats avec l'effet des déchets de béton et de brique sur le BHP révèle que l'effet du sable de béton et les sables de brique provoquent plus de produits hydratés plutôt à long terme (à 180 jours) qu'à court terme (à 28 jours). La chaleur d'hydratation a été plus importante lors de la substitution du sable alluvionnaire par le sable de déchet du béton que pour la substitution des fines de brique. A long terme les fines de brique ont apporté des réactions pouzzolanique dans le ciment qui ont amélioré les produits d'hydratation dans les mélanges. De plus, les SDBr ont apporté plus d'alumine qui a réagi avec les fillers calcaires présent dans les déchets de brique, pour former des monocarboaluminates [42].

V.5.2 Evaluation du taux de portlandite des BHP

Le but de ces essais est de quantifier et d'analyser l'évolution de la portlandite, au cours du temps, issu de l'hydratation des ciments à différents taux de substitution en sable de déchets de brique et de béton. Les caractéristiques d'hydratation des ciments aux ajouts sont identifiées à l'aide des techniques ATD/ATG. Par conséquent, les pics liés à la portlandite sont situés entre 300°C et 500 °C, le pic de la silice se situe entre 570°C et 575°C, et celui de la calcite est compris entre 600 et 800°C (voir la figure V.13) [52]. Au-dessous de 200°C, les pics des gels

C-S-H, de l'ettringite et de l'eau contenue dans les mélanges sont superposés rendant leur distinction difficile. Les taux de portlandite sont évalués dans les différents mélanges à travers les résultats des tests ATD/ATG par la formule suivante :

$$Ca(OH)_2 = \frac{\frac{74Dm_1}{18} + \frac{74 Dm_2}{44}}{Me + Dm} \quad (\text{gramme de portlandite /gramme de ciment})$$

Dm_1 : Perte de masse de la portlandite,

Dm_2 : Perte de masse de la calcite,

Me : Masse de l'échantillon,

44 : Masse molaire du CO_2 ,

18 : Masse molaire de H_2O ,

74 : Masse molaire du $Ca(OH)_2$.

Les résultats sont présentés dans le tableau V.2.

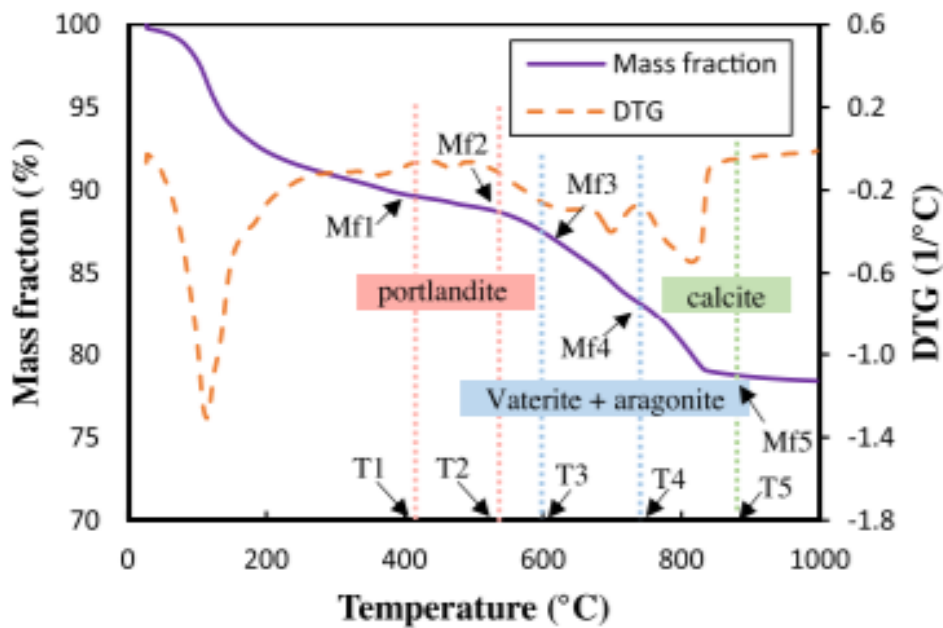


Figure V.13 : Modèle de type de traitement des courbes d'analyse thermogravimétrique [52].

Tableau V.2 : Taux de portlandite des BHP à base de déchets de béton et de brique en fonction de l'âge

Mélange	Age	
	28 jours	180 jours
BHP1	13,21 %	14,84 %
BHP2	12,19 %	16,27 %
BHP5	11,55 %	12,44 %
BHP11	11,25 %	12,13 %
BHP15	11,29 %	14,12 %

Après 28 jours de cure humide. Le taux de portlandite des BHP de référence reste toujours inférieur aux autres mélanges, sauf pour le BHP11 on constate qu'il y'a une diminution en terme de production de Ca(OH)_2 . Les taux de portlandite ont augmenté durant cette période pour les mélanges BHP1, BHP2 et BHP5 respectivement de 17%, 8%, et 2%.

Après 180 jours de cure humide, les taux de portlandite du BHP11 ont progressé par rapport au jeune âge, alors que l'écart de différence des taux de portlandite entre le BHP15 et BHP1 (augmentation de 5%) ainsi que BHP15 et BHP5 (diminution de 12%) est nettement réduit par rapport aux résultats de 28 jours. On note aussi que le taux de portlandite du BHP2 dépasse nettement celui du BHP1. Les taux de portlandite ont baissé par rapport au BHP de référence pour les BHP5 et BHP11 respectivement de 12% et 14%.

V.6. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de mieux comprendre les effets de la substitution du sable alluvionnaire par les granulats du déchet de brique SDBr et de béton concassé SDBt sur l'évolution des caractéristiques des BHP dans un environnement chimiquement agressif afin de connaître les phénomènes de l'attaque des BHP par l'eau de mer. A partir de cette étude expérimentale, il en ressort les conclusions suivantes :

- La substitution de sable par les granulats de déchets de brique, provoque de légère perte de consistance des pâtes, due au caractère adsorptif des argiles calcinées.

- L'incorporation des fines de brique dans les pâtes cimentaires, provoque des retards dans le début et la fin de prise et plus le taux de substitution de sable par les granulats de déchet de brique augmente et plus ce retard devient important.
- La substitution de ciment par de fumé de silice de 10% dans notre cas, engendre une bonne consistance de pâte de ciment ce qui améliore la durabilité de béton vis-à-vis la pénétration des agents agressifs.
- La substitution du sable alluvionnaire par les fines de brique, provoque la réduction de la chaleur d'hydratation et des retards dans l'apparition des pics de flux de chaleur dans le cas de l'utilisation du BHP5, dans le cas de BHP11 on constate une augmentation de la chaleur d'hydratation par rapport au BHP témoin, tandis que le BHP1 et BHP2 la réduisent. L'apparition des pics de flux de chaleur coïncide pour l'ensemble des mélanges avec substitution de SDBt et ils seront retarder et prolongé pour les BHP avec substitution de SDBr.
- L'incorporation des fines de brique dans un ciment à base de filler calcaire semble retarder l'hydratation. Les taux d'hydratation sont réduits au jeune âge et augmentent nettement à long terme par rapport aux BHP témoins. Par contre la substitution de SDBr semble améliorer le taux d'hydratation uniquement entre 7 et 28 jours, tandis qu'à long terme, le BHP de référence présente le taux d'hydratation le plus élevé.
- L'incorporation de sable de déchet de béton prolonge la réaction d'hydratation à une température élevée.
- La production de portlandite est augmentée à jeune âge pour les mélanges incorporant du sable de déchet de brique et sable de déchet de béton. A partir du 180 jours d'hydratation, Dans le cas des mélanges incorporant du SDBr, le taux de portlandite baisse nettement, par contre les mélange incorporant le SDBt on constate une augmentation de taux de portlandite, surtout pour le BHP2 qui produit le plus de portlandite par rapport aux autres mélanges.
- La morphologie des BHP à base de sable de déchet de béton SDBt et de sable déchet de brique SDBr est très différente. L'apparition de la calcite est prédominante dans les BHP à base de sable déchet de béton.

Bibliographies

- [1]. Institute FIR. Analysis report on development prospect and investment strategy planning of construction waste treatment industry in China from 2019 to 2024. 2019 (in Chinese).
- [2]. L. Li, H. Chen, J. Li, De'an Sun, (2021). An elastoplastic solution to undrained expansion of a cylindrical cavity in SANICLAY under plane stress condition[J], *Comput. Geotech.* 132 (2021) 103990, <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103990>
- [3]. C. Yang, J. Li, L. Li, De'an Sun, (2021). Expansion responses of a cylindrical cavity in overconsolidated unsaturated soils: A semi-analytical elastoplastic solution, *Comput. Geotech.* 130 (2021) 103922, <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103922>
- [4]. H.F. Yu, (2004). Study on High Performance Concrete in Salt Lake: Durability, Mechanism and Service Life Prediction. PhD thesis. Southeast University, Nanjing, China, 2004. (in Chinese).
- [5]. H. Ma, W. Gong, H. Yu, W. Sun, (2018). Durability of concrete subjected to dry-wet cycles in various types of salt lake brines, *Constr. Build. Mater.* 193 286–294.
- [6]. A. Bagheri, A. Ajam, H. Zanganeh, (2019). Investigation of chloride ingress into concrete under very early age exposure conditions, *Constr. Build. Mater.* 225 801–811.
- [7]. H.F.W. Taylor, C. Famy, K.L. Scrivener, (2001). Delayed Ettringite Formation, *Cem. Concr. Res.* 31 (5) 683–693.
- [8]. S. Sarkar, S. Mahadevan, J.C.L. Meeussen, H. van der Sloot, D.S. Kosson, (2010). Numerical simulation of cementitious materials degradation under external sulfate attack, *Cem. Concr. Comp.* 32 (3) 241–252.
- [9]. M. Basista, W. Weglewski, (2009). Chemically assisted damage of concrete: a Model of expansion under external sulfate attack, *Int. J. Damage. Mech.* 18 (2) 155–175.
- [10]. E. Samson, J. Marchand, K.A. Snyder, J.J. Beaudoin, (2005). Modeling ion and fluid transport in unsaturated cement systems in isothermal conditions, *Cem. Concr. Res.* 35 (1) 141–153.
- [11]. X.B. Zuo, W. Sun, C. Yu, (2012). Numerical investigation on expansive volume strain in concrete subjected to sulfate attack, *Constr. Build. Mater.* 36 (4) 404–410.

- [12]. R. Euml, L. Tixier, B. Mobasher, (2003). Modeling of damage in cement-based materials subjected to external sulfate attack. I: Formulation, *J. Mater. Civil. Eng.* 15 (4) 305–313.
- [13]. G. Zhao, J. Li, M. Shi, J. Cui, F. Xie, (2020). Degradation of cast-in-situ concrete subjected to sulphate-chloride combined attack, *Constr. Build. Mater.* 241, 117995, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117995>
- [14]. G.W. Zhao, M. Shi, H. Fan, J.F. Cui, F. Xie, (2020). The influence of multiple combined chemical attack on cast-in-situ concrete: Deformation, mechanical development and mechanisms, *Constr. Build. Mater.* 251, 118988.
- [15]. G. Zhao, J. Li, F. Han, M. Shi, H. Fan, (2019). Sulfate-induced degradation of cast-in-situ concrete influenced by magnesium, *Constr. Build. Mater.* 199, 194–206.
- [16]. G. Zhao, J. Li, W. Shao, (2018). Effect of mixed chlorides on the degradation and sulfate diffusion of cast-in-situ concrete due to sulfate attack, *Constr. Build. Mater.* 181 49–58.
- [17]. A. Abbas, G. Fathifazl, B. Fournier, O.B. Isgor, R. Zavadil, A.G. Razaqpur, S. Foo, (2009). Quantification of the residual mortar content in recycled concrete aggregates by image analysis, *Mater. Charact.* 60 (7), 716–728.
- [18]. J.S. Ryu, (2002). An experimental study on the effect of recycled aggregate on concrete properties, *Mag. Concr. Res.* 54 (1) 7–12.
- [19]. J.Z. Xiao, J.B. Li, C. Zhang, (2005). Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading, *Cem. Concr. Res.* 35, 1187–1194.
- [20]. M. Etxeberria, E. Vázquez, A. Marí, (2006). Microstructure analysis of hardened recycled aggregate concrete, *Mag. Concr. Res.* 58 (10) 683–690.
- [21]. K.P. Verian, W. Ashraf, Y. Cao, (2018). Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production, *Resour. Conserv. Recy.* 133, 30–49.
- [22]. Z.H. Duan, S.P. Chi, (2014). Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars, *Mater. Design.* 58 19–29.
- [23]. S.T. Lee, R.D. Hooton, H.-S. Jung, D.-H. Park, C.S. Choi, (2008). Effect of limestone filler on the deterioration of mortars and pastes exposed to sulfate solutions at ambient temperature, *Cem. Concr. Res.* 38 (1) 68–76.

- [24]. J. Zhang, D. White, P.C. Taylor, C. Shi, (2015). A case study of evaluating joint performance in relation with subsurface permeability in cold weather region, *Cold. Reg. Sci. Technol.* 110, 19–25.
- [25]. D. Matias, J.D. Brito, A. Rosa, D. Pedro, (2013). Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates–Influence of the use of superplasticizers, *Constr. Build. Mater.* 44 , 101–109.
- [26]. V.W.Y. Tam, C.M. Tam, Y. Wang, (2007). Optimization on proportion for recycled aggregate in concrete using two-stage mixing approach, *Constr. Build. Mater.* 21 ,1928–1939.
- [27]. S. Kou, B. Zhan, C. Poon, (2014). Use of a CO₂ curing step to improve the properties of concrete prepared with recycled aggregates, *Cem. Concr. Res.* 45, 22–28.
- [28]. S.C. Kou, C.S. Poon, (2012). Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate, *Constr. Build. Mater.* 35, 69–76.
- [29]. N. Kisku, H. Joshi, M. Ansari, S.K. Panda, S. Nayak, S.C. Dutta, (2017). A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material, *Constr. Build. Mater.* 131, 721–740.
- [30]. C.J. Zega, G.C. Dos Santos, Y.A. Villagrán-Zaccardi, A.A. Di Maio, (2016). Performance of recycled concretes exposed to sulphate soil for 10 years, *Constr. Build. Mater.* 102, 714–721.
- [31]. Q.H. Xiao, Z.Y. Cao, X. Guan, Q. Li, X.L. Liu, (2019). Damage to recycled concrete with different aggregate substitution rates from the coupled action of freeze-thaw cycles and sulfate attack, *Constr. Build. Mater.* 221, 74–83.
- [32]. B. Qi, J. Gao, F. Chen, D. Shen, (2017). Evaluation of the damage process of recycled aggregate concrete under sulfate attack and wetting-drying cycles, *Constr. Build. Mater.* 138, 254–262.
- [33]. J. Xie, J. Zhao, J. Wang, C. Wang, P. Huang, C. Fang, (2019). Sulfate Resistance of recycled aggregate concrete with GGBS and fly ash-based geopolymer, *Mater.* 12 (8) 1247, <https://doi.org/10.3390/ma12081247>
- [34]. Voglis N., Kakali G., Chaniotakis E., Tsvivilis S., (2005). “Portland-limestone cements. Their properties and hydration compared to those of other composite cements”, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 27, V° 2, pp. 191–196.
- [35]. Tennis P., Thomas M., Weiss W., (2011). “State-of-the-art report on use of limestone in Cements at levels of 15%”, *Portland Cement Association*, SN3148.

- [36]. Zhu W. and Gibbs J.C., (2005). “Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, N° 8, pp. 1457–1462.
- [37]. Bonavetti V., Donza H., Menéndez G., Cabrera O., Irassar E., (2003). “Limestone filler cement in low w/c concrete: a rational use of energy”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, N° 6, pp. 865–871.
- [38]. Guemmadi Z., Houari H., Resheidat M., Toumi B., (2008). “A better use of limestone filler in concrete”, in: *The International Conference on Construction and Building Technology (ICCBT 2008)*, Kuala Lumpur, Malaysia, June 16–20, 2008, pp. 307–318.
- [39]. Vuk T., Tinta V., Gabrovec R., Kaucic V., (2001). “The effects of limestone addition, clinker type and fineness on properties of Portland cement”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 31 N° 1, pp.135–139.
- [40]. Craeye B., De Schutter G., Desmet B., Vantomme J., Heirman G., Vandewalle L., Kadri E., (2010). “Effect of mineral filler type on autogenous shrinkage of self-compacting concrete”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, N° 6, pp. 908–913.
- [41]. Lin F. and Meyer C., (2009). “Hydration kinetics modeling of Portland cement considering the effects of curing temperature and applied pressure”, *Cement and Concrete Research*, Vol. N° 39, 4, pp. 255–265.
- [42]. Ramezaniyanpour A.M. and Hooton R. D., (2014). A study on hydration, compressive strength, and porosity of Portland limestone cement mixes containing SCMs, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 51, pp. 1-13.
- [43]. E. Gallucci, X. Zhang, K.L. Scrivener, (2013). Effect of temperature on the microstructure of calcium silicate hydrate (C-S-H), *Cem. Concr. Res.* 53, 185–195.
- [44]. Michael Henry, Katsufumi Hashimoto, Ivan Sandi Darma, Takafumi Sugiyama, (2016). Cracking and Chemical Composition of Cement Paste Subjected to Heating and Water Re-Curing, *Journal of Advanced Concrete Technology* 14 (4) 134–143.
- [45]. B. Lothenbach, P. Durdzinski, K. De Weerd, (2016). Thermogravimetric analysis, in: *A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials*, CRC Press, Oxford, UK, pp. 177–212.
- [46]. Lucia Alarcon-Ruiz, Gerard Platret, Etienne Massieu, Alain Ehrlacher, (2005). The use of thermal analysis in assessing the effect of temperature on a cement paste, *Cem. Concr. Res.* 35 (3) 609–613.

- [47]. Taehwan Kim, Jan Olek, (2012). Effects of Sample Preparation and Interpretation of Thermogravimetric Curves on Calcium Hydroxide in Hydrated Pastes and Mortars, *Transp. Res. Rec.* 2290 (1) 10–18.
- [48]. Aqel M. and Panesar D.K., (2016). "Hydration kinetics and compressive strength of steam-cured cement pastes and mortars containing limestone filler", *Construction and Building Materials*, Vol. 113, pp 359–368.
- [49]. Desmyter J., Van Dessel J., Blockmans S., (1999). "The use of recycled concrete and masonry aggregates in concrete: Improving the quality and purity of aggregates. In: Proceedings of the international conferenc, Dundee University, pp. 139–49.
- [50]. Fernandez Lopez R.,(2009). "Calcined clayey soils as a potential replacement for cement in developing countries", (Ph.D Thesis), Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Suisse, p. 53.
- [51]. Tironi A., Trezza M.A., Scian A.N., Irassar E.F., (2013). "Assessment of pozzolanic activity of different calcined clays, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 37, pp. 319–327.
- [52]. Farah Kaddah, Harifidy Ranaivomanana, Ouali Amiri, Emmanuel Rozière, (2022). " Accelerated carbonation of recycled concrete aggregates: Investigation on the microstructure and transport properties at cement paste and mortar scales", *Journal of CO2 Utilization* 57 (2022) 101885, <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.101885>

Conclusions générales et perspectives

L'objectif assigné à cette recherche est d'étudier les possibilités d'obtention de bétons à hautes performances recyclés par la substitution du sable alluvionnaire par des sables issus de déchet de brique et de béton concassé. D'après la revue de littérature des dernières décennies, les sables recyclés ont des influences marquées sur les propriétés physico-mécaniques du BHP, tant à l'état frais qu'à l'état durci du béton.

L'accent a été mis ensuite, sur la caractérisation des matériaux de base employés et les techniques expérimentales utilisés. Tous les matériaux utilisés au cours de cette étude ont été identifiés et les principales techniques expérimentales utilisées ont été présentés.

Les travaux réalisés ont également conduit à optimiser la formulation des BHP à base de matériaux locaux de la région de Bejaia (Algérie) en utilisant une nouvelle méthode appelée "plans d'expériences". Les résultats des essais de formulation et de modélisation du composite étudié montrent en général, que la théorie des plans d'expériences permet une modélisation empirique d'effets des paramètres étudiés (sable de déchet de brique, sable de déchet de béton, et de sable alluvionnaire), et d'évaluer la qualité de la modélisation. Les modèles mathématiques issus de l'application de cette approche statistique ont facilité la visualisation de l'effet de chacun des facteurs étudiés sur les propriétés des BHP.

A la lumière des essais réalisés. Les résultats de cette recherche expérimentale font ressortir les points suivants :

- La formulation et la fabrication des BHP recyclés dont la résistance en compression à 28 jours dépasse les 50 MPa est aujourd'hui possible en utilisant les granulats recyclés issue de déchet de brique et de béton.
- L'approche de plans du mélange utilisée dans ce travail expérimental s'est révélée être une technique efficace pour étudier les effets des trois types de sable (SA, SDBr et

SDBt), dans les systèmes binaires et ternaires sur les propriétés physico-mécaniques des bétons.

- L'intérêt de modéliser la réponse étudiée par un polynôme, est que celui-ci est alors capable de calculer toutes les réponses du domaine d'étude sans être obligé de faire toutes les expériences.
- Les mesures obtenues lors des essais effectués nous ont permis de déterminer des modèles prédictifs d'ouvrabilité, de résistance à la compression et à la flexion à 7 et 28 jours.
- On constate que la présence du SDBr diminue la maniabilité des bétons à l'état frais notamment pour les proportions qui dépassent 50% (soit 37,5% de la masse totale du sable) par rapport au béton de référence (BHP15). Par contre, les sables recyclés (SDBt) ont un effet moins négatif sur l'affaissement, et donne des résultats meilleurs surtout pour les pourcentages de 50% et 75%.
- Les bétons recyclés ont une capacité d'absorption d'eau importante, elle augmente en fonction du pourcentage de substitution en granulats recyclés, notamment pour le SDBr et les couples SDBr et SDBt en même temps. Cela est dû principalement aux taux élevés des pores capillaires dans les granulats de brique recyclés. L'introduction de SDBr et SDBt dans le mélange de béton (par substitution) conduit à influencer sur la résistance mécanique. La résistance à la compression est comparable à celle du béton témoin pour des faibles pourcentages de substitution en granulats recyclés, puis diminue pour des pourcentages plus élevés en cas du SDBr.
- On peut observer aussi qu'au bout de 28 jours, les résistances à la flexion les plus élevées sont celles des bétons BHP7 et BHP9, avec un effet optimal pour le béton BHP9 (respectivement environ 75% de SA, 25% de SDBr et 0% de SDBt).
- Enfin, il convient de noter que non seulement les propriétés physico-mécaniques des bétons sont encourageantes, mais les considérations économiques, environnementales et techniques sont également très intéressantes pour la valorisation des déchets de construction notamment pour la brique et le béton.
- Du point de vue analyse de durabilité, les fines de brique provoquent la réduction de la chaleur d'hydratation et des retards dans l'apparition des pics de flux de chaleur.
- L'incorporation de sable de déchet de béton prolonge la réaction d'hydratation à une température élevée.

- La production de portlandite est augmentée à jeune âge pour les mélanges incorporant du sable de déchet de brique et sable de déchet de béton. A partir du 180 jours d'hydratation, Dans le cas des mélanges incorporant du SDBr, le taux de portlandite baisse nettement, par contre les mélanges incorporant le SDBt on constate une augmentation de taux de portlandite.
- La morphologie des BHP à base de sable de déchet de béton SDBt et de sable déchet de brique SDBr est très différente. L'apparition de la calcite est prédominante dans les BHP à base de sable déchet de béton.

Les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse offrent différentes perspectives que l'on peut regrouper comme suit :

- L'étude expérimentale du comportement physico-mécanique des BHP recyclés doit être approfondie pour expliquer et justifier les performances en relative avec la durabilité ainsi que la composition optimale sous l'effet des attaques par les agents agressifs chimiques.
- Les images microscopiques MEB obtenues sur les échantillons pré-fissurés amènent à des essais sur échantillons macrofissurés pour identifier la perméabilité de la fracture de chaque composition du BHP recyclé.
- Dans l'étude de l'analyse thermique différentielle et gravimétrie ATD/ATG, on a mis en évidence les réactions physico-chimiques qui se produisent au sein du béton porté à des températures élevées et de suivre leurs progressions. Une étude de ces mêmes essais sous haute température serait intéressante. Elle apporterait des compléments d'informations sur l'influence des effets de la température sur le comportement physico-mécanique et permettrait également d'étudier le couplage thermo-mécanique des BHP. Par ailleurs, l'effet taux de substitution des granulats recyclés sur la résistance mécanique à haute températures vont être étudié également. Ces aspects feront l'objet de mes futurs travaux de recherches.

FICHE TECHNIQUE DU SUPERPLASTIFIANT

NOTICE TECHNIQUE

2 1 1 9

MEDAFLOW 30Conforme à la norme EN 934-2: TAB 1, TAB 3.1
ET TAB 3.2 NA 774.**Super plastifiant
Haut réducteur d'eau****DESCRIPTION**

Le MEDAFLOW 30 est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de polycarboxylates d'Ether qui améliorent considérablement les propriétés des bétons.

Le MEDAFLOW 30 permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet sans modifier la consistance, de réduire fortement la teneur en eau du béton.

Le MEDAFLOW 30 ne présente pas d'effet de retard de prise.

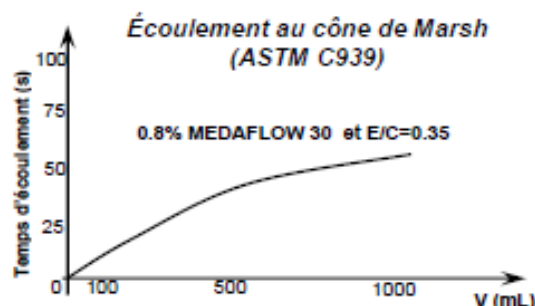
DOMAINES D'APPLICATION

- Les bétons de préfabrication.
- Les bétons prêts à l'emploi.
- Les bétons lourds et légers.
- Les bétons d'ouvrages d'art.
- Les bétons de dallages industriels.
- Les bétons de bâtiment.
- Les bétons précontraints.
- Les bétons pompés.
- Les bétons pour fondations profondes.
- Les bétons pour ouvrages fortement ferrailés.
- Les bétons soumis à des milieux agressifs.
- Les BHP, BTHP et BUHP.
- Les bétons autonivelants - bétons autoplaçants.
- Les bétons architectoniques.

PROPRIÉTÉS

Grâce à ses propriétés le MEDAFLOW 30 permet :
Sur béton frais :

- Obtention d'un rapport E/C très faible
- Amélioration considérable de la fluidité
- Une très bonne maniabilité
- Éviter la ségrégation
- Faciliter la mise en œuvre du béton



Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme (voir tableau).
- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait et le risque de fissuration

Désignation	Rc (MPa)		
	3J	7J	28J
MEDAFLOW 30 (1.4%)	39.2	54.7	62.2

CARACTÉRISTIQUES

- Aspect Liquide
- Couleur Brun clair
- pH 6 – 6,5
- Densité 1,07 ± 0,01
- Teneur en chlore < 0,1 g/l
- Extrait sec 30%

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.

82



Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

Tél : (213) 021 51 66 81 & 82

Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

www.granitex.dz - E-mail: granitex@granitex.dz



MEDAFLOW 30

MODE D'EMPLOI

Le MEDAFLOW 30 ne doit pas être ajouté directement dans l'eau de gâchage, mais après un temps préalable de malaxage et après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait été ajoutée.

Le MEDAFLOW 30 peut être aussi ajouté directement dans le camion malaxeur (toupie), et après introduction de la dose convenable, le malaxeur devra tourner à grande vitesse pendant 2 à 3 minutes après l'introduction du superplastifiant ;

Il est conseillé d'ajouter le MEDAFLOW 30 à un béton qui ne soit pas trop ferme

NB : La couleur des produits à base de Polycarboxylates d'Ether (PCE) lors d'une exposition aux UV, est sujette à changer de ton, mais qui n'a aucune incidence sur les propriétés et les effets de l'adjuvant.

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :

0,5 à 2,0 % du poids de ciment soit 0,46 à 1,85 litre pour 100 Kg de ciment.

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le MEDAFLOW 30 est conditionné en bidons de 10Kg, fûts de 210 Kg et 240 Kg, cubitenaire 1100kg.

Délai de conservation :

Une année dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur ($5^{\circ}\text{C} < t < 35^{\circ}\text{C}$).

Lors d'une exposition du produit au soleil, sa couleur est sujette à changer de ton.

PRÉCAUTIONS D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse.

Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : www.granitex-dz.com

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

Tél : (213) 021 51 66 81 & 82

Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

www.granitex.dz - E-mail: granitex@granitex.dz



Notice Produit
Edition Juin 2011
Numéro 283
Version 2011-192
CONDENSIL S95 DP

FICHE TECHNIQUE DU LA FUME DE SILICE

CONDENSIL S95 DP

Fumée de silice densifiée pneumatiquement pour bétons hautes performances et haute durabilité

Conforme à la norme NF P 18-502 et pr NF EN 13263-1



Construction

Présentation	La fumée de silice CONDENSIL S95 DP est une silice ultra fine issue de l'industrie de la fabrication du silicium ou des alliages à base de silicium.
Domaines d'application	La fumée de silice CONDENSIL S95 DP permet de fabriquer des : <ul style="list-style-type: none"> ■ BHP et BTHP ■ Bétons résistants aux milieux agressifs : <ul style="list-style-type: none"> - domaines agricoles : ensilage, stockage d'engrais, aires de stabulation, ... - milieu industriel : industriels chimiques et agro-alimentaires, sucreries, conserveries, laiteries, bacs de retentions, ... - stations services : béton en contact d'huiles et de carburants - aires de lavage - milieu marin : digue, aménagement portuaire, ... - zone de montagne : présence d'eau pure ou de sels de déverglaçage - stations d'épuration, égouts, caniveaux, ... ■ Bétons pompables ■ Bétons projetés
Caractères généraux	La fumée de silice CONDENSIL S95 DP confère aux bétons les propriétés suivantes : <ul style="list-style-type: none"> ■ améliore les performances mécaniques à longs termes : résistances en compression, flexion et traction, ■ augmente le module d'élasticité, ■ réduit le fluage, ■ améliore la résistance à l'abrasion et à l'érosion, ■ améliore la durabilité en milieux agressifs, ■ diminue les risques d'expansion dus aux phénomènes d'alcali-réaction, ■ diminue la perméabilité aux gaz et aux liquides, ■ facilite le pompage de tous les bétons mêmes peu dosés en ciment, ■ réduit les risques de ségrégations.
Caractéristiques	
Coloris	Gris
Conditionnement	Vrac Big-Bags de 1 tonne
Stockage	Dans un local à l'abri de l'humidité.
Conservation	Dans son emballage d'origine intact, le produit se conserve 3 ans.



Données techniques

Densité apparente	0,65 ± 0,10
Densité réelle (hélium)	2,24
Teneur en SiO ₂	95% (≥ 92%)
Teneur en Na ₂ Oéq.	0,60% (≤ 1,0%)
Teneur en SiC	1,50% (≤ 3,0%)
Teneur en C libre	1,50% (≤ 3,0%)
Teneur en S total	0,10% (≤ 0,20%)
Surface spécifique BET (m ² /g)	23 (20 à 26)
Teneur en Oxydes (Fe, Al, Mg, Ca)	1,00% (≤ 1,50%)
Teneur en Cl ⁻	0,06% (≤ 0,20%)

Conditions d'applications

Consommation / Dosage Le dosage habituel est de 5 à 10 % du poids du ciment (pour tout autre dosage nous consulter).

Mise en œuvre

La fumée de silice CONDENSIL S95 DP doit être introduite avec le ciment. Afin de tirer toutes les performances de la fumée de silice CONDENSIL S95 DP, il est indispensable de défloculer complètement les micro-particules de silice. Pour cela, la fumée de silice CONDENSIL S95 DP doit être systématiquement associée avec un superplastifiant/haut réducteur d'eau de type SIKA VISCOCRETE.

Précautions d'emploi

La fumée de silice CONDENSIL S95 DP étant un produit pulvérulent, l'emploi d'un masque est préconisé lors de son utilisation. Consulter la fiche de données de sécurité accessible sur Internet www.sika.fr

Mentions légales

Produit réservé à un usage strictement professionnel
Nos produits bénéficient d'une assurance de responsabilité civile.
«Les informations sur la présente notice, et en particulier les recommandations relatives à l'application et à l'utilisation finale des produits SIKA, sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que la Société SIKA a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou toute recommandation écrite ou conseil donné n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés. Nos agences sont à votre disposition pour toute précision complémentaire. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos Conditions de Vente et de Livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la Notice correspondant au produit concerné, qui leur sera remise sur demande. »



Sika France S.A.
84, rue Edouard Vaillant – BP 104
93351 Le Bourget Cedex
France
Tel. : 01 49 92 80 00
Fax : 01 49 92 80 21
www.sika.fr

FICHE TECHNIQUE DU CIMENT



المجمع الصناعي لإسمنت الجزائر

GROUPE INDUSTRIEL DES CIMENTS D'ALGERIE

CENTRE D'ETUDES ET DE SERVICES TECHNOLOGIQUES

DE L'INDUSTRIE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION

« C.E.T.I.M »

S.P.A. au capital social de : 124 000 000 D.A.
 N° Identification Fiscale: 929635072258457 - N° Actes d'imposition: 35819640172 - N° Registre de Commerce: 722364B35

FICHE DE CONFORMITE

CEM I 52.5 N

Cimenterie: Ain El Kebira

CONFORME À LA NORME NA 442 : 2013.

CARACTERISTIQUES PHYSICO-CIMIQUES DU CIMENT

Caractéristiques	Normes	Moyenne	Exigences
Perte au feu (%)	NA 5042	1,34	≤ 05
Résidu insoluble (%)		2,24	≤ 05
Teneur en oxyde de magnésium (MgO), (%)		1,39	-
Teneur en anhydrite sulfurique (SO ₃), (%)		1,65	≤ 04
Chlorures, (%)		< 0,01	≤ 0.10
Finesse Blaine, (cm ² /g)	NA 231	3151	-
Temps de prise, (mn.)	NA 230	255	≥ 50
Expansion (Le CHATELIER), (mm)	NA232	1,00	≤ 10
Taux et qualité d'ajout		0 %	

RESISTANCE A LA COMPRESSION SUR MORTIER

Echéance	Norme	Moyenne (N/mm ²)	Exigences
02 jours	NA 234	23,63	≥ 18
07 jours		50,90	-
28 jours		69,83	≥ 50

COMPOSITION MINERALOGIQUE DU CLINKER

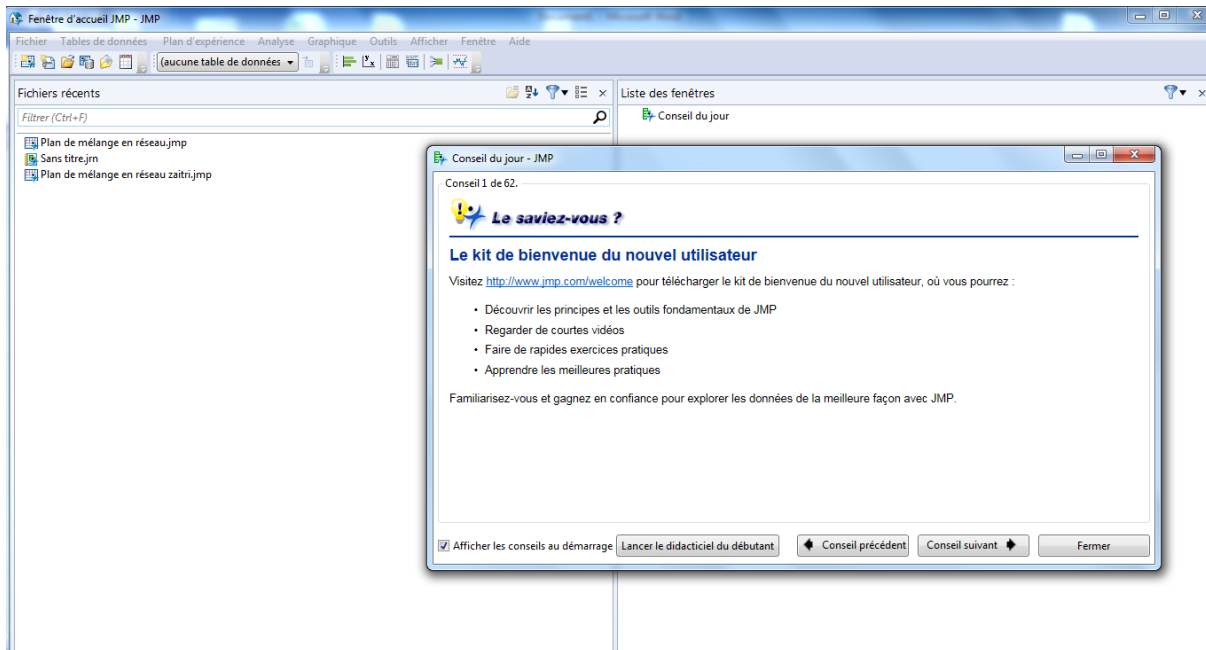
C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaO libre
64,94	12,53	2,69	16,16	0,40

OPTIMISATION D'UN PLAN DE MÉLANGE AVEC JMP7

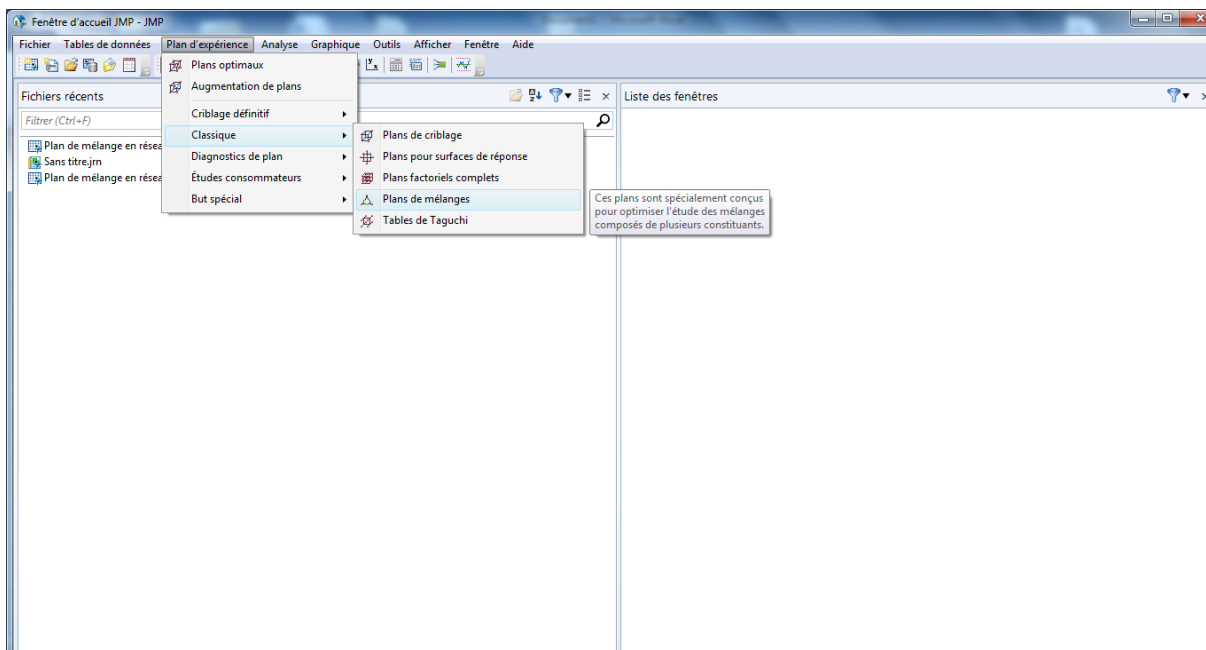
A. Génération d'un plan de mélange



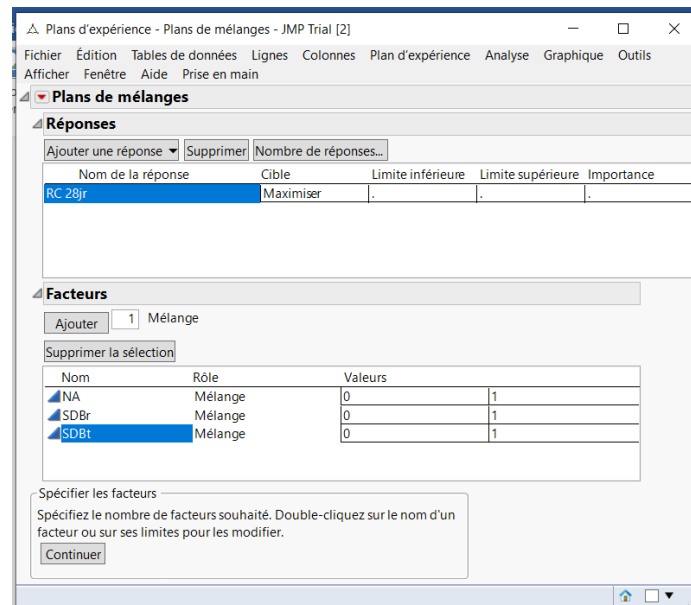
Page d'accueil du logiciel JMP7



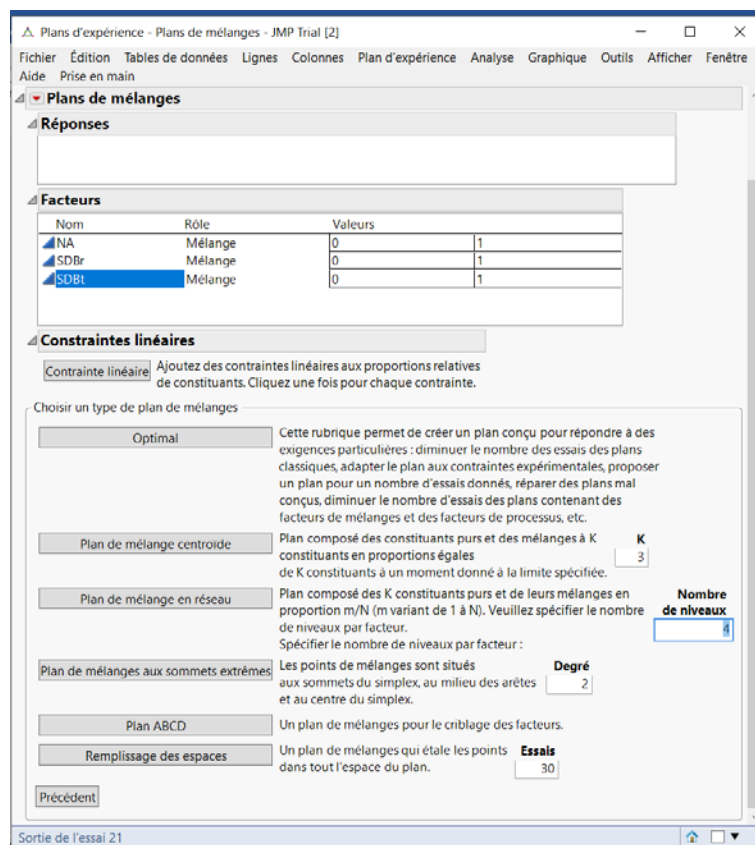
1. On choisit : Plan de mélange → classique → plans de mélange



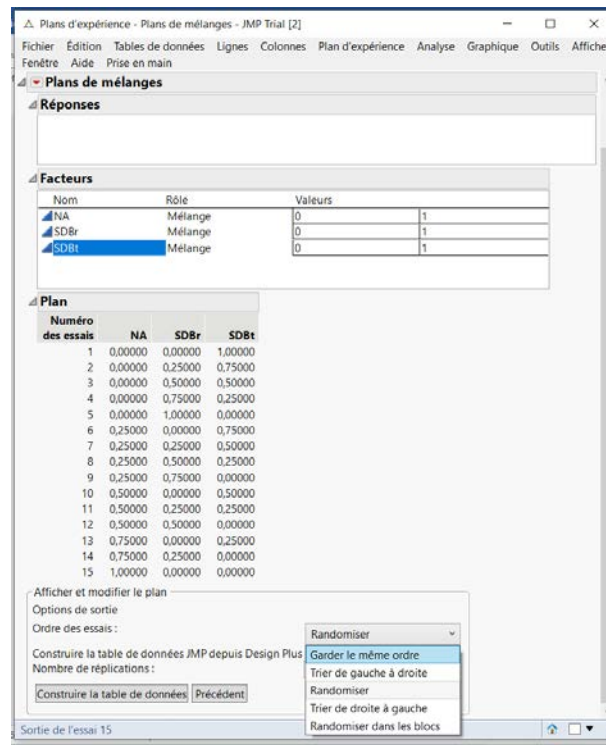
2. On fixe les facteurs du mélange et les réponses



3. Sélectionnant un **Plan de mélange en réseau** avec un **nombre de niveau** égale à 4 dans notre étude



4. Sélectionner l'ordre des essais. « **Randomiser** » est le choix par défaut. Ici, choisissez « **Garder le même ordre** ». Ensuite on sélectionne → **Construire la table de données**.



Le plan de mélange construit est de la forme suivante :

Plan de mélange en réseau - JMP Trial [2]

Fichier Édition Tables de données Lignes Colonnes Plan d'expérience Analyse Graphique Outils Afficher Fenêtre Aide

Prise en main

	NA	SDBr	SDBt	RC 28jr
1	0	0	1	•
2	0	0,25	0,75	•
3	0	0,5	0,5	•
4	0	0,75	0,25	•
5	0	1	0	•
6	0,25	0	0,75	•
7	0,25	0,25	0,5	•
8	0,25	0,5	0,25	•
9	0,25	0,75	0	•
10	0,5	0	0,5	•
11	0,5	0,25	0,25	•
12	0,5	0,5	0	•
13	0,75	0	0,25	•
14	0,75	0,25	0	•
15	1	0	0	•

Plan de mélange en réseau

- Plan de mélange en réseau
- Modèle
- Évaluer le plan
- Boîte de dialogue de plan

Colonnes (4/0)

- NA *
- SDBr *
- SDBt *
- RC 28jr *

Lignes

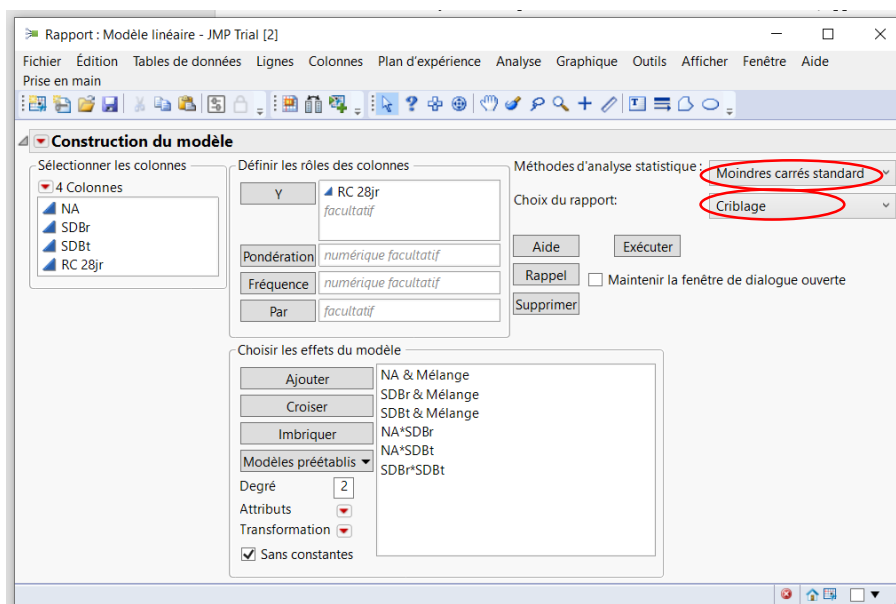
- Toutes les lignes
- Sélectionnée(s)
- Exclue(s)
- Masquée(s)
- Étiquetée(s)

Remplir les valeurs de Rc 28jr (résultant de l'écrasement des éprouvettes dans les essais au laboratoire)

	NA	SDBr	SDBt	RC 28jr
1	0	0	1	82,54
2	0	0,25	0,75	82,8
3	0	0,5	0,5	81,72
4	0	0,75	0,25	81,83
5	0	1	0	77,15
6	0,25	0	0,75	76,45
7	0,25	0,25	0,5	78,14
8	0,25	0,5	0,25	77,1
9	0,25	0,75	0	75,25
10	0,5	0	0,5	72,1
11	0,5	0,25	0,25	74
12	0,5	0,5	0	74,26
13	0,75	0	0,25	71,84
14	0,75	0,25	0	76,3
15	1	0	0	80,24

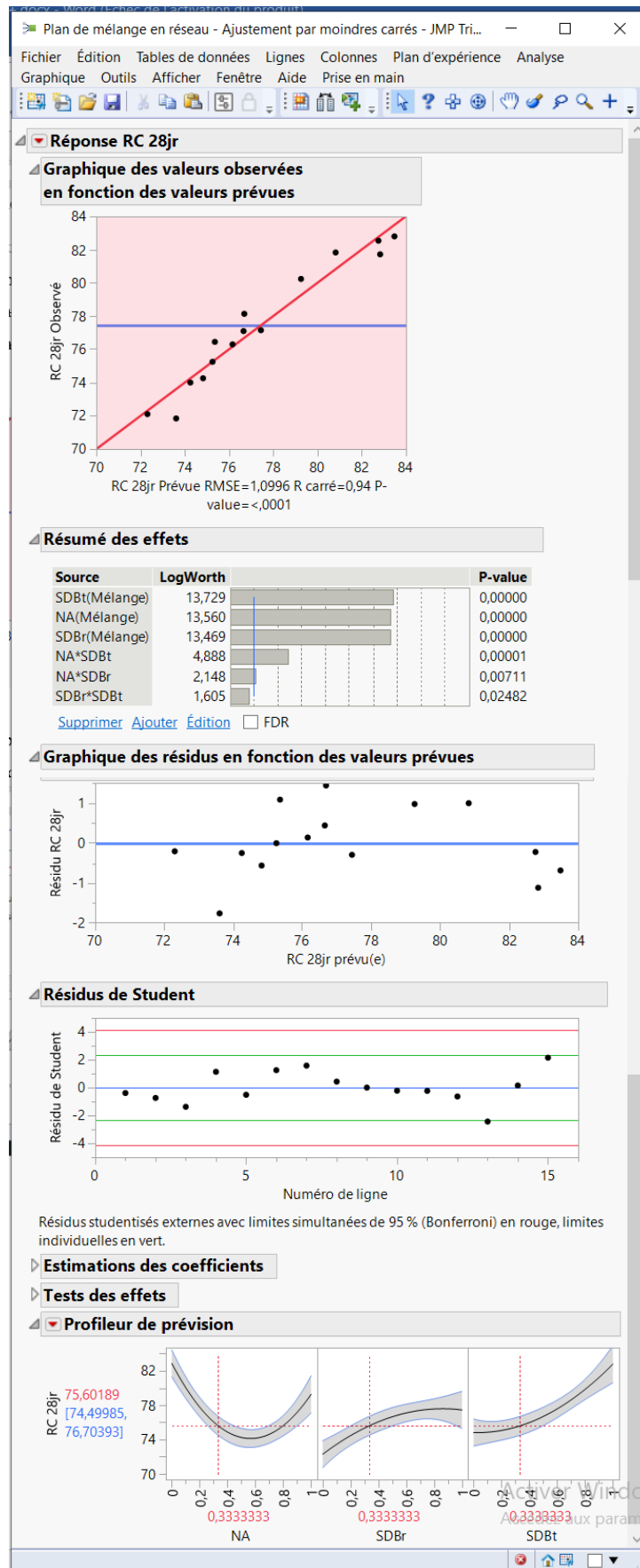
Le « **Modèle** » a été enregistré dans le panneau supérieur gauche du tableau de données. Ce script contient le modèle du plan qui a été créé pour l'estimation.

Méthodes d'analyse statistique → **Moindres carrés standard** (rapport **Criblage**)



Par enchaînement on clique sur → **Exécuter**

Les résultats obtenus présentent comme suit :



Un aperçu de l'estimation des coefficients ainsi de la formule de prévision :

The screenshot shows the 'Réponse RC 28jr' window in JMP. It displays the following data:

Terme	Estimation	Erreur standard	t ratio	Prob. > t
NA(Mélange)	79,258	0,956768	82,84	<,0001*
SDBr(Mélange)	77,443714	0,956768	80,94	<,0001*
SDBt(Mélange)	82,763	0,956768	86,50	<,0001*
NA*SDBr	-14,10857	4,071967	-3,46	0,0071*
NA*SDBt	-34,82	4,071967	-8,55	<,0001*
SDBr*SDBt	10,951429	4,071967	2,69	0,0248*

Source	Nombre de coefficients	Degrés de liberté	Somme des carrés	Rapport F	Prob. > F
NA(Mélange)	1	1	8296,7573	6862,353	<,0001*
SDBr(Mélange)	1	1	7921,2646	6551,779	<,0001*
SDBt(Mélange)	1	1	9046,7923	7482,717	<,0001*
NA*SDBr	1	1	14,5142	12,0049	0,0071*
NA*SDBt	1	1	88,4065	73,1222	<,0001*
SDBr*SDBt	1	1	8,7452	7,2332	0,0248*

Expression de la prévision

$$79,258 \cdot NA$$

$$+ 77,443714286 \cdot SDBr$$

$$+ 82,763 \cdot SDBt$$

$$+ NA \cdot (SDBr \cdot -14,10857143)$$

$$+ NA \cdot (SDBt \cdot -34,82)$$

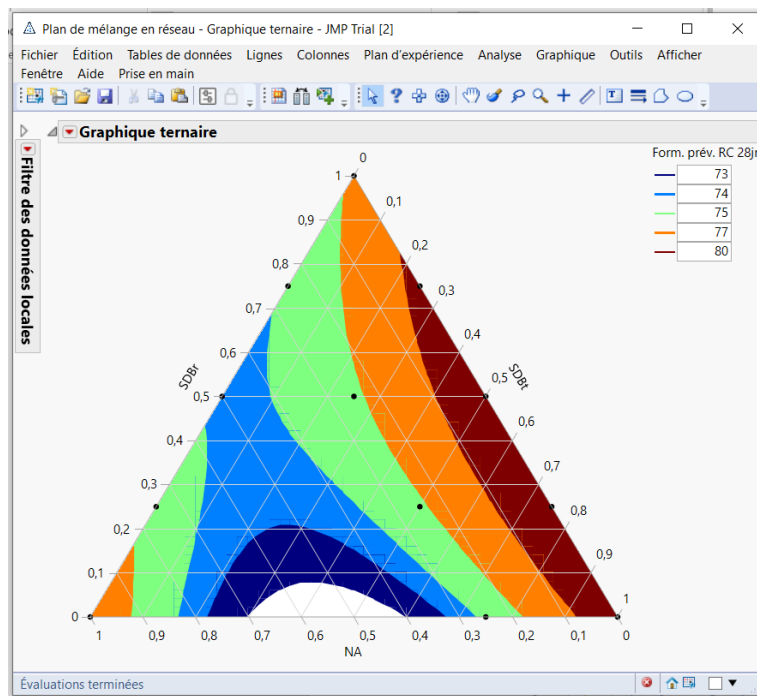
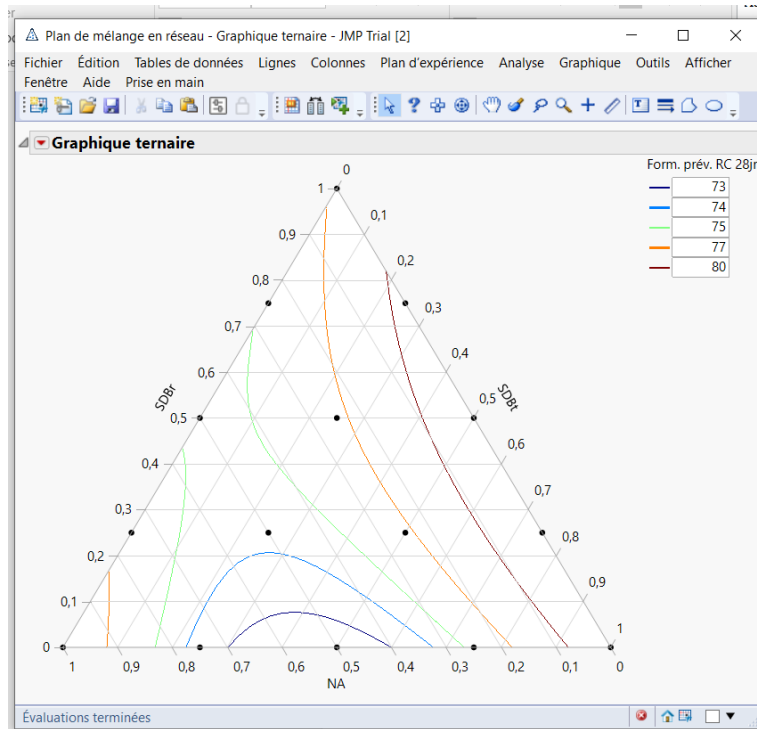
$$+ SDBr \cdot (SDBt \cdot 10,951428571)$$

B. Dessin des surfaces de réponses

Les graphiques ternaires sont développés comme suit :

The screenshot shows the 'Graphique' menu in JMP. The 'Graphique ternaire' option is selected. The background shows a data table with columns NA, SDBr, SDBt, and RC 28jr.

	NA	SDBr	SDBt	RC 28jr
1	0	0	1	82,54
2	0	0,25	0,75	82,8
3	0	0,5	0,5	81,72
4	0	0,75	0,25	81,83
5	0	1	0	77,15
6	0,25	0	0,75	76,45
7	0,25	0,25	0,5	78,14
8	0,25	0,5	0,25	77,1
9	0,25	0,75	0	75,25
10	0,5	0	0,5	72,1
11	0,5	0,25	0,25	74
12	0,5	0,5	0	74,26
13	0,75	0	0,25	71,84
14	0,75	0,25	0	76,3
15	1	0	0	80,24



Le profleur de mélange pour superposer deux ou plusieurs les réponses est illustré comme suit, par exemple RC 28jr et Aff :

