



**HAL**  
open science

# Les caractéristiques mécaniques et la microstructure du béton des granulats recyclés a hautes performances

Boning Yu

► **To cite this version:**

Boning Yu. Les caractéristiques mécaniques et la microstructure du béton des granulats recyclés a hautes performances. Génie civil. 2012. hal-02070631

**HAL Id: hal-02070631**

**<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-02070631>**

Submitted on 18 Mar 2019

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

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



## AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : [ddoc-memoires-contact@univ-lorraine.fr](mailto:ddoc-memoires-contact@univ-lorraine.fr)

## LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

[http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg\\_droi.php](http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php)

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

YU Boning

**Génie Civil, Construction, Matériaux, Bois**

UHP, Sciences, Technologie, Santé -Université de Lorraine  
Promotion 2010-2012

11-09-2012

**Rapport de Stage de Fin d'Etudes**

---

**LES CARACTERISTIQUES MECANIKES ET  
LA MICROSTRUCTURE DU BETON DES  
GRANULATS RECYCLES A HAUTES  
PERFORMANCES**



**中国建筑设计研究院**  
CHINA ARCHITECTURE DESIGN & RESEARCH GROUP

**Tuteur Pédagogique :**

Monsieur Lecomte ANDRE

**Maître de Stage :**

Monsieur ZHANG Huaiyong

# REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout d'abord la direction de l'entreprise ZHANG HUAIYONG qui a réalisé ce stage, au cours duquel j'ai pu être confronté aux réalités d'ingénieur. Je remercie également monsieur HUO WENYING le PDG de l'entreprise que madame WANG JING le responsable de l'entreprise qui m'a encadré dans mon stage.

Mes remerciements s'adressent aussi à mon professeur, monsieur ANDRE LECOMTE pour son aide inestimable, sa gentillesse et ses conseils qui m'avaient apporté pendant les années passants.

Mes remerciements s'adressent aussi à tous les personnels de l'équipe du département génie civil de l'université Henri Poincaré Nancy, France.

# RESUME

Le béton constitue un matériau de première importance des différents travaux et infrastructures, parmi les matières premières composant le béton, les granulats prend la première place. Avec l'augmentation de la quantité du béton, la consommation des granulats naturels s'augmente. Le béton abandonné, en tant qu'un matériau réutilisable, est destiné aux travaux de génie civil après une série de traitement. Considérant en fonction du développement durable, la confection du béton à hautes performances avec granulats recyclés du béton abandonné et cendres volantes, laitiers fins devient une bonne solution au problème de développement harmonieux entre les ressources et l'environnement.

Mon projet de stage est « Wuhan CBD », dont la conception et la planification ont débuté en 2006, un quartier commercial d'une superficie de 7,31km<sup>2</sup> sera établi en 2020. Dans ce projet, le béton abandonné provenant du site original est réutilisé, le béton mentionné dans le présent texte provient également du béton abandonné de la piste de l'aéroport Wang Jia Dun de Wuhan.

Le sujet de stage :

- 1, Test de caractéristiques mécaniques du béton à hautes performances.
- 2, Observation de la microstructure du béton de recyclage.

Mot-clé : Béton de granulats recyclés à hautes performances; Granulats recyclés; Propriétés mécaniques; ITZ; SEM

# ABSTRACT

As various kinds of building which were constructed in the early days of our country's foundation in China are close to the service life, the concrete industry in China faces two major challenges: the first one is the resource crisis, the pouring of concrete need to use a large number of natural aggregate; the second one is the environmental crisis, the construction waste which is produced by abandoned concrete and scrapped structural concrete may not only takes up the valuable land but also causes environmental pollution. Currently the research and utilization of recycled concrete is very little in my country.

In the view point of sustainable development, the recycled aggregate concrete which is made from recycled concrete aggregates of waste concrete, fly ash, granulated blast-furnace slag and so on can greatly resolve the problem of coordinated development between resource and environment. Therefore, this article is mainly based on experiment and research, and had studied the basic properties and micro structure of the high performance recycled aggregate concrete. The main content is as follows:

- 1, Study and know about the concept of double interface, use the electrical scanner to observe the morphology and the interfacial transition zone of the high-performance recycled aggregate concrete.

- 2, A serious experiments and researches about basic mechanical properties of the high-performance recycled aggregate concrete were carried out , the experiment result indicated that the cube compressive strength ,axial compressive strength ,tensile splitting strength of high-performance recycled aggregate concrete are little lower than those of high-performance natural aggregate concrete on the same strength.

Key Word: recycled high performance concrete; recycled aggregates; mechanical behaviors; the Interfacial Transition Zone; SEM

# SOMMAIRE

REMERCIEMENTS.....	
RESUME .....	
ABSTRACT .....	
I Étude sur les caractéristiques mécaniques fondamentales du béton de granulats recyclés à hautes performances .....	1
1 Introduction .....	1
II Mesure de résistance du béton original .....	2
2.1 Importance de définition de la résistance du béton original .....	2
2.2 Mesure de résistance du béton original .....	3
2.2.1 Méthode par ultrasons .....	4
2.2.2 Mesure de résistance par carottage.....	5
2.3 Étude de dosage et performances de service du béton de granulats recyclés à hautes performances .....	7
2.3.1 Matières premières .....	8
2.3.2 Étude de dosage .....	9
2.3.3 Performances de mélanges de béton et préparation	

d'éprouvette.....	10
2.4 Résistance du béton de granulats recyclés à hautes performances .....	11
2.4.1 Résistance à la compression du cube.....	11
2.4.2 Résistance à la compression axiale .....	14
2.4.3 Résistance à la traction par fendage .....	17
2.5 Conclusion .....	19
III. Etudes sur la microstructure du béton de granulats recyclés à hautes performances .....	20
3.1 Introduction.....	20
3.1.1 Structure d'interface.....	20
3.1.2 Mécanisme et caractéristiques de la formation de la zone de transition des interfaces.....	21
3.2 Analyse des défauts de l'interface du béton de granulats recyclés à hautes performances à l'aide du microscope polarisant .....	22
3.2.1 Appareils d'essais et fabrication d'échantillon .....	22
3.2.2 Essai de défaut de l'interface du béton de granulats recyclés .....	22
3.2.3 Comparaison avec le béton de granulats naturels.....	24
3.2.4 Conclusion .....	26



3.3 Aspect de la microstructure du béton de granulats recyclés à hautes performances dans la microscopie électronique à balayage	26
3.3.1 Appareils d'essais .....	26
3.3.2 Fabrication d'échantillon .....	27
3.3.3 Microstructure de l'interface des granulats et ciment sec .....	32
3.3.4 Conclusion .....	35
Références bibliographiques.....	37

# I Étude sur les caractéristiques mécaniques fondamentales du béton de granulats recyclés à hautes performances

## 1 Introduction

Le béton est la matière principale de la structure du béton armé, la sécurité de la structure et des éléments dépend essentiellement des caractéristiques mécaniques de béton, tandis que la résistance et la déformation constituent les deux caractéristiques mécaniques essentielles du béton. Au fur et à mesure de l'augmentation de l'âge du béton, l'hydratation du ciment devient de plus en plus forte, la résistance du béton est ainsi accrue continuellement. Généralement, on prend l'âge du béton de 28 jours comme le critère définissant la résistance du béton et d'autres caractéristiques. La résistance du béton est catégorisée en celles à la compression, à la traction, à la flexion ainsi qu'au cisaillement, entre autres, la résistance à la compression du béton est la plus forte, essentiellement, le béton est affecté au support de la compression, et suivant la valeur standard de résistance à la compression du cube est définie la classe de résistance du béton, d'autres résistances du béton sont aussi en corrélation avec celle à la compression du cube, par conséquent, la résistance à la compression du cube de béton devient l'indice de performance le plus important, et souvent, elle sert d'un paramètre principal de la conception de structure et est considérée comme un indice pour évaluer la qualité du béton. Dans le cadre de la conception de la structure du béton, la résistance à la compression axiale est utilisée souvent, celle-ci est obtenue en utilisant les éprouvettes prismatiques. Les éprouvettes prismatiques reflètent mieux la condition de compression réelle du béton parmi les éléments de compression, actuellement,

en Chine, on prend le solide prismatique de 150mm X 150mm X 300mm comme éprouvette type de la résistance à la compression axiale. De ce fait, pour appliquer le béton de granulats recyclés dans la structure du béton armé, il est vraiment important d'effectuer des essais de divers indices de résistance et de module d'élasticité, en outre, le béton de granulats recyclés doit posséder certainement une résistance suffisante et une bonne déformation.

## **2 Mesure de résistance du béton original**

### **2.1 Importance de définition de la résistance du béton original**

Dans le béton, les granulats occupent 70-80% de volume du béton, et les gros granulats occupent 60% à 70% du volume des granulats. En conséquence, la résistance et la nature des gros granulats exercent une grande influence sur la résistance, la performance et l'endurance du béton. De ce fait, pour un même dosage, si la résistance des gros granulats est faible, même augmenter la dose du ciment ou abaisser le rapport eau chaux, l'augmentation de la résistance du béton est toujours très limitée et cela ne correspond pas aux exigences d'économie. Le béton de granulats recyclés est fabriqué avec les granulats recyclés qui sont obtenus par le concassage et le criblage du béton à rejeter, d'une manière semblable, la résistance et la nature des granulats recyclés ainsi que le taux de granulats naturels remplacés par les granulats recyclés exercent une grande influence sur la résistance et la performance du béton de granulats recyclés, et la résistance et la nature des granulats recyclés ont rapport à la résistance du béton original et au procédé de concassage de granulats recyclés, ainsi, la définition de la résistance du béton original est vraiment importante. Les composants, la classe de résistance, l'environnement d'utilisation et le degré de carbonisation sont différents du fait de provenance différente du béton abandonné, celle-ci entraîne l'irrégularité d'évolution de la résistance du béton de recyclage. Mais de nombreuses recherches montrent que la résistance du béton de recyclage est étroitement liée à celle du béton original, par

exemple les résultats de essai et Tavakoli M. [1] montrent que pour le béton de recyclage de résistance de différente, la résistance du béton original exerce une différente influence sur celle du béton de recyclage. Lors de la préparation du béton de recyclage à haute résistance, la résistance du béton original exerce la plus grande influence sur celle du béton de recyclage; en cas de confection du béton de recyclage à moyenne résistance, son influence est moins grande; alors pour la fabrication du béton de recyclage à faible résistance, son influence est la moins grande. C'est parce que si la résistance du béton original est très faible, la résistance des granulats recyclés provenant de celui-ci est aussi faible, d'ailleurs, la porosité et l'absorption des granulats recyclés sont plus grandes que celles des granulats naturels. C'est aussi la raison pour laquelle les granulats ne sont qu'utilisés dans la confection du béton de recyclage à moyenne et faible résistance. En conséquence, la résistance du béton original influe considérablement celle des granulats recyclés, notamment pour la fabrication du béton de recyclage à haute résistance, l'impact de la résistance du béton original est considérable. Par conséquent, avant la fabrication du béton de granulats recyclés, il est nécessaire d'effectuer un test pour la résistance du béton original, définir selon la résistance du béton original la limite de résistance d'adaptation du béton de granulats recyclés. Actuellement, en Chine, il n'existe pas de méthode de résistance précise et systématique pour le béton abandonné, c'est parce que le béton abandonné est les déchets de construction par les bâtiments nouvellement construits et la décomposition des bâtiments, en général, il est ancien, il est impossible d'obtenir les indices techniques (y compris la classe de résistance), sa forme est irrégulière et fragmentaire, de ce fait, la méthode de mesure de résistance du béton original est très particulière. Conformément aux spécifications, utiliser 1) Méthode par ultrasons; 2) Méthode par forage de carottage

## **2.2 Mesure de résistance du béton original**

Le béton original du présent essai provient de la piste de l'aéroport Wangjiadun de Wuhan. Cette piste a été construite avant la Libération, dont le nombre d'années de

construction n'est pas précis, les données techniques ne sont pas claires à cause de plusieurs réhabilitation, ainsi est-il impossible de définir sa résistance originale. A cause des gros et épais blocs de béton abandonné de la piste de l'aéroport, on mesure avec les méthodes par ultrasons et le forage de carottage la qualité et la résistance du béton original en utilisant les carottes suffisamment grandes forées dans les blocs de béton abandonné.

### 2.2.1 Méthode par ultrasons

Pour assurer un bon couplage de transducteur et de béton, l'agent de couplage est la vaseline. Examiner la valeur de temps de son en utilisant les ultrasons, il faut appliquer étroitement le transducteur sur les deux surfaces debout de l'éprouvette de carotte. Les résultats de test ci-dessous :

	Diamètre (mm)	Haut (mm)	Tempe (µs)	amplitude d'ondes (dB)	Vitesse (m/s)
1	100.1	100.4	17.8	-99.9	5640
2	99.7	100	19.6	-85.8	5102
3	99.1	100.5	19.8	-85	5076
4	99.7	100.3	18.8	-83.5	5335
5	99.1	100	20.4	-89.2	4902

Tableau 1.

Généralement, plus le béton est compact, plus la résistance est forte et la propagation des ondes mesurée par les ultrasons est rapide. Lorsque la vitesse des ondes de pulse des ultrasons est supérieure à 4km/s, la qualité du béton est bonne; en cas de vitesse des ondes 3 à 4km/s, sa qualité est ordinaire; lors de la vitesse des ondes inférieure à 3km/s, le béton a une mauvaise qualité. Alors le tableau montre que la vitesse des ondes de carotte du béton original est supérieure à 4km/s, on peut déterminer que le béton original de la piste est compact et possède une bonne

qualité.

### 2.2.2 Mesure de résistance par carottage

Les spécifications de réception de béton stipulent que, en cas de doute sur la résistance du béton, on peut la régler par le forage de carottage, en conséquence, on peut déterminer la résistance du béton original par les carottes forées du béton abandonné. Mais limité par les dimensions du bloc de béton abandonné, il est difficile de forer des carottes de dimension standard (diamètre et hauteur de 100 mm), ainsi apparaît le problème de proportion de conversion entre la résistance de la petite carotte et celle à la compression du cube type. Alors la dispersivité de la carotte de petit diamètre est grave, les facteurs d'impact de carottes de petit diamètre sont beaucoup plus compliqués que celles de grand diamètre. Comme les blocs en béton abandonné de la piste de l'aéroport choisis sont gros et épais, définir ainsi la résistance du béton original par le forage de carottage. Choisir six blocs de béton abandonné de grande taille, 2 groupes de carottes (6 au total) sont forés avec un diamètre et une hauteur de 100mm, doucir les deux surfaces de bout de carottes, mettre ensuite les carottes forées de béton sur la presse pour la compression (figure1).

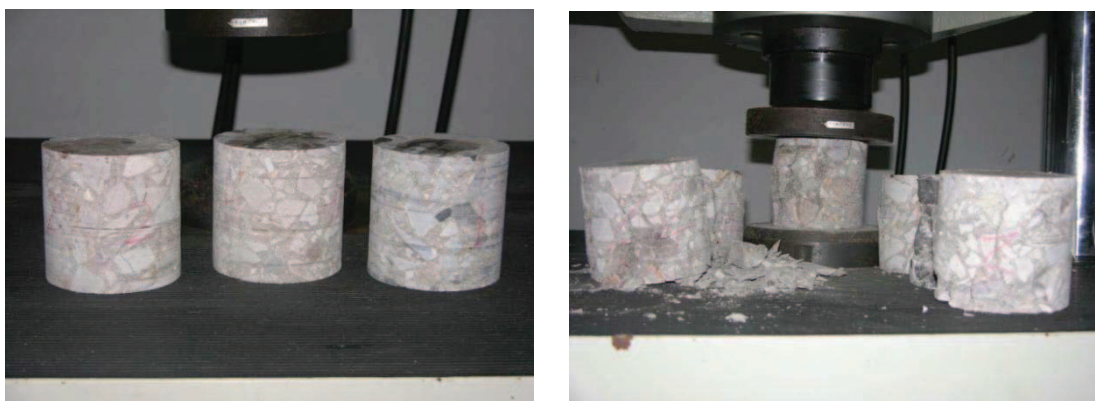


Figure 1

Les résultats des carottes forées de béton sur la presse pour la compression ci-dessous :

	Diamètre (mm)	Haut (mm)	Compression (KN)	Résistance (MPa)
1	100.1	100.4	415	52.73
2	99.7	100	393	50.34
3	99.1	100.5	400	51.86
4	99.7	100.3	411	52.65
5	99.1	100	391	50.69
6	99.9	101.3	387	49.37

Tableau 2.

Selon le tableau 2, les valeurs de résistance à la compression des éprouvettes, ainsi obtenue la valeur moyenne de celle-là du béton original :

$$f_{cu} = (52.73+50.34+51.86+52.65+50.69+49.37) /6=51.27 \text{ (MPa)}$$

Or, la considération en résistance moyenne à la compression des carottes est insuffisante, tant au point de vue de statistiques que sur le plan d'analyse des données, le degré de dispersivité des données des échantillons est extrêmes important, il convient de calculer la variance d'échantillon des données de l'échantillon unique et l'écart type d'échantillon SD, la variance d'échantillonnage de données de l'échantillon unique S et l'écart type d'échantillons SD sont respectivement:

$$S_n^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^6 (f_{cu,i} - f_{cu})^2 = 1,5326$$

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^6 (f_{cu,i} - f_{cu})^2} = 1,2379$$

La probabilité pour la résistance à la compression des carottes entre ( $f_{cu}-2SD$ ,  $f_{cu}+2SD$ ) soit (48,794, 53,746) est  $100\% > 95\%$ <sup>[2]</sup>, ceci se conforme à l'exigence, on peut ainsi considérer que la dispersivité des données n'est pas considérable. Selon les résultats de test aux moyens des ultrasons et du forage de carottage, on trouve que le résultat de résistance des carottes de béton obtenu par les ultrasons correspond généralement à celui obtenu par le forage de carottage, c'est-à-dire pour les carottes de béton dont la résistance est forte, la propagation d'ondes est aussi rapide. En conséquence, selon le résultat de résistance mesurée par le forage de carottage et celui de qualité évaluée par les ultrasons, on peut présumer que la résistance du béton original actuelle est C50.

En résumé, quelque soit la méthode utilisée, ce qu'on obtient est la résistance du béton original actuelle, si l'on veut présumer la résistance originale du béton abandonné, il convient de prendre en considération les influences de temps de fonctionnement, conditions d'utilisation, dimension et forme des éprouvettes mesurées, cependant, au cours de la confection et de l'application du béton de granulats recyclés, il ne tient compte que de la résistance réelle du béton original en phase actuelle.

## **2.3 Étude de dosage et performances de service du béton de granulats recyclés à hautes performances**

Suivant le principe fondamental de la science des matériaux, on peut obtenir le mortier de faible porosité en abaissant le rapport eau chaux de manière à renforcer la résistance du béton. Mais au cours de la préparation du béton à hautes performances pour les travaux réels, les matières minérales telles que cendres volantes, poudre minérale ainsi que plastiment à haute efficacité de façon à améliorer les performances de service du béton et augmenter l'endurance du béton. Lors de la conception de dosage du béton à hautes performances pour l'essai, le dosage du béton de granulats naturels à hautes performances fera foi, se référer en même temps au dosage de fabrication du béton dans la centrale à béton prémélangé, viser la résistance et le degré vert du béton de granulats recyclés en tenant compte



des performances du béton prémélangé pompé, de plus, renforcer la résistance et les performances de service du béton de recyclage en abaissant le rapport eau chaux, additionnant les matières minérales comme cendres volantes, poudres de laitier fines et ajoutant le plastiment à haute efficacité. Cependant, l'addition de cendres volantes, poudres de laitier fines améliore d'une part les performances de service du béton de granulats recyclés, économise le ciment et baisse son coût de fabrication d'autre part, en outre, ce qui permet de bien profiter des résidus industriels tels que cendres volantes, laitiers, etc. de manière à réduire la pollution de l'environnement par les résidus industriels et augmenter le degré vert du béton de recyclage.

### **2.3.1 Matières premières**

#### **1, Granulats (WCA)**

Les gros granulats appliqués dans le béton de granulats recyclés proviennent tous de ceux recyclés du béton abandonné de la piste de l'aéroport Wan Jia Dun de Wuhan (WCA), la résistance du béton original est C50, le diamètre des gros granulats recyclés et naturels se trouve entre 5 à 31,5mm au travers du broyage et du criblage manuel. Les granulats fins (S) et les gros granulats (G) du béton de granulats naturels.

#### **2, Ciment (C)**

Ciment à base de silicate ordinaire 42,5Mpa de la Marque Baolei fabriqué par HUAXIN CEMENT CO., LTD

#### **3, Eau (W)**

Eau courante de la ville de Beijing.

#### **4, Cendres Volantes (FA)**

Cendres volantes provenues de la Centrale thermique Hanchuan du Hebei, avec une finesse de 14,8% et une perte au feu de 5,79%.

#### **5, Poudre de laitier (SF)**

Poudre de laitier classe S95 dont la surface spécifique est de 385m<sup>2</sup>/kg et la perte au feu est de 2,35% fabriquée par la Société de Ciment Huaxin de Wugang

## 6, Poudre de silice (Si)

Pour renforcer la résistance du béton, ajouter la poudre de silice classe 920U fabriquée par la société Elkem de la Norvège en fabriquant le béton de granulats recyclés C60 et le béton de granulats naturels, la teneur en SiO<sub>2</sub> de la poudre de silice est de 92,66%, la perte au feu est de 1,34%.

## 7, Adjuvant (FDN)

Plastiment à haute efficacité de la série naphthalène (FDN), brun, liquide, teneur en matières solides 31,04%, taux de plastiment 19,5%.

### 2.3.2 Étude de dosage

Pour le présent essai comparé, on prend le dosage du béton de granulats naturels à hautes performances comme référence, on a conçu le béton de granulats naturels à hautes performances de résistance de cinq classes (C35-1, C45-1, C50-1, C55-1, C60-1) et celui de granulats recyclés à hautes performances de résistance de cinq classes (C35-2, C45-2, C50-2, C55-2, C60-2).

Tableau 3. Dosage du béton de granulats naturels à hautes performances

	C(kg)	SF(kg)	FA(kg)	G(kg)	S(kg)	W(kg)	FDN(kg)	Si(kg)
C35-1	232	58	90	1100	740	180	7.8	-
C45-1	312	78	90	1080	680	188	10.5	-
C50-1	344	86	90	1080	680	188	11.8	-
C55-1	360	90	90	1080	650	190	13.8	-
C60-1	380	100	80	1080	630	200	16	25

Tableau 4. Dosage du béton de granulats recyclés à hautes performances

	C(kg)	SF(kg)	FA(kg)	WCA(kg)	S(kg)	W(kg)	FDN(kg)	Si(kg)
C35-2	232	58	90	1100	740	195	7.8	-
C45-2	312	78	90	1080	680	200	10.5	-

C50-2	344	86	90	1080	680	205	11.8	-
C55-2	360	90	90	1080	650	205	13.8	-
C60-2	380	100	80	1080	630	212	16	25

### 2.3.3 Performances de mélanges de béton et préparation d'éprouvette

Les mélanges de béton est mélangés par le malaxeur à béton de force J-50 fabriqué par TIANJINSHI LUDA JIANZHUYIQI CO., LTD, faire des mélanges de béton l'éprouvette cubique 150mmx150mmx150mm, les éprouvettes prismatiques de 150mmx150mmx300mm et 150mmx150mmx450mm, vibrer les éprouvettes sur la table vibrante, réaliser ensuite la cure pour 28 jours selon la méthode normalisée, elles sont respectivement utilisées pour examiner la résistance à la compression, celle à la compression axiale, celle à la traction par fendage du cube. Le béton frais possède obligatoirement de bonnes performances de service en vue d'assurer la facilité d'exécution et la qualité du béton, ainsi, avant le coulage et le moulage du béton, effectuer les essais de slump et de degré d'expansion auprès du béton frais de granulats recyclés et du béton, et pour le béton à hautes performances. Les résultats des essais de slump et de degré d'expansion sont ci-dessous :

Béton de granulats naturels à hautes performances					
	C35-1	C45-1	C50-1	C55-1	C60-1
Slump(mm)	1900	2200	2250	2600	2100
Degré d'expansion(mm)	5000	5850	5900	6000	4550

Tableau 5.

Béton de granulats recyclés à hautes performances					
	C35-2	C45-2	C50-2	C55-2	C60-2

Slump (mm)	1700	2100	2250	2300	2150
Degré d'expansion(mm)	4100	5200	5300	5700	4700

Tableau 6.

Selon le tableau 5 & 6, dans le béton de granulats recyclés, le slump du béton de granulats recyclés C55 est le plus grand, il atteint 23cm, le degré d'expansion atteint aussi 57cm, le slump et le degré d'expansion du béton de granulats recyclés sont minimums, mais son slump atteint 17cm et le degré d'expansion atteint 41cm, ces deux indices du béton frais de granulats recyclés montrent que la bonne performance de service de celui-ci, ce qui correspond à l'exigence de pompage du béton tout préparé ( $180\pm 20$ mm).

## **2.4 Résistance du béton de granulats recyclés à hautes performances**

### **2.4.1 Résistance à la compression du cube**

#### **1 Processus de déformation et de rupture**

La définition de résistance standard du béton en Chine : l'éprouvette cubique d'un côté de 150mm, moulée selon la méthode normalisée, une cure pour 28 jours dans la condition standard, la résistance à la compression mesurée avec un taux d'assurance de 95% en utilisant la méthode normalisée d'essai. De ce fait, la résistance à la compression du cube (fcu) constitue tout de même l'indice le plus important pour examiner le béton de granulats recyclés à hautes performances. Conformément à la « Norme de méthode d'essai de caractéristiques mécaniques du béton courant », examiner la résistance à la compression du cube de béton 28 jours fcu. L'essai manifeste que la loi de propagation de fissures et le mode de rupture finale du béton de granulats recyclés sont semblables à ceux du béton de granulats naturels. Après le commencement de chargement, avec l'augmentation de la charge, progressivement, la contrainte à l'intérieur de l'éprouvette de béton de granulats recyclés augmente, la déformation de compression dans le sens vertical se produit,

horizontalement, la déformation d'expansion apparaît. Les deux extrémités de l'éprouvette se trouvent dans un état sous les actions de contrainte à la compression verticale et de frottement horizontal aux deux sens, ce qui forme une action de « virole », par conséquent, la déformation d'expansion des deux extrémités de l'éprouvette n'est pas si sensible, mais l'action de « virole » disparaît quasiment au milieu de l'éprouvette dans le sens de hauteur, la déformation d'expansion horizontale paraît la plus sensible. Les fissures originales le long du sens vertical apparaissent sur la surface au milieu de l'éprouvette, s'étendent obliquement en haut et en bas jusqu'à la surface de chargement et tournent ensuite vers le coin, qui forment de nombreux, le chargement continue, les nouvelles fissures se développent petit à petit vers l'intérieur, la couche superficielle de l'éprouvette de béton commence à bomber, se détacher, le béton de recyclage se trouve dans un état de compression triaxiale, au fur et à mesure du bombement et du détachement de béton superficiel de l'éprouvette, la surface de compression et la force de placage horizontale se diminuent sans cesse, la rupture de béton au milieu de l'éprouvette dans le sens de hauteur est la plus grave, ce qui forme finalement une surface de rupture pyramide. Voici la figure 2-2.



Figure 2-1. C50-1



figure 2-2. C50-2

Selon l'essai, on trouve également que la rupture du béton de granulats recyclés à hautes performances est en général celle de l'interface entre les granulats recyclés et la base de ciment sec, la rupture de granulats recyclés est rare, c'est parce que les particules écailleuses n'existent pas après le concassage des granulats recyclés,

d'ailleurs, la résistance de l'interface est moins forte que celle de la base de ciment sec, la rupture de l'interface se produit d'abord; la rupture de béton de granulats naturels à hautes performances est en grande partie celle de l'interface, il y a peu de rupture de granulats, c'est parce que les particules écailleuses contenues dans les granulats naturels ou ceux-ci eux-mêmes ont des défauts, en conséquence, la rupture se déclare d'abord dans les granulats naturels portant des défauts ou diaclases. La rupture de béton de granulats naturels à hautes performances est accompagnée du bruit de craquage, la vitesse de rupture est supérieure à celle du béton de granulats recyclés à hautes performances, cela signifie que la frangibilité de rupture de béton de granulats recyclés à hautes performances est sensiblement inférieure à celle du béton de granulats naturels, de plus, de même que le béton de granulats naturels à hautes performances, plus forte la résistance, plus rapide la rupture, le béton semble plus frangible.

## 2 Résultats d'essai et analyses

La résistance à la compression  $f_{cu}$  du cube de béton de granulats recyclés et de granulats naturels à hautes performances mesurée par les essais :

Béton de granulats naturels	C35-1	C45-1	C50-1	C55-1	C60-1
La résistance à la compression ( $f_{cu}$ )	43.76	53.52	57.56	61.15	66.25
Béton de granulats recyclés	C35-2	C45-2	C50-2	C55-2	C60-2
La résistance à la compression ( $f_{cu}$ )	42.69	51.73	55.59	57.63	59.70

Tableau 7.

La résistance du cube de béton de granulats recyclés C60 baisse de 9,89% par rapport à celle du béton de granulats naturels C60, pourtant, la résistance du cube de béton de granulats recyclés C35, C45, C50, C55 baisse respectivement de 2,45%, 3,34%, 3,42%, 5,76% par rapport à celle du béton de granulats naturels de même résistance.

Les résultats d'essais montrent encore que plus forte la résistance du béton de granulats recyclés à hautes performances, son abaissement de résistance à la compression du cube est plus sensible par rapport à celui du béton de granulats naturels, en cas de résistance supérieure à C60, la résistance du béton de granulats recyclés à hautes performances abaisse plus sensiblement en comparaison avec celle du béton de granulats naturels à hautes performances, la confection du béton à ultra hautes performances avec les granulats recyclés est limitative. En général, il y a les raisons suivantes : (1) la contrainte est concentrée lors du support de compression axiale à cause de la haute porosité des granulats recyclés; (2) le concassage de gros granulats recyclés entraîne de nombreux défauts, par exemple, l'accumulation des lésions de concassage cause une quantité de micro-fissures à l'intérieur et sur la surface des granulats recyclés; (3) la surface des granulats recyclés enrobée de coulis de ciment de différents degrés conduit à des zones de faible adhérence de base de ciment sec aux gros granulats recyclés. La résistance de l'interface du béton de granulats recyclés à ultra hautes performances est visiblement inférieure à celle de la base de ciment sec, la rupture commence donc par l'interface, les granulats recyclés ne doivent pas être utilisés pour la préparation du béton de granulats recyclés à ultra hautes performances.

## **2.4.2 Résistance à la compression axiale**

### **1 Processus de déformation de compression et de rupture**

La « Méthode d'essai de caractéristiques mécaniques du béton commun » chinoise stipule que la résistance à la compression de 28 jours du béton mesurée conformément à la méthode normalisée en prenant le prisme de 150mmx150mmx300mm comme l'éprouvette standard est celle à la compression axiale du béton ( $f_c$ ), généralement, cette valeur représente aussi la résistance à la compression uniaxiale, uniforme. Effectuer l'essai de compression axiale en utilisant l'éprouvette prismatique de 150mmx150mmx300mm avec une cure de 28 jours. Les résultats d'essai montrent que la loi de propagation de fissures et la forme de rupture du béton de granulats recyclés à hautes performances sont ressemblés généralement à celles du béton de granulats naturels à hautes performances, en même temps, c'est

possible d'observer minutieusement au cours de l'essai l'apparition et la propagation des fissures superficielles de l'éprouvette. Par exemple, au début du chargement, la contrainte de l'éprouvette de béton de granulats recyclés apparaît faible, il n'existe pas de fissures visibles sur la surface de l'éprouvette, avec l'augmentation de la charge, les fissures visibles sur la surface de l'éprouvette apparaît d'abord aux faces latérales coulées du béton, et elles s'étendent des coins de deux extrémités vers le centre, comme la charge augmente davantage, les fissures se développent de plus, en cas d'approximité à la charge de rupture, la propagation de rupture devient rapide et continue de s'étendre et pénètrent, le béton situé au côté arête croisé de face latérale coulé et de base se détache, les fissures sont visibles lors de la rupture de béton de granulats recyclés. On trouve également au travers l'essai que la propagation de fissures du béton de granulats naturels à hautes performances est plus rapide que celle du béton de granulats recyclés, la rupture est aussi plus rapide, le détachement de béton au côté arête est plus grave que celui du béton de granulats recyclés, il est évident que la fragilité du béton de granulats naturels à hautes performances est supérieure à celle du béton de granulats recyclés à hautes performances.



Figure3-1 C45-1



Figure 3-2 C45-2





Figure3-3 C60-1



Figure3-4 C60-2

## 2 Résultats d'essai et analyse

La résistance à la compression axiale  $f_c$  du béton de granulats recyclés et naturels à hautes performances mesurée par l'essai :

béton de granulats naturels	C35-1	C45-1	C50-1	C55-1	C60-1
La résistance à la compression ( $f_c$ )	33.91	41.33	44.02	45.16	49.69
$f_c/f_{cu}$	0.77	0.77	0.76	0.74	0.75
béton de granulats recyclés	C35-2	C45-2	C50-2	C55-2	C60-2
La résistance à la compression ( $f_c$ )	33.32	40.87	43.99	44.71	47.08
$f_c/f_{cu}$	0.78	0.79	0.79	0.78	0.79

Tableau 8

Le ratio entre la résistance à la compression axiale du béton de granulats recyclés à hautes performances et celle à la compression du cube est supérieur à celui entre la résistance à la compression axiale du béton de granulats naturels et celle à la compression du cube. Par exemple, le ratio  $f_{cu}/f_{cp}$  minimum du béton de granulats recyclés est de 0,78, le maximum est de 0,79, la moyenne est de 0,786, tandis que le ratio moyen du béton de granulats naturels à hautes performances est de 0,756, ce ratio pour le béton de granulats recyclés est supérieur de 3,97% à celui pour le béton de granulats naturels, ce point correspond au béton d'agrégats légers. Simultanément, la résistance à la compression axiale du béton de granulats recyclés à

hautes performances de même classe de résistance est inférieure à celle du béton de granulats naturels, ce point correspond à la loi d'évolution de résistance à la compression du cube. La « Norme de conception de structure du béton » (GB 50010-2002) précise que pour le béton de résistance C50 ou inférieure, le ratio entre la résistance à la compression du prisme et celle à la compression du cube  $C_{1\alpha} = 0,76$ , pour C80,  $C_{1\alpha} = 0,82$ , les autres évoluent suivant la loi linéaire. Bien que les résultats d'essai montrent que le ratio entre la résistance à la compression axiale du béton de granulats recyclés à hautes performances et celle à la compression du cube est supérieur à celui pour le béton de granulats naturels à hautes performances, le ratio est en général proche de celui précisé pour le béton de granulats naturels par les spécifications en vigueur.

### **2.4.3 Résistance à la traction par fendage**

#### **1 Essai de la résistance à la traction par fendage pour le béton**

La résistance à la traction et la déformation sont aussi les caractéristiques mécaniques les plus essentielles du béton. Elles font une partie composante importante pour étudier la théorie de température et le mécanisme de rupture du béton qui concernent directement la fissure de la structure de béton et la réaction de déformation. Le béton est considéré de tout temps comme une matière fragile avec une basse résistance à la traction, en général, la résistance à traction du béton est seulement  $1/9 \sim 1/18$  de la résistance à la compression, dont la déformation limite et la charge d'écrasement sont basses. Pour faciliter l'essai, il faut tester la résistance à la traction par fendage de 28 jours du béton  $f_{ts}$  pour les éprouvettes  $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 150\text{mm}$  adoptées du présent essai conformément aux normes. Au fur et à mesure de l'augmentation de charge, les fissures verticales ont apparues rapidement au milieu de la hauteur de l'éprouvette en béton de granulats recyclés, qui se sont développées vers les cales en bas et en haut et par où elles ont traversé en s'étendant. L'éprouvette est fendue en deux rapidement en accompagnant le son de fendage cristallin dont la surface de rupture est régulière, la charge est faible lors de la rupture. L'essai montre que la rupture par fendage du béton de granulats recyclés à hautes performances est essentiellement identique à celle du béton de

granulats naturels à hautes performances.

Mais la surface de rupture du béton de granulats naturels à hautes performances est plus régulière que celle du béton de granulats recyclés à hautes performances, celui-là a non seulement la rupture d'interface, mais aussi la rupture de granulats, mais le béton de granulats recyclés à hautes performances a essentiellement la rupture par fendage d'interface qui a rarement la rupture de granulats, on peut voir un grand nombre de granulats recyclés exposés sur la surface de fendage.



Figure 4-1 C50-2

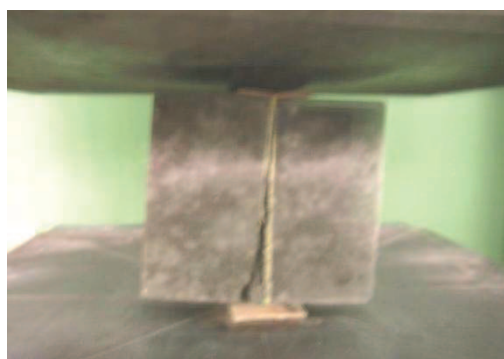


Figure4-2. C35-2

## 2 Résultat et analyse d'essais

Pour la résistance à la traction par fendage de 28 jours  $f_{ts}$  des bétons de granulats naturels à hautes performances et bétons de granulats recyclés à hautes performances résultant de l'essai, veuillez voir le tableau 9.

Béton de granulats naturels	C35-1	C45-1	C50-1	C55-1	C60-1
$(f_{ts})$	2.63	2.91	3.18	3.26	3.85
$f_{ts}/f_{cu}$	0.060	0.055	0.055	0.053	0.058
béton de granulats recyclés	C35-2	C45-2	C50-2	C55-2	C60-2
$(f_{ts})$	2.40	2.84	2.96	3.01	3.74
$f_{ts}/f_{cu}$	0.056	0.055	0.053	0.052	0.062

Tableau 9

Le ratio de la résistance à la traction du béton de granulats recyclés à hautes

performances à la résistance à compression du cube varie entre 0,052~0,062, le ratio de la résistance à la traction du béton de granulats naturels à hautes performances à la résistance à compression du cube varie entre 0,053~0,060, le cadre de ces deux variations est similaire. La loi de variation de la résistance à la traction du béton à hautes performances est identique à celle de la résistance à compression axiale et de la résistance à compression du cube, c'est-à-dire la résistance à la traction par fendage des bétons de granulats recyclés à hautes performances de même niveau de résistance est un peu abaissée que la résistance à la traction par fendage des bétons de granulats naturels à hautes performances de même niveau de résistance, mais la différence entre ces deux résistances est minime.

## 2.5 Conclusion

Dans le présent article, on fait d'abord les essais et décisions sur la résistance du béton original de granulats recyclés, afin de déterminer la résistance convenable du béton de granulats recyclés, de plus, en se basant sur la conception de la proportion du béton de granulats naturels à hautes performances, additionner les matières minérales très fines (cendre volante, poudre minérale) et le superplastifiant et en même temps augmenter convenablement la quantité d'eau à utiliser, afin de réaliser la haute performance du béton de recyclage.

Il faut également effectuer les essais pour la caractéristique de fonctionnement et la caractéristique mécanique du béton de granulats recyclés à hautes performances en se basant sur le béton de granulats naturels à hautes performances. Les objets du présent article et la conclusion obtenue sont ci-dessous :

1. Selon les essais, le béton de granulats recyclés possède une bonne caractéristique de fonctionnement, il est complètement possible de confectionner le béton de granulats recyclés à hautes performances par un moyen raisonnable en utilisant les granulats recyclés, la fluidité du béton de granulats recyclés est généralement un peu inférieure à celle du béton de granulats naturels, mais l'affaissement du celui-là peut encore satisfaire aux exigences du béton pompé tout préparé, en outre, l'adhérence et la rétention d'eau du béton de granulats recyclés sont meilleures que celles du

béton de granulats naturels.

2. On a effectué les essais pour la résistance à la compression, la résistance à la compression axiale et la résistance à la traction par fendage du cube en béton de granulats recyclés à hautes performances, on a également effectué l'analyse de comparaison entre son résultat d'essai et celui du béton de granulats naturels à hautes performances. Les essais présentent la caractéristique de rupture du béton de granulats recyclés à hautes performances qui certifie que la loi de variation de résistance et le mode de rupture du béton de granulats recyclés à hautes performances sont similaires à ceux du béton de granulats naturels à hautes performances. En outre, l'essai de compression et celui de traction par fendage du cube en béton de granulats recyclés à hautes performances montrent que la rupture de ce béton est celle d'interface.

3. Le résultat de l'essai de résistance montre que la résistance à la compression, la résistance à la compression axiale et la résistance à la traction par fendage du cube en béton de granulats recyclés à hautes performances sont un peu inférieures à celles du béton de granulats naturels à hautes performances du même niveau de résistance, de plus, le ratio de la résistance à la compression axiale du béton de granulats recyclés à hautes performances à la résistance à la compression du cube est un peu supérieur à celui du béton de granulats naturels à hautes performances.

## **III. Etudes sur la microstructure du béton de granulats recyclés à hautes performances**

### **3.1 Introduction**

#### **3.1.1 Structure d'interface**

La structure d'interface du béton de granulats recyclés est relative au niveau de décapage des granulats recyclés pendant la fabrication. Pour les granulats recyclés complètement décapés, comme l'ancienne ciment sec qui l'enveloppe a été

complètement décapée pendant la confection du granulat recyclé, ce granulat recyclé est presque équivalent au granulat naturel, le béton fabriqué par ce granulat recyclé complètement décapé ne comporte que l'interface du granulat complètement décapé et nouvelle ciment sec, dont la structure d'interface est pareil à celle du béton de granulat naturel; Pour le granulat recyclé partiellement décapé, une partie de la surface du granulat recyclé est enveloppée par l'ancienne ciment sec, pour cette partie, le béton de granulat recyclé a formé une interface double : l'interface du granulat naturel original et ancienne ciment sec; l'interface de nouvelle ciment sec et ancienne ciment sec.

Donc, en comparant avec le béton de granulats naturels, le béton de granulats recyclés contient l'interface du granulat naturel original et ancienne ciment sec, l'interface du granulat naturel original et nouvelle ciment sec, ainsi que l'interface de l'ancienne ciment sec sur la surface du granulat recyclé et nouvelle ciment sec.

### **3.1.2 Mécanisme et caractéristiques de la formation de la zone de transition des interfaces**

Dans les années 50 du 20<sup>ème</sup> siècle, certains savants ont déjà proposé le concept de la zone de transition des interfaces, et dans les années 70 du 20<sup>ème</sup> siècle, il y a encore des savants qui ont proposé successivement l'idée «zone de transition d'interface» ou «couche de transition d'interface», ils estiment que l'interface du mortier de ciment et de granulats n'est pas une « face », mais une «couche» ou «zone» avec une certaine épaisseur, qui est appelée actuellement « zone de transition d'interfaces » du béton (ITZ). Selon cette idée, en se basant sur l'affaissement irrégulier des grains dans le béton frais, on estime que, dans le mortier, sous l'effet de gravité, les grains de ciment s'affaissent, et l'eau se meut vers le haut, alors les granulats arrêteront le mouvement vers le haut de l'eau, en conséquence, l'eau forme une poche des eaux au-dessous des granulats, et une grande quantité de  $Ca^{2+}$  sont produits par l'hydratation des grains de ciment au-dessous qui seront amenés au-dessous des granulats par de l'eau et qui s'y concentreront, en formant la zone de transition d'interfaces, cette zone a une épaisseur d'environ  $0 \sim 100\mu m$ [4]

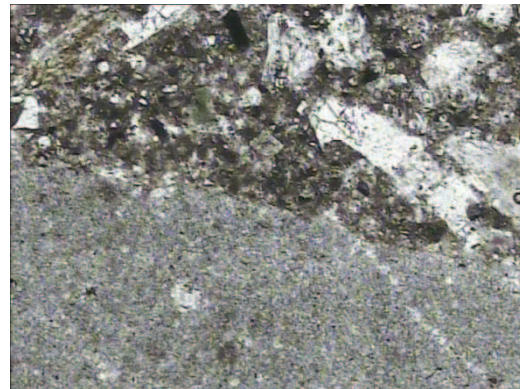
## **3.2 Analyse des défauts de l'interface du béton de granulats recyclés à hautes performances à l'aide du microscope polarisant**

### **3.2.1 Appareils d'essais et fabrication d'échantillon**

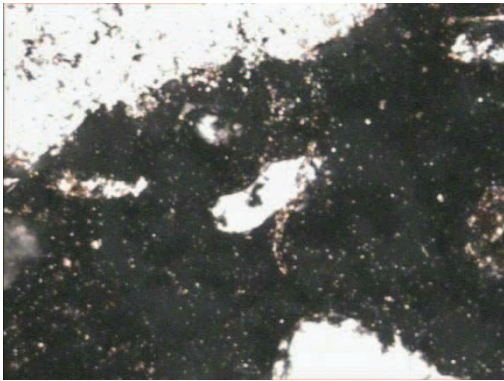
Le microscope polarisant Axioskop (Zeiss, Germany) 40-Pol à 500x fois d'agrandissement, le présent essai utilise principalement le microscope polarisant pour tester et étudier les défauts de la zone de transition du béton. Après 28 jours de cure standard, il faut prendre les substances mères des bétons de granulats recyclés à hautes performances et de granulats naturels à hautes performances qui sont fabriqués selon la proportion indiquée dans l'article 2, et les laisser statiquement dans l'environnement naturel pour 28 jours, poser statiquement 30 jours l'échantillon dans l'environnement naturel, et puis le couper en morceaux rectangulaires 8mm×8mm×5mm

### **3.2.2 Essai de défaut de l'interface du béton de granulats recyclés**

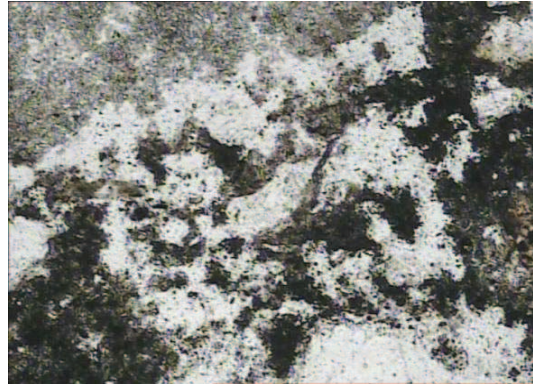
Mettre le morceau en béton de granulats recyclés sous le microscope polarisant pour effectuer une observation, la photo de la zone de transition de l'interface de granulat du béton de granulats recyclés à hautes performances-nouvelle ciment sec est figurée dans l'image.



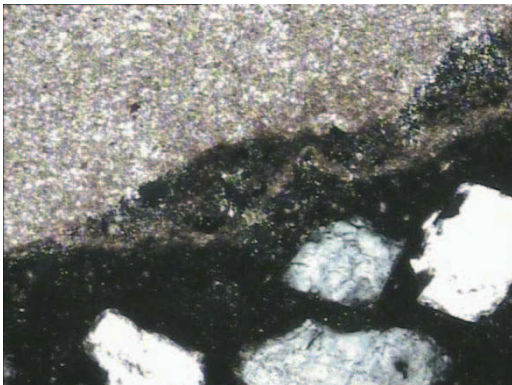
(a)C35-2-1 (50+)



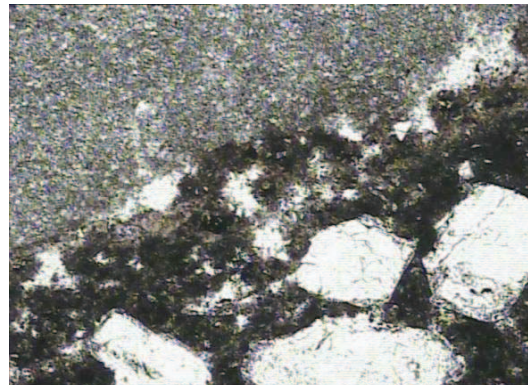
(b)C35-2-1 (50-)



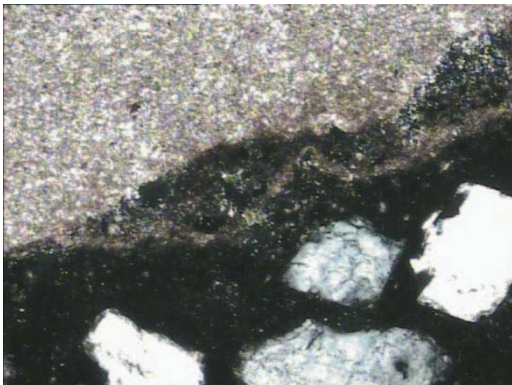
(c) C45-2-1 (50+)



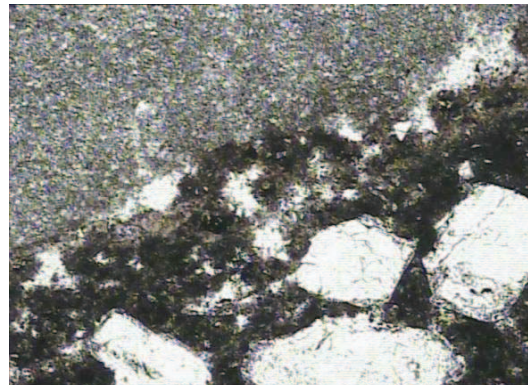
(d) C45-2-2 (50-)



(e) C50-2-1 (50+)



(f) C50-2-1 (50-)



Les images a et b sont les photos concernant l'interface de granulat du béton de granulats recyclés C35 nouvelle ciment sec qui sont prises respectivement sous la polarisation orthogonale de 50 fois et la monopolarisation de 50 fois, par lesquelles on peut constater clairement qu'il existe une zone de transition d'interface sensible entre les granulats recyclés et la nouvelle ciment sec, dans laquelle il y a de petits trous ; Selon les images c et d, on peut constater qu'il y a aussi une zone de transition d'interface sensible entre les granulats recyclés du béton de recyclage C45 et la nouvelle ciment sec, dans laquelle existent des trous de taille différente qui se connectent en formant une zone faible sensible, cette situation apparaît aussi pour les autres bétons de granulats recyclés à hautes performances de classe de résistance différente ; Et les images e et f montrent clairement que la surface du granulat recyclé qui n'a pas complètement décapé est encore enveloppée par l'ancienne ciment sec, où le béton de recyclage comporte une double interface : interface granulat naturel original-ancienne ciment sec, interface nouvelle ciment

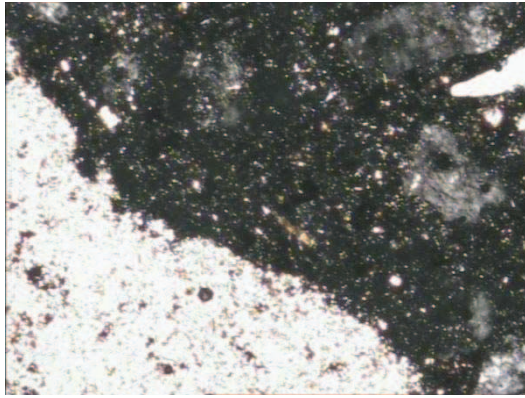


sec-ancienne ciment sec. Le ciment sec de cette double interface est compacte et la combinaison d'interface est étroite.

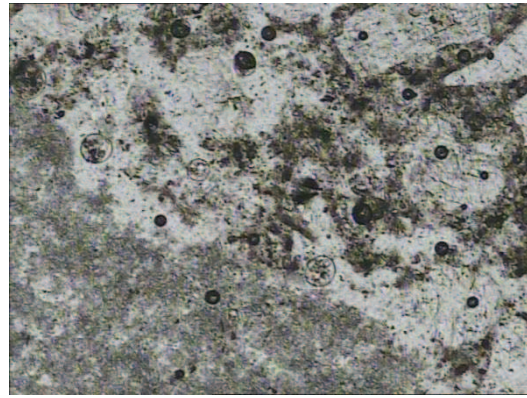
En analysant les photos des bétons de granulats recyclés à hautes performances de classe de résistance différente qui sont prise par le microscope polarisant, on constate que la situation du béton de granulats recyclés se trouve identique à celle du béton de granulats naturels, il existe aussi une zone de transition d'interface entre les granulats recyclés et la base de nouvelle ciment sec. Les interfaces et les caractéristiques de zone de transition des bétons de granulats recyclés à hautes performances de résistance différente sont fondamentalement identiques. Il existe des trous de taille différente dans la zone de transition d'interface qui y forment une zone faible d'interface sensible. Au fur et à mesure de l'élévation de résistance, les caractéristiques de la zone faible d'interface du béton de granulats recyclés à hautes performances seront peu à peu faibles, le nombre des trous dans la zone de transition d'interface sera réduit, le diamètre du trou sera diminué, les défauts tels que les trous seront de plus en plus faibles. Selon les images a~d, il existe une substance brillante au droit de la jonction de l'interface ancienne ciment sec-nouvelle ciment sec du béton de granulats recyclés à hautes performances, où la combinaison de l'interface ancienne ciment sec-nouvelle ciment sec est étroite.

### **3.2.3 Comparaison avec le béton de granulats naturels**

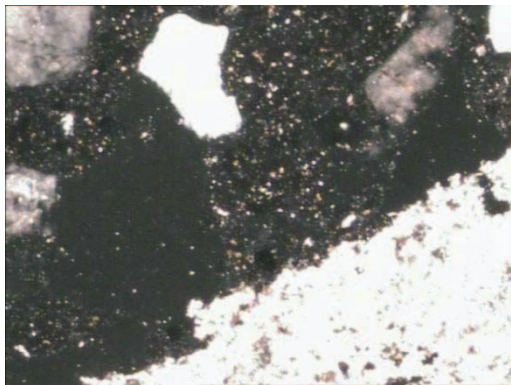
Il existe une zone faible d'interface sensible entre les granulats du béton de granulats recyclés à hautes performances et le nouveau ciment sec, pour les photos polarisantes concernant l'interface granulats naturels de résistance différente-nouvelle ciment sec, veuillez voir les images.



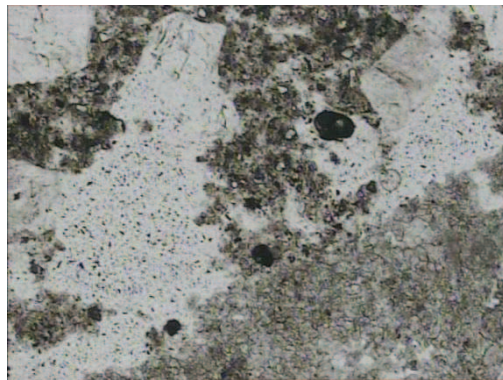
(a) C45-1-1 (50+)



(b) C45-1-1 (50-)



(c) C50-1-1 (50+)



(d) C50-1-1 (50-)

Il y a également les défauts tels que les trous dans la zone de transition de l'interface granulats du béton de granulats naturels à hautes performances - nouvelle ciment sec. Par la comparaison générale, on constate que la base de ciment sec à l'intérieur de ces granulats et ciment sec est compacte, mais il y a une zone de transition d'interface entre les granulats et la nouvelle ciment sec, la combinaison de la plupart des interfaces granulats-nouvelle ciment sec est étroite, mais certaines zones de transition d'interface a les défauts sensibles tels que les trous, cette zone est une zone faible d'interface sensible, et la structure d'interface du béton de granulats recyclés est plus compliquée que celle du béton de granulats naturels, le béton de granulats recyclés non complètement décapé comporte une double interface : interface granulat naturel original-ancienne ciment sec, interface nouvelle ciment sec-ancienne ciment sec, où la combinaison de l'interface nouvelle ciment sec-ancienne est étroite.

### **3.2.4 Conclusion**

1, Selon l'observation par le microscope polarisant, le béton de granulats recyclés non complètement décapé comporte une double interface : interface granulat naturel original-ancienne ciment sec, interface nouvelle ciment sec-ancienne ciment sec, où la combinaison de l'interface nouvelle ciment sec-ancienne est étroite. Dans le béton de granulats recyclés, il existe plusieurs interfaces, soient l'interface granulat naturel original-ancienne ciment sec, l'interface nouvelle ciment sec-ancienne ciment sec et l'interface granulat-nouvelle ciment sec.

2, La situation du béton de granulats recyclés à hautes performances est identique à celle du béton de granulats naturels à hautes performances, l'intérieur de la base de ciment sec est compact, mais il y a une zone de transition d'interface entre les granulats et le nouveau ciment sec, où existe les défauts tels que les trous qui forment une zone faible d'interface.

## **3.3 Aspect de la microstructure du béton de granulats recyclés à hautes performances dans la microscopie électronique à balayage**

### **3.3.1 Appareils d'essais**

Selon le principe d'imagerie de la microscopie électronique à balayage qui est similaire à celui de l'affichage de la caméra de télévision, c'est-à-dire moduler l'imagerie par les signaux physiques émis lors de l'exploration du faisceau électronique de concentration fine sur la surface de l'échantillon. Comme le cadre visuel de la microscopie électronique à balayage est plus grand que celui du microscope optique, on peut donc utiliser celui-là pour l'analyse microscopique de cassure. En observant la cassure par la microscopie électronique à balayage, la fabrication d'échantillon est simple et pratique, on peut réaliser directement l'observation continue de multipoint, la microscopie électronique à balayage est donc utilisée souvent pour effectuer l'analyse sur la microstructure du béton. Par l'image

SEM, on peut observer l'état compact du coulis de ciment, la taille et la forme des trous, la forme structurelle des produits d'hydratation, l'état de combinaison d'interface des granulats, ainsi que les catégories des mélanges et matériaux d'apport, afin de présenter des références pour déterminer la qualité du béton par la voie microcosmique. L'appareil adopté pour cet essai est la microscopie électronique à balayage à vide faible (SEM) JSM-5610LV, la résolution de SEM est de 3,5nm, et sa tension accélératrice est de 20kV.

### **3.3.2 Fabrication d'échantillon**

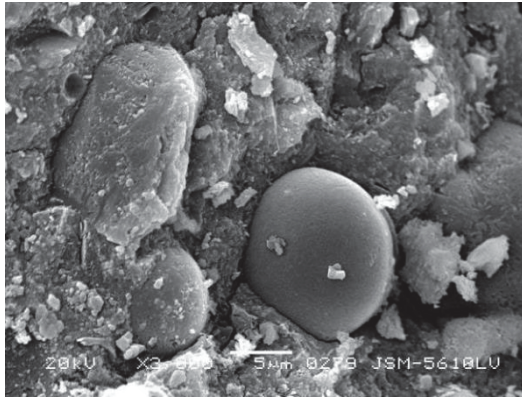
Après 28 jours de cure standard, il faut prendre les substances mères des bétons de granulats recyclés à hautes performances et de granulats naturels à hautes performances qui sont fabriqués selon la proportion indiquée dans l'article 2, et les laisser statiquement dans l'environnement naturel pour 32 jours, et puis, couper et prendre facultativement de petits morceaux de béton dans le laboratoire, et macérer ces morceaux dans l'alcool absolu jusqu'à la fin de l'hydratation, en suite, sécher à température 60°C ces morceaux jusqu'au poids constant, il faut sélectionner autant que possible les morceaux de béton qui se trouvent dans l'endroit où se rencontrent le coulis de ciment et les granulats du béton, et plier le morceau en petit bloc d'environ 1cm<sup>3</sup>, enduire le profil frais de membrane, puis observer le morceau de béton en le mettant sous la microscopie électronique à balayage à vide faible (SEM) JSM-5610LV.

### **Résultat d'essai**

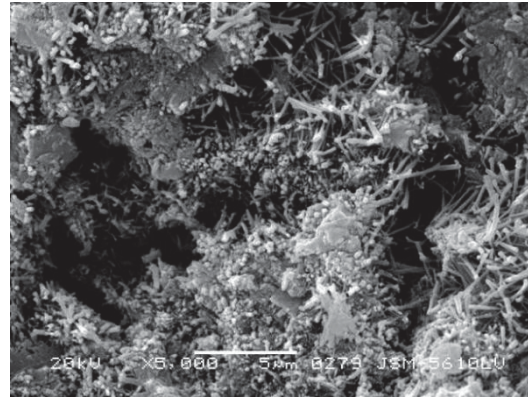
#### **1, Microstructure du ciment sec**

##### **1) Micro aspect de la base de ciment sec du béton de granulats recyclés**

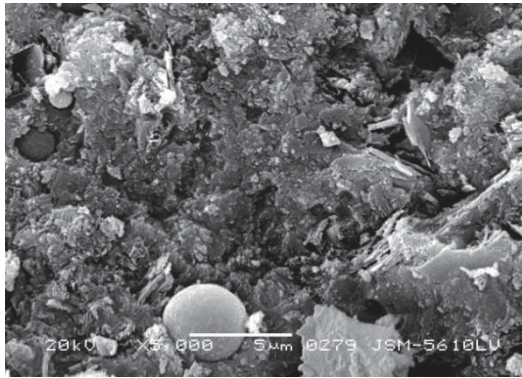
Le microaspect de ciment sec du béton de granulats recyclés à hautes performances observé par la microscopie électronique à balayage est figuré dans les images de SEM ci-dessous



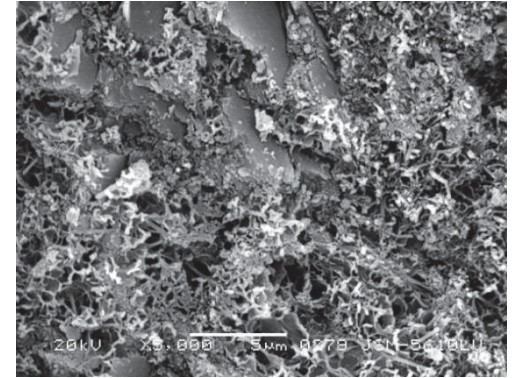
(a) C35-2-1(3000x)



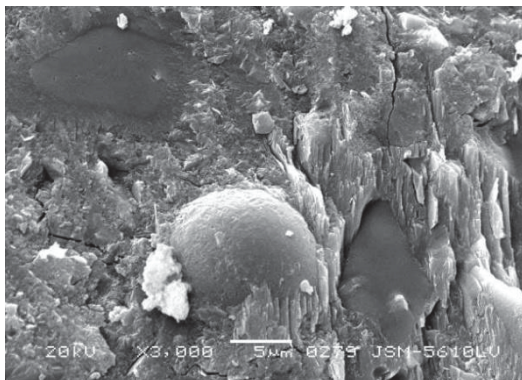
(b) C35-2-2(5000x)



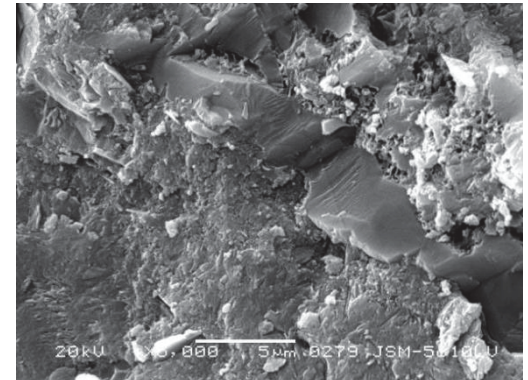
(c) C45-2-1(5000x)



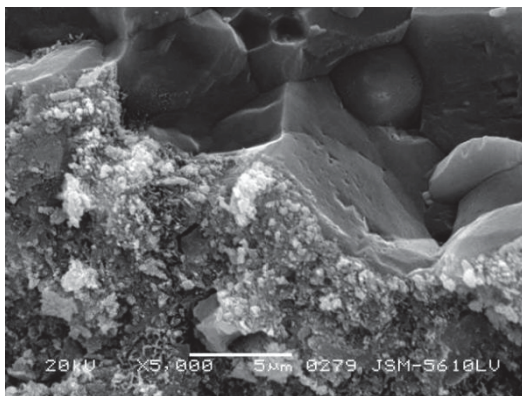
(d) C45-2-2(5000x)



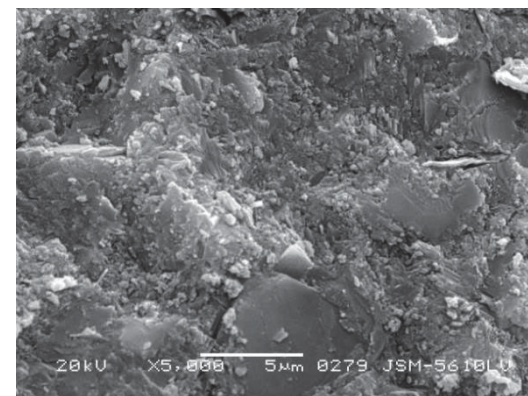
(e) C50-2-1(3000x)



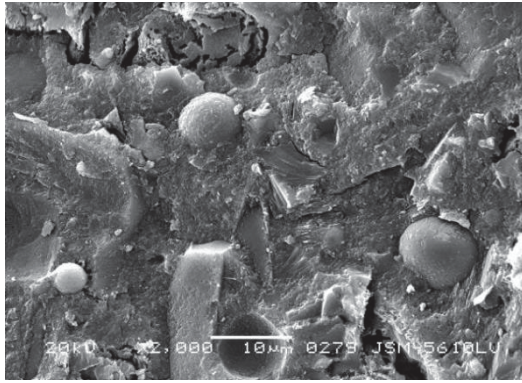
(f) C50-2-2(5000x)



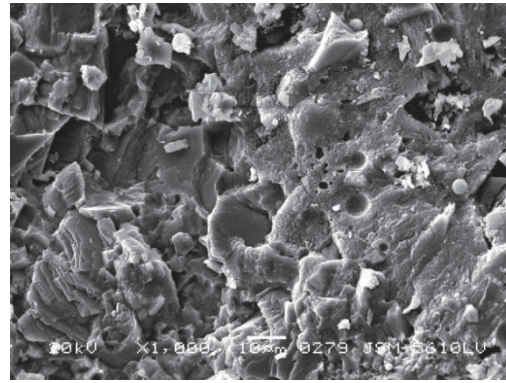
(g) C55-2-1(5000x)



(h) C55-2-2(5000x)



(i) C60-2-1(2000x)



(j) C60-2-2(1000x)

Dans l'image (a-j), on ne trouve pas de poutre de laitier, cela montre que la poudre de laitier a déjà complètement réagi avec le ciment à cause de l'âge long d'hydratation dont les hydrates sont remplis dans la base de ciment sec qui permettent à l'ensemble de la base de ciment sec du béton de granulats recyclés d'être plus compacte. L'image a et l'image c montrent que la surface de certains grains de cendre volante est lisse en se présentant le corps vitré demi-transparent de forme sphérique, cela prouve que les grains de cendre volante lisses à grande taille ne participent pas quasiment à la réaction, les grains de cendre volante de grande taille non réaction sont remplis dans les hydrates qui s'entrelacent avec ceux-ci en diminuant les pores de la base de ciment sec.

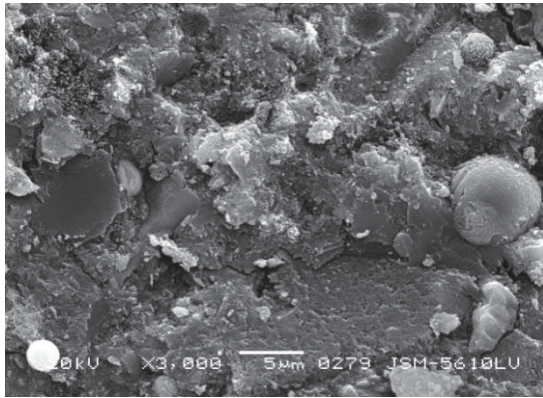
Selon l'image b et d, les hydrates du ciment sont principalement les woodfordites herborisés et les gélatines en silicate de calcium hydraté réticulaires et coralliformes. Mais, comme les images a, e et i montrent que la surface de la plupart des grains de cendre volante sont enveloppée par certains hydrates, cela prouve que la surface du gain de centre volante a déjà participé à la réaction d'hydratation secondaire du ciment en produisant les silicate de calcium et aluminat de calcium hydratés qui enveloppent les granulats et se remplissent les pores entre les granulats et ciment sec, cela améliore la compacité entre les granulats et ciment sec, en outre, ils absorbent une partie des hydrates de ciment  $\text{Ca(OH)}_2$  en raison de la réaction d'hydratation secondaire de la cendre volante, qui effectue «l'affinage de grain» et «l'affinage de taille». En outre, selon l'image e, on peut observer que, pour le béton de granulats recyclés à hautes performances, avant la mise en charge, il existe déjà une petite quantité de fissures à l'intérieur de la base de ciment sec, mais les images

i et j montrent que l'intérieur de ciment sec du béton à haute résistance et à hautes performances C60 est plus compact que celui des bétons des autres niveaux de résistance, pour qui, on ne peut pas distinguer d'autres hydrates, excepté certains grains de cendre volante remplis entre les hydrates.

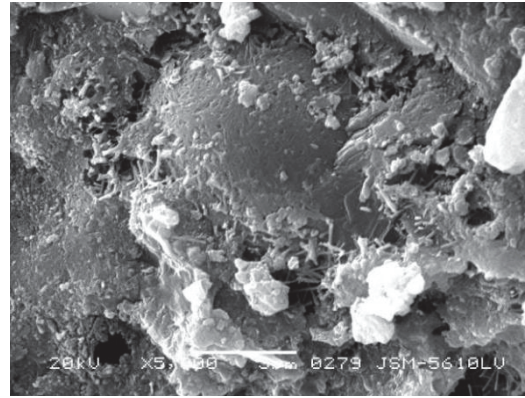
Selon l'image, on peut savoir que l'ensemble de la base de ciment sec est compact, et des cristaux lamelleux  $\text{Ca(OH)}_2$  n'apparaissent pas dans la base de ciment sec. C'est parce que l'âge de l'échantillon du béton de granulats recyclés à hautes performances observé est long dont la durée de la cure standard et de la cure naturelle a déjà atteint 60 jours, l'hydratation du ciment est déjà complète, le développement des hydrates du ciment est bon, on peut voir encore une petite quantité des grains sphériques de cendre volante de différentes tailles non réactionnés qui sont remplis entre les hydrates du ciment. Donc, en analysant l'image SEM, on peut savoir que les bases de ciment des bétons de granulats recyclés sont compactes, de plus, avec l'augmentation de résistance et d'âge, l'hydratation du ciment et l'hydratation secondaire des cendres volantes et laitiers seront de plus en plus suffisantes, et la base de ciment sec sera plus compacte qui présentera une forme de plaque.

## **2) Aspect de la microstructure de la base de ciment sec du béton de granulats naturels**

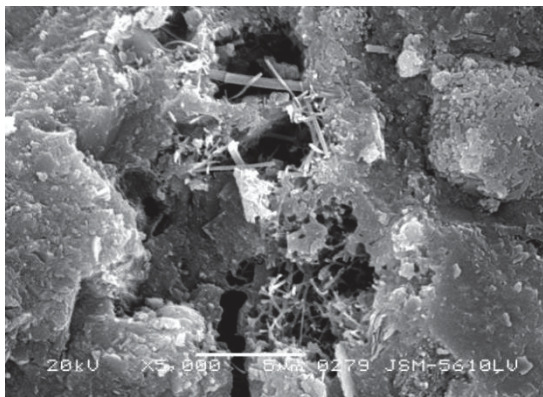
La photo SEM concernant l'aspect de ciment sec du béton de granulats naturels à grande performance observé par la microscopie électronique à balayage est figurée dans l'image 3-9. Selon les images a, b et d, on peut voir que, la cendre volante est en forme sphérique semi-transparente, la surface de certaines cendres volantes est enveloppée par certains hydrates, cela prouve que la surface de ces cendres volantes a déjà participé à la réaction d'hydratation secondaire ; la surface de certaines cendres volantes est lisse qui n'a pas fondamentalement participé à la réaction, ces grains de cendre volante non réactionnés et ceux réactionnés sont remplis entre les hydrates du ciment. L'image c montre qu'il existe encore certains pores à l'intérieur de la base de ciment sec où remplis par certains produits de silicate de calcium hydraté.



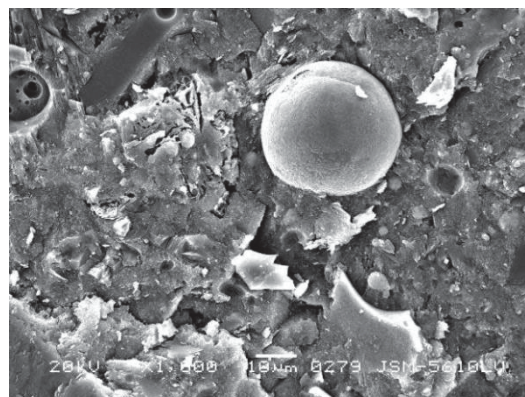
(a) C45-1-1 (3000x)



(b) C50-1-1 (5000x)



(c) C55-1-1 (5000x)



(d) C60-1-1 (1000x)

### 3) Comparaison des aspects de microstructure des bases de ciment sec

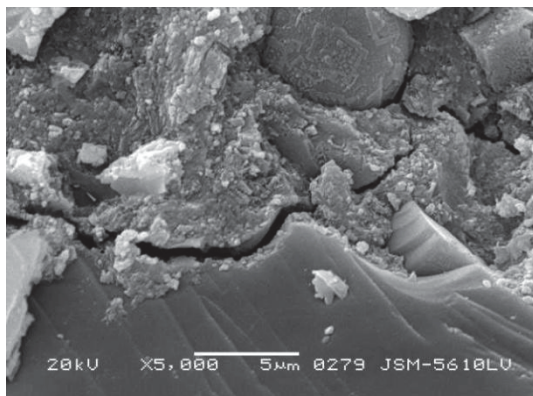
En comparant la photo SEM concernant l'aspect de ciment sec du béton de granulats naturels à hautes performances avec celle du béton de granulats recyclés à hautes performances, on peut constater que la base de ciment sec de ces deux bétons présente la caractéristique d'aspect de microstructure similaire, et des cristaux aciculaires  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  n'apparaissent pas dans toute la base de ciment sec. L'ensemble de la base de ciment sec est compact qui présente une forme de plaque. Les hydrates du ciment sont principalement les woodfordites herborisés et les gélatines en silicate de calcium de diverses formes, en même temps, on peut voir certaines cendres volantes sphériques semi-transparentes non réactionnées et les grains de cendre volante dont la surface a participé à la réaction d'hydratation qui ont été remplis entre les hydrates du ciment, de plus, au fur et à mesure de l'augmentation de résistance et d'âge, l'hydratation du ciment et l'hydratation secondaire des cendres volantes et laitiers seront de plus en plus suffisantes, et la base de ciment sec sera



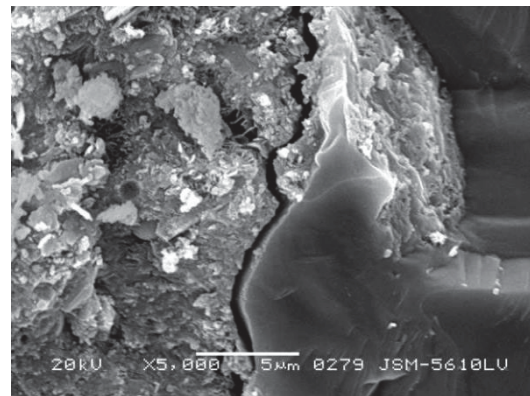
plus compacte.

### 3.3.3 Microstructure de l'interface des granulats et ciment sec

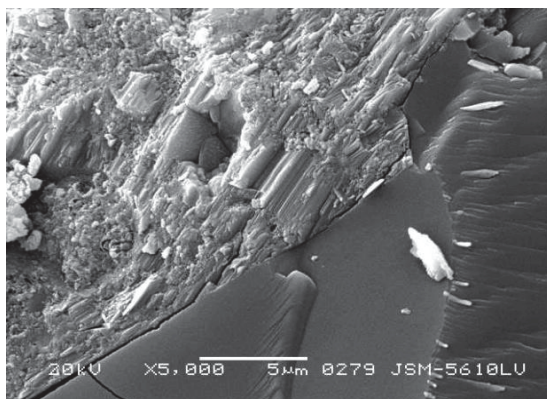
1) La photo SEM concernant la microstructure de l'interface granulat-ciment sec du béton de granulats recyclés à hautes performances



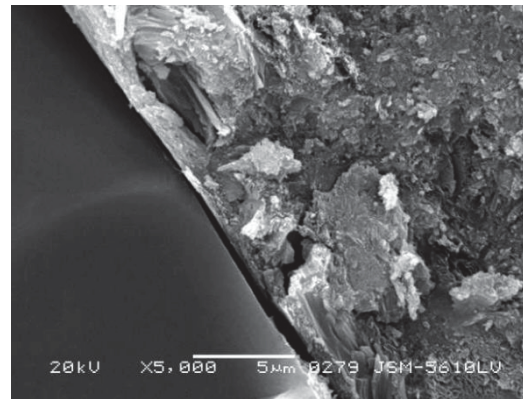
(a) C35-2-1 (5000x)



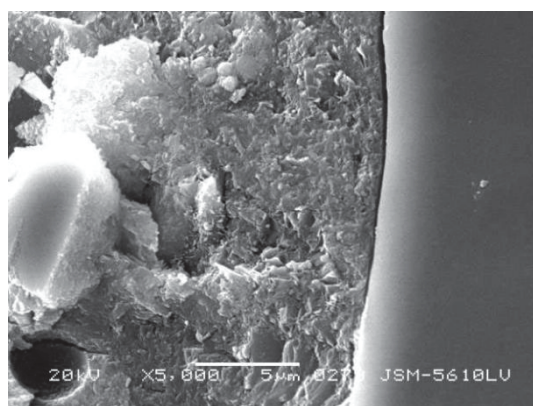
(b) C45-2-1 (5000x)



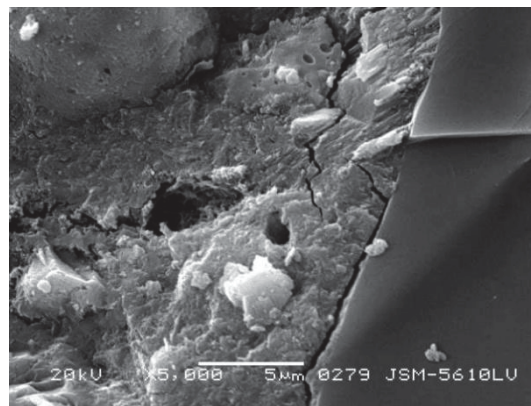
(c) C50-2-1 (5000x)



(d) C55-2-1 (5000x)



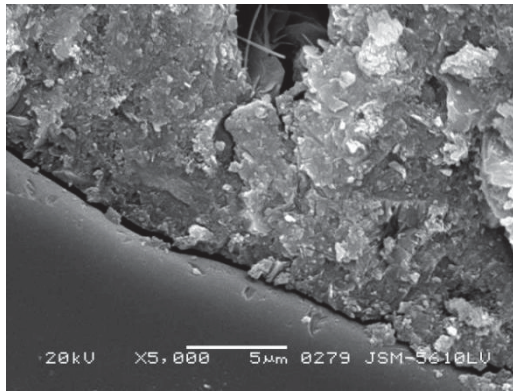
(e) C60-2-1 (5000x)



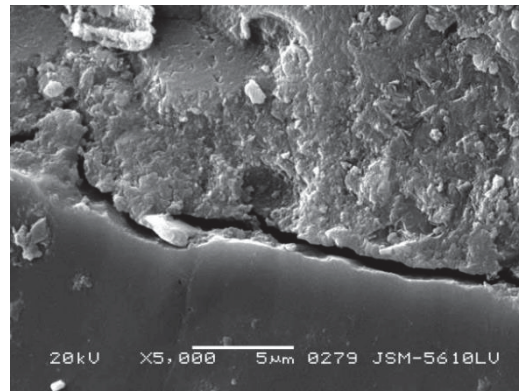
(f) C60-2-2 (5000x)

Selon les images a, c et f, pour le béton de granulats recyclés, avant la mise en charge, il existe déjà des microfissures au droit de l'interface entre les granulats recyclés et la base de nouvelle ciment sec, et ces fissures se développent souvent le long de la bordure de granulat, vers la base de ciment sec. L'image c montre que, il y a encore certains cristaux aciculaires  $\text{Ca(OH)}_2$  dans la zone de transition de cette interface, où la structure est lâche. Selon lesdites images, on arrive à la conclusion qu'il existe une interface sensible entre les granulats recyclés et la base de nouvelle ciment sec et il y a une zone de transition d'interface ; comme l'âge d'hydratation est long, les hydrates réalisés par la réaction d'hydratation du ciment et la réaction d'hydratation secondaire des cendres volantes et laitiers sont remplis dans la zone de transition d'interface, la concentration et le rangement orienté des grains  $\text{Ca(OH)}_2$  n'apparaissent que dans peu de zones de transition d'interface où la caractéristique n'est pas sensible, de plus, avec l'élévation de résistance, l'adhérence entre les granulats-ciment sec du béton de granulats recyclés à hautes performances sera plus compacte, la zone de transition d'interface sera plus compacte et la caractéristique de sa zone faible d'interface faiblira.

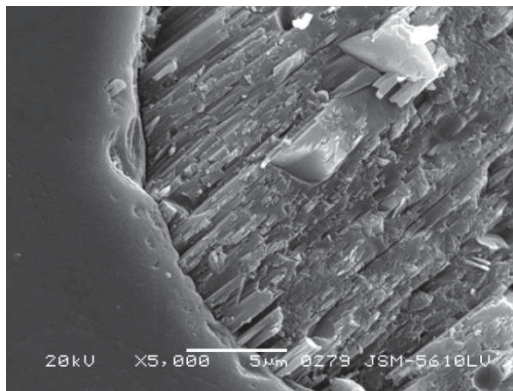
**2) La photo SEM concernant la microstructure de l'interface granulat-ciment sec du béton de granulats naturels à hautes performances**



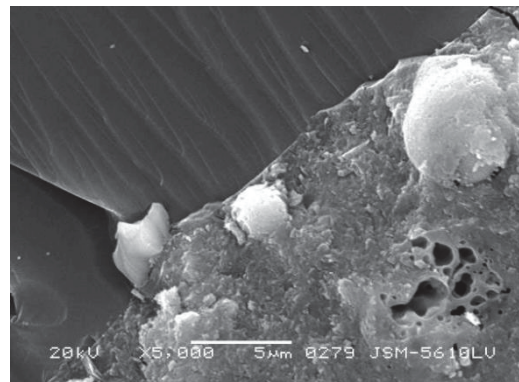
(a) C45-1-1 (5000x)



(b) C50-1-1 (5000x)



(c) C55-1-1 (5000x)



(d) C60-1-1 (5000x)

Selon les images a-d, la microstructure de l'interface granulat-ciment sec du béton de granulats naturels à hautes performances présente une caractéristique similaire à celle du béton de granulats recyclés, il existe une interface sensible entre les granulats et la base de ciment sec dont l'adhérence de la jonction d'interface est faible ; et l'image c montre que la concentration et le rangement orienté de nombreux de cristaux aciculaires  $\text{Ca(OH)}_2$  apparaissent encore dans cette zone de transition d'interface, ainsi que certains pores ou trous, où la structure est lâche. Mais, à tout prendre, comme l'âge d'hydratation est long, les zones de transition d'interface des bétons de granulats naturels à hautes performances sont compactes.

### 3) Comparaison de la microstructure entre granulats et ciment sec

En comparant la photo SEM concernant l'aspect de ciment sec du béton de granulats naturels à grandes performances observé par la microscopie électronique à balayage avec celle du béton de granulats recyclés à hautes performances, on peut constater que la base de ciment sec de ces deux bétons présente la caractéristique d'aspect de microstructure similaire, et il existe une zone de transition d'interface entre les

granulats et des ciments sec, la concentration et le rangement orienté des cristaux  $\text{Ca(OH)}_2$  apparaissent dans cette zone, il y existe encore des pores ou trous, où la structure est lâche. Et avant la mise en charge du béton, il existe déjà certaines fissures sur l'interface granulats-ciment sec qui apparaissent au début au droit de cette interface et se développe le long de la surface de granulat, vers la base de ciment sec, mais le nombre de fissures du béton de granulats recyclés à hautes performances est sensiblement plus que celui du béton de granulats naturels à hautes performances, c'est principalement parce que les dommages des granulats recyclés produits pendant la fabrication de concassage ont causé certaines fissures sur la surface de granulat. En même temps, on peut voir certaines cendres volantes sphériques semi-transparentes non réfractionnes et les grains de cendre volante dont la surface a participé à la réaction d'hydratation qui ont été remplis entre les hydrates du ciment, qui s'entrelacent avec eux, de plus, au fur et à mesure de l'augmentation de résistance et d'âge, l'hydratation du ciment et l'hydratation secondaire des cendres volantes et laitiers seront de plus en plus suffisantes, le rangement orienté des grains  $\text{Ca(OH)}_2$  faiblira, et la compacité de la zone de transition d'interface sera améliorée.

### **3.3.4 Conclusion**

1. Selon l'image SEM prise par la microscopie électronique à balayage, on peut trouver des grains de cendre volante remplis entre les hydrates qui réduisent la porosité de la base de ciment sec et améliore la structure des pores de celle-ci. En outre, comme l'âge d'hydratation a déjà atteint 60 jours, on peut seulement constater les hydrates composés des substances géli-formes, sauf une petite quantité des ettringites, hydrates en silicate de calcium et certains grains de cendre volante remplis dans les pores, même si dans l'image SEM à l'échelle de 5000 fois, on ne peut voir que peu de pores et trous, l'ensemble du ciment sec est compact.
2. Lors de l'essai à l'aide de la microscopie électronique à balayage, la situation du béton de granulats recyclés à hautes performances se trouve identique à celle du béton de granulats naturels à hautes performances, il existe aussi une zone de transition d'interface entre les granulats recyclés et la base de nouvelle ciment sec,

et avant la mise en charge du béton de granulats recyclés à hautes performances, il existe déjà certaines fissures sur l'interface granulats recyclés-ciment sec qui apparaissent au début au droit de cette interface et se développe probablement de cette zone vers l'intérieur de la base du ciment sec, le nombre de fissures du béton de granulats recyclés à hautes performances est sensiblement plus que celui du béton de granulats naturels à hautes performances. La concentration et le rangement orienté des cristaux aciculaires  $\text{Ca(OH)}_2$  apparaissent dans la zone de transition d'interface, il y a également certains pores ou trous dans cette zone, en conséquence, la structure de cette zone est relativement lâche par rapport à la base de ciment sec. La compacité fine a été beaucoup améliorée grâce à l'addition des matières minérales très fines telles que les cendres volantes et les laitiers. C'est principalement parce que la taille des grains  $\text{Ca(OH)}_2$  des poudres de laitier broyées a été réduite par la réaction de cendres volcaniques, en réduisant la concentration des grains  $\text{Ca(OH)}_2$  dans les granulats-ciment sec, de plus, l'hydratation secondaire de la cendre volante augmente des gélatures C-S-H et diminue des mauvais composants tels que  $\text{Ca(OH)}_2$ , afin de faiblir la phénomène polycristalline et poreuse dans la zone de transition de l'interface du béton de granulats recyclés, en beaucoup éliminant le déséquilibre de cette zone de transition d'interface[3], la compacité de la zone de transition d'interface a été donc améliorée, de ce fait, la structure et la performance de la zone de transition de l'interface granulats-ciment sec ont été efficacement améliorées.

3. Avec l'élévation de résistance et l'augmentation de l'âge d'hydratation, la combinaison des granulats recyclés avec la base de ciment sec dans le béton de granulats recyclés à hautes performances est de plus en plus étroite, la base de ciment sec est de plus en plus compacte, notamment pour le béton de granulats recyclés C60. Lors de l'addition des cendres volantes et laitiers, on additionne également des poudres de silice, comme le diamètre moyen de la poudre de silice est de  $0,10\sim 0,26\mu\text{m}$  qui est inférieur d'un ordre de grandeur que celui des laitiers et cendres volantes extra-fines, on peut donc remplir les poudres de silice entre les grains des laitiers et cendres volantes extra-fines, afin d'améliorer davantage la compacité de la zone de transition d'interface et élever davantage la résistanc

## Références bibliographiques

- [1] Tavakoli M, Soroushain P. strength of recycled aggregate concrete made using filed-demolished concrete as aggregate. ACI Materials Journal, 1996, 93(2): 182-190
- [2] SHI Yiquan, FAN Zhengqi, SHU ZHI FEN XI FANG FA (Méthode d'analyse numérique), Shanghai Cai Jing publishing company.
- [3] CHEN Yungang, SUN Zhenping, XIAO Jianzhuang, Caractéristiques du Béton recyclé. 2004, (2) : 10-13
- [4] Hansen Torben C., Narud Henrik Recycled concrete and fly ash make calium silicate bricks. Cement and concrete Research, 1983, 13(4): 507-510