

Dégradations des poutres en béton armé atteint de l'Alcali Agrégat Réaction AAR étudiées par la Méthode statistique de l'Analyse en Composantes Principales ACP

Degradations of reinforced concrete beams affected by Alkali Aggregate Reaction AAR studied by the Principal Component Analysis's statistical method PCA

Fouzia Bouabdallah^{*1,3}, Houria Kherici-Bousnoubra², Mohamed Fouzi Habita³, Amel
Djedaoune² & Nadjette Rehamnia³

¹Département de Génie Civil, Faculté des Sciences et Sciences appliquées, Université Larbi Ben
M'hidi, BP 358, Oum El Bouaghi, Algérie.

²Laboratoire Sol et hydraulique, Département d'Hydraulique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur,
Université Badji Mokhtar, BP 12, Annaba, 23000, Algérie.

³Laboratoire Génie Civil (LGC), Département de Génie Civil, Faculté des Sciences de l'Ingénieur,
Université Badji Mokhtar, BP 12, Annaba, 23000, Algérie.

Soumis le 21/12/2016

Révisé le : 06/03/2017

Accepté le : 04/07/2017

المخلص

وفي خضم هذا السياق يندرج بحثنا هذا حول استكشاف هذه الأضرار في الخرسانة المسلحة عند اصابتها بتفاعل (ت.ق.ر) مع مرور الزمن. وفي غضون ستة أشهر من التجريب المخبري؛ أخذت 58 عينة ركام (كلسي) من عوارض خرسانية مسلحة (أ، ب) تمثل ثلاث حالات مختلفة للركام: خام (عند اقتنائه)، متماسك في الخرسانة المسلحة (الركام - الإسمنت و الركام متفاعل - الإسمنت). وعلى امتداد طولي لهذه العوارض (أ، ب)، سجلنا ظهور ثلاث بقع ملونة (أ، ب، ج) موزعة شاقوليا على تسعة محاور. نتائج التحاليل الكيميائية للفحص بالإشعاع X عولجت بطريقة (تحليل المكونات الأساسية ت.م.أ). خلصنا إلى أن العوارض المرجعية حافظت على سلامتها بينما نظيرتها المصابة بتفاعل (ت.ق.ر) أظهرت أضرار مرتبطة بالجانب الفيزيائي - الكيميائي وكذا الميكانيكي.

الكلمات المفتاحية: خرسانة مسلحة - قلوي - ركام - تفاعل - ت.م.أ

Résumé

La présente étude, porte sur la détection des dommages au cours du temps dans le béton armé affecté par l'AAR. Après six mois d'essai, 58 échantillons d'agrégats (calcaire) prélevés des poutres en béton armé (A et B) présentent trois états d'agrégats différents: commercialisés, adhérents en béton armé (agrégats-ciment et agrégat réactif-ciment). Le long de ces poutres (A et B), trois zones de décoloration illustraient (a, b et c) sur neuf axes verticaux. Les résultats des analyses chimiques obtenus par l'essai de Florescence par Rayon X (FRX) sont traités par la méthode de l'Analyse en Composantes Principales (ACP). Il ressort alors que la poutre témoin conserve son aspect normal, or la poutre atteinte de l'AAR présente des dommages corrélés aux aspects physico-chimique et mécanique.

Mot clés : Béton armé – Alcali – Agrégat– Réaction– ACP

Abstract

The present study is about the damage detection over time in the reinforced concrete affected by the AAR. After six months of testing, 58 aggregate samples (limestone) were taken from the reinforced concrete beams (A and B) present three different aggregate states: commercialized, adhered in the reinforced concrete (aggregate-cement and reacting aggregate-cement). Along of these beams (A and B), three discoloration zones appeared (a, b and c) on nine vertical axes. The chemical analyses' results obtained by X-Ray Fluorescence test XRF are treated with the Principal Component Analysis method (PCA). While it stands out the reference beam keeps a normal aspect, but the beam affected by AAR exhibits damage correlated to the physical, chemical and mechanical aspects.

Words: reinforced concrete– Alkali– Aggregate– Reaction– PCA

* Auteur correspondant : bouabdallah23000@gmail.com

1. INTRODUCTION

Actuellement, dans le domaine des constructions de génie civil, la plus connue des pathologies dans le monde est l'Alcali Agrégat Réaction (AAR). C'est une réaction chimique dans le béton entre ses granulats réactifs et le milieu sur-alcalinisé ($\text{pH} > 13$) en présence d'un taux hygrométrique et température élevés ($\text{HR} > 85\%$, $T > 20\text{ }^\circ\text{C}$). Des dégradations physico-mécaniques nuisibles atteignent ce matériau avec: un gel solide détruisant, décoloration, pustule, expansion, fissurations diverses...etc. L'AAR présente une dangereuse pathologie qui menace la durabilité des structures de génie civil, exposées à une humidité et température importantes voire même moyenne. Ce matériau perd ses caractéristiques entre quelques mois, ou quelques années selon l'accélération de ces réactions chimiques. Des symptômes pathologiques apparaissent aux parements de ces ouvrages massifs en béton. Ces dommages influent sur les propriétés mécaniques qui changent au fur et à mesure en fonction des conditions favorables à cette anomalie AAR tel que : les alcalins, la réactivité granulaire, l'eau, la température, certains ajouts, ...etc. [1]. Les symptômes de ce problème chimique ne se manifestent pas tous au même temps, ni avec le même degré d'agressivité. Cela revient essentiellement aux composants chimiques internes qui participent à la création et au déroulement de l'AAR au niveau de la microstructure. Surtout que les auteurs comme Hadley, Calgaro, Fournier, Bérubé, et Katayama classent l'AAR en trois types selon l'agrégat réactif (silice, silicates et dolomie). [2,3 4, 5]. Dans ce domaine, des tests sont élaborés sur des éprouvettes en béton et mortier, pour la vérification de la potentialité de la réactivité (Alcali- Granulat). Ils sont jusqu'à présent en cours de standardisation, ils sont également envisagés pour maintenir les conceptions réalisées loin des attaques alcalines. Ces normes sont inspirées les unes des autres, les plus importants sont les normes : américaine ASTM, canadienne CSA, britannique BS, Africaine (Afrique du Sur) NBRI et française AFNOR. L'Algérie procède une norme NA basé totalement sur AFNOR.

Les essais se différencient en fonction du type de la caractéristique étudiée, pour l'aspect physique on ne trouve que le changement de longueur qui est testé. La décoloration, les fissurations et leurs formes (orientation, profondeur ...), les pustules, le décollement des granulats, oxydation, ainsi que les divers symptômes d'altération sont plus ou moins loin d'être testés, bien entendu on ne distingue que de simples moyens de contrôle comme la photographie, endoscopie, radiographie (par rayon X), gammagraphie, potentiel électrique et magnétique, photogrammétrie (l'infrarouge), photographie, radar...etc. [6]. Mécaniquement, le test approprié à la réactivité potentielle des granulats se fait au moyen d'essai destructif ou non destructif et en tenant compte aux conditions du terrain où la structure est implantée. On cite l'essai non destructif in situ ultrasonore AFNOR NF P18-414 (1993), ASTM C 597-83, et celui destructif ou essai d'écrasement pour les matériaux durs, test sur des carottes et éprouvettes en béton et mortier comme [9]: ASTM C 78-02 [7], ACNOR A23.2-9C [8], ACNOR A23.2-8C [9], AFNOR P18-407 [10] et AFNOR P18-406 [11]...etc. En outre physiquement, la détection de la réactivité est essentiellement basée sur les variations de la longueur des spécimens dont la durée des essais est plus ou moins longue. Par ailleurs, elle fait l'objet des nouveaux travaux de recherche internationalement. Les tests sur mortier en autoclave (de 72 heures sur des barres de mortiers $4 \times 4 \times 16$ cm) sont actuellement les plus accélérés. Pour le béton, les essais les plus longs sont ceux qui demeurent plusieurs semaines comme l'essai « CSA A23.2-14 sur des prismes $7,5 \times 7,5 \times 28,5$ cm [12], AFNOR P18-587 sur des prismes $7 \times 7 \times 28$ cm [13, 14]. Chimiquement, l'examen pétrographique selon la norme Européenne EN 12407 est un essai qui fait partie des tests performant puisqu'il entame l'identification de la microstructure. Il a pour objectif d'identifier également la phase minérale des granulats dans les bétons des ouvrages déjà existants [1]. En réalité le test pétrographique, décrit les moyens à utiliser dans le protocole expérimental mais sans détailler la méthode d'analyse des résultats. Il est à son tour très limité vu la complexité et la diversité des altérations au niveau des granulats et aux roches en général, ainsi l'effet incontrôlable des conditions favorables à l'AAR. Dans cet article on fait appel à une ancienne méthode statistique (ACP) mais qui est rarement utilisé au domaine du génie civil pour le traitement des résultats de l'essai FRX qui est la partie essentielle de l'essai pétrographique.

2. MATERIELS ET METHODES

Pour simuler réellement des éléments structuraux atteints de l'AAR dans un ouvrage d'art, des modèles réduits « Poutres de $120 \times 20 \times 15$ cm » en béton armé alcali réactif sont utilisés. Les

matériaux utilisés pour la confection du béton armé sont locaux avec un degré élevé de la réactivité alcaline. L'endommagement dû à l'AAR est traité selon les aspects : physico-chimique et mécanique. Afin de simuler expérimentalement ce genre de symptômes pathologiques dans le matériau béton armé, des normes internationales en cours de standardisation sont respectées ASTM, ACNOR et AFNOR. L'accélération de l'AAR dans des conditions favorables est réalisée au laboratoire du département du génie civil d'UBMA, l'analyse chimique est établie par l'essai FRX au laboratoire de la cimenterie d'Hadjar-Essoud/ Skikda. Par la suite l'interprétation des résultats et des données est traitée par l'ACP.

2.1 Expérimentation

2.1.1 Matériaux

Le ciment utilisé pour ce travail de recherche est un CPJ ciment portland 42.5 MPa. Il est produit par la cimenterie d'Hadjar-Essoud de la wilaya de Skikda (Nord-est de l'Algérie). Le produit est conforme aux exigences des normes AFNOR, ASTM et ACNOR (CEM II-A) (Tab.1).

Tab.1 : Fiche technique du ciment CPJ 42,5 utilisé pour la confection des bétons dosés à 350 kg/m³.

Caractéristiques chimiques		Caractéristiques physiques		Caractéristiques mécaniques
Éléments selon AFNOR 15-467	Masse (%)	Caractéristiques Taux		Contrainte en (MPa)
PAF 975°C	1-2	Consistance normale	≥ 25	<u>Compression</u>
CaO	55-65	Début de prise	≥ 60	2 jours ≥12,5
SiO ₂	22-28	Fin de prise	150-250	7 jours 25-35
Al ₂ O ₃	5-6	Expansion à chaux	≤ 10 mm	28 jours 42,5-52,5
Fe ₂ O ₃	3-3,6	S.S Blaine cm ² /g	3300-4000	<u>Flexion</u>
MgO	1-2	Retrait sur mortier μm/m	≤ 1000	2 jours 3,0-4,0
<u>K₂O</u>	<u>0,3-0,6</u>			7 jours 5,0-6,5
<u>Na₂O</u>	<u>0,1-0,16</u>			28 jours 6,5-8,5
SO ₃	1,8-2,5	<u>Composition potentielle (%)</u>	<u>Constituants (%)</u>	
CaOL	0,8-1,8	C ₃ S 55-65	Clinker ≥ 74	
CL ⁻	0-0,01	C ₂ S 10-25	Gypse 4-6	
		C ₃ A 8-12	<u>Calcaire</u> 0	
		C ₄ AF 9-13	<u>Laitier</u> ≤ 20	

Les rapports utilisés eau/ciment et ciment/agrégat pour la confection du béton sont représentés sur le tableau 3. Les sables et graviers sont pris de la carrière de (Bouhachana) dans la wilaya de Guelma (N-E Algérien). Ces agrégats locaux sont conformes aux exigences des tests ACNOR-A25 [15] et ASTM-C1260 [16]. Ces matériaux satisfaits physiquement les normes Françaises AFNOR-301 [17]; AFNOR-304 [18]; AFNOR-309 [19]; AFNOR-554 [20]; AFNOR-555 [21] et AFNOR.EN-933.2 [22]. (Fig.1 et Tab.2).

Tableau.2 : Granulats utilisés pour la confection des bétons armés A et B, dosés à 350 kg/m³

Granulats réactifs	Masse volumique absolue réelle g/cm ³	Désignation selon AFNOR
Sable 0/5	2,778	Sable 0/5 courant, naturel, concassé
Gravier (1) 5/15	3,087	Gravillon ou Gravier (1) 5/15 lourd, naturel, concassé
Gravier (2) 15/25	2,753	Gravillon ou Gravier (2) 15/25 courant, naturel, concassé

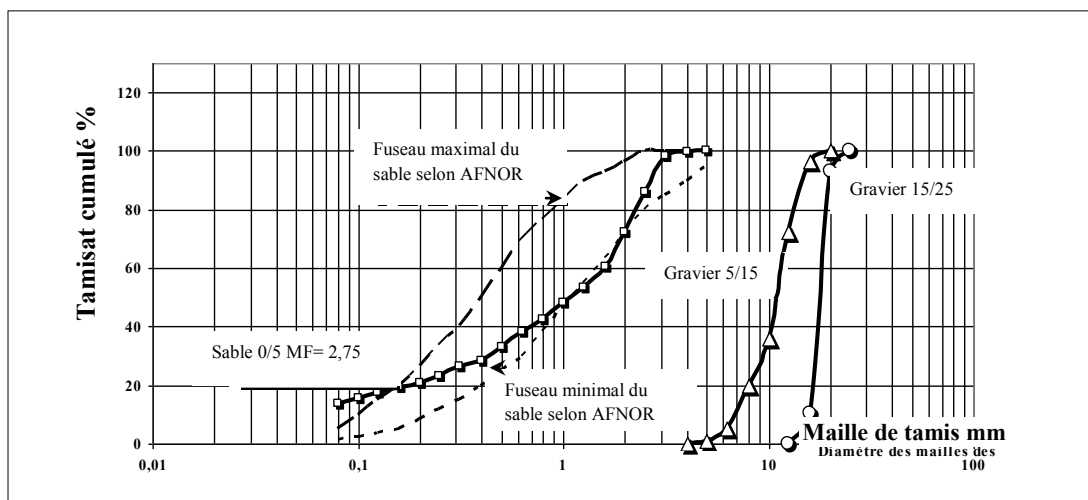


Figure.1 : Courbe granulométrique des granulats utilisés pour la confection des bétons armés (A et B) dosés à 350 kg/m³.

La composition choisie pour le dopage du béton en alcalin est une combinaison d’hydroxyde de Sodium et Potassium (NaOH et KOH) puisque le ciment utilisé ne contient que 0,3 % de Na₂O_{éq.}. Pour augmenter l’alcalinité de la matrice du béton, il est impératif d’ajouter la solution (NaOH et KOH) à l’eau de gâchage selon l’équation (1). Dans le but d’activer les réactions chimiques internes entre le granulat réactif et l’alcalin du milieu interne dans le béton [23]. L’équation d’équivalence de « la Solution alcaline activatrice » est conforme aux AFNOR-587; AFNOR-585; AFNOR-594 and ACNOR-14A:

$$Na_2O_{éq} (\%) = [Na_2O + 0,658 K_2O] (\%) \quad (1)$$

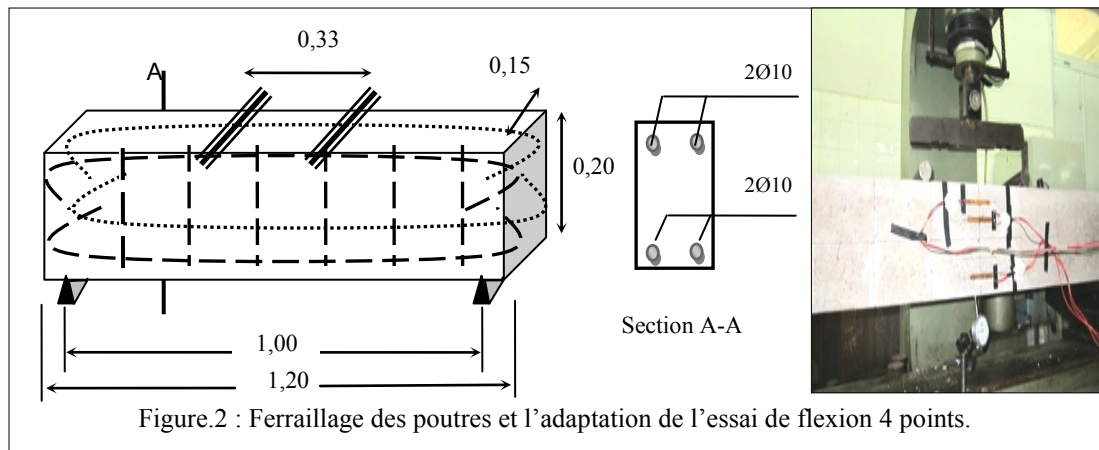
La formulation pour la confection des poutres 120 x 20 x 15 cm en bétons armés est prise de façon à simuler les attaques de la pathologie d’AAR, en accélérant les réactions chimiques de vieillissement du béton par l’utilisation des conditions parfaites au progrès de l’AAR étant de la température (T) et l’humidité (HR) [24, 25, 26, 27]. Le protocole expérimental se compose de deux types de béton armé noté (A) et (B), dont la composition choisie répond aux exigences de la méthode de Dreux Gorisse. Le béton frais est dosé à 350 kg/m³ pour les deux bétons et on note (A) béton sain sans addition en alcalins, contrairement au béton (B). L’affaissement, le coulage et démoulage sont fait conformément aux normes AFNOR-451 ou ACNOR-5 C et celui d’AFNOR-405 [28, 29, 30]. Les détails du protocole expérimental sont résumés dans le tableau 3 :

- (A): Béton armé de référence avec de taux faibles d’alcalins (0,3 % Na₂O_{éq.}, RH = 100 %; T= 20 ± 1 °C).
- (B): Béton alcali réactif avec de taux élevés d’alcalins (1,25 % Na₂O_{éq.}, RH = 100 %; T= 48 ± 2 °C).

Tableau.3 : Formulation du béton armé et les conditions de conservation des poutres 120 x 20 x 15 cm (A et B).

Composant	Sabl 0-5 kg/m ³	Gravier 5-15 kg/m ³	Gravier 15-25 kg/m ³	Béton kg/m ³	Rapport		H ₂ O L/m ³	Alcalis			Stockage	
					w/c	c/a		NaOH kg/m ³	KOH kg/m ³	Na ₂ O _{éq.} %	T° C	RH %
Béton armé A (1 poutre)	740	430	715	350	0,4	2,25 ₁	157	-	-	0,3	20	100
Béton armé B (1 poutre)	740	430	715	350	0,4	2,25 ₁	157	2,00	3,04	1,25	48	100

Le ferrailage adapté pour les deux poutres est composé de barres longitudinales 2Ø10 (HA, FeE400) pour chaque nappe supérieure et inférieure, les cadres sont Ø10 espacé e=15 cm (Fig.2).



2.1.2 Essais et appareillage

A- Investigation physique des altérations de l'AAR dans le béton armé

L'étude de la texture des parements des poutres 120 x 20 x 15 cm atteintes de l'AAR est établie essentiellement en comparant les deux bétons (A et B). Et en suivant les symptômes pathologiques, comme : les décolorations, fissurations, et la formation des mailles en faïencage pendant la conservation de ces éléments structuraux. Ensuite, on représente graphiquement après 6 mois : la fissuration par (Ouverture de fissure), le faïencage par (Nombre de mailles par surface) et la décoloration par la méthode photographique [6, 14]. Une analyse microscopique est faite au laboratoire du département de géologie à l'université d'Annaba, sur des échantillons en béton alcali réactif dégradé (type B) examinés sous microscope optique polarisant M.O.P. avec une photographie au moyen d'un appareil numérique de référence Sony - 10.1 Méga Pixels.

B- Performance mécanique

Dans cette recherche on a l'intention de sélectionner le plus forte caractéristique mécanique pour le matériau béton qui est la compression avec le test de compression jusqu'à la rupture par flexion 4 points. Les poutres sont produites selon l'essai sur matériaux durs dont le code est ASTM: C78-02 ou ACNOR-8C, cet essai est envisagé pour déterminer la résistance à la flexion d'une poutre simple en béton, à section prismatique (rectangulaire) et chargée au tiers. On l'a appliqué pour des poutres en bétons armés 120 x 20 x 15 cm, avec un chargement statique effectué par paliers de 1 kN jusqu'à la ruine au moyen d'une machine de compression de marque Weissgerber de capacité 200 tonnes (Fig.2). [31, 32]

C- Analyses chimiques

L'essai de la fluorescence par rayon X (FRX) pour le ciment est adapté selon AFNOR NF P15-467 [33]. Il est élaboré pour des échantillons prélevés (agrégat Calcaire) en trois 03 zones notées par (a, b et c) essentielles des poutres en béton armé (A, B) (Fig. 3).

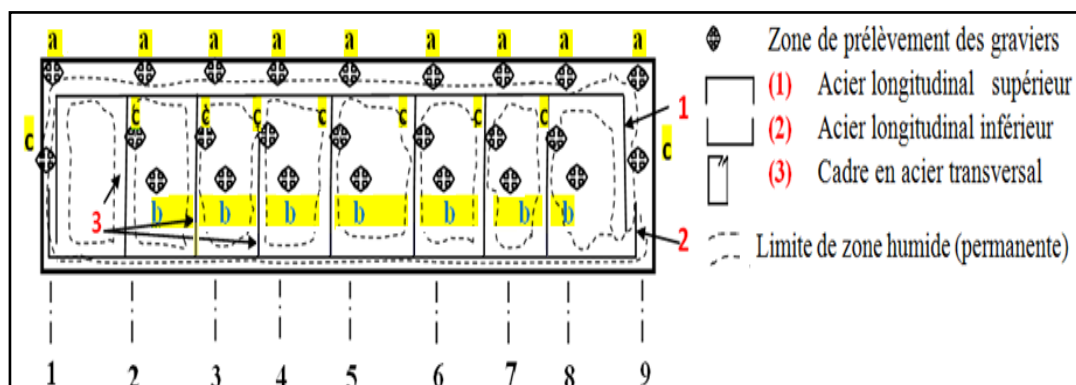


Figure.3 : Prélèvement des échantillons de graviers dans les poutres en béton armé 120x20x15 cm.

Selon le changement de couleur interne de la matrice du béton et la présence du profil hydrique en mouillage permanent le long des poutres sur neuf axes (9) transversaux équidistants :

- au niveau du mortier de la surface horizontale de moulage (supérieure) (zone a),
- au centre des cadres de confinement (acier transversal) (zone b),
- à côté des armatures (zone c).

D'autres types de matériaux sont également testés : le ciment, le granulat commercialisé et le gel résultant de l'AAR (en peau du béton B).

On distingue également pour l'évolution des transformations granulaires au cours des réactions chimiques en trois états de matière en fonction du temps (Tab.4) :

- *État 01* : à t = 0 mois : granulat à l'état pur (commercialisé ou pur),
- *État 02* : à t = 6 mois : granulat après le durcissement du béton armé (A) (Tab.3).
- *État 03* : à t = 6 mois : granulat après le durcissement du béton armé, qui a subi des attaques avec de la soude (béton B), conservé selon les conditions du tableau 3.

Tableau.4 : Essai FRX élaboré pour les différents matériaux en fonction du temps.

Type de matériau	Temps (mois)	Nombre d'échantillon	Zones			Type de matériau d'échantillonnage	Nombre total
			(a)	(b)	(c)		
ciment	0	3	-	-	-	Sac de ciment	<u>58</u>
granulat	0	3	-	-	-	Tas de sable et gravier	
	6	25	9	7	9	Béton (A)	
	6	25	9	7	9	Béton (B)	
gel	6	2	-	-	-	Parement du Béton (B)	

2.2 Méthodes

2.2.1 Représentation graphique

Pour les poutres en béton armé avec et sans dopage en alcalins, la présentation graphique des résultats est envisagé au moyen du logiciel Microsoft office avec Excel Stat professionnel.

2.2.2 Analyse en Composantes Principales ACP

Les résultats obtenus des analyses chimiques de l'essai AFNOR NF P15-467 ou FRX sont traités par la méthode d'analyse en composantes principales (ACP) au moyen du logiciel Excel Stat professionnel. Le choix de cette méthode revient essentiellement au nombre important des individus et aux divers paramètres (variables) mis en jeu comme: le type du matériau, le temps, l'emplacement du prélèvement et les résultats des analyses physico-chimiques. Pour (N) échantillons ou individus repérés par (P) variables quantitatives, l'ACP permis une projection par le changement de variable de l'espace (P x N) à un autre espace plus réduit, cohérent et plus accessible (avec $P > 3$). On a donc 8 variables (CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃, SiO₂, MgO, Na₂O, K₂O, SO₃) et 58 individus distribués au tableau 4 qui sont : ciment livré, granulat à l'état pur, granulats en zones a-b-c dans les bétons (A et B) « (zone a) de la surface de moulage sur 9 axes, (zone b) du cœur sur 7 axes et (zone c) à coté des aciers internes sur 9 axes », et les gels résultants après 28 jours et 6 mois d'essai.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

L'investigation des résultats de l'AAR dans le béton, a permis de voir les aspects physique, mécanique et chimique du matériau.

3.1 Aspect physique

L'évolution temporelle sur une période de six mois (06) de la texture des parements des poutres en suivant les altérations aux bétons, comme : les décolorations, fissurations, et la formation des mailles en faïençage ont permis de dresser des courbes d'évolution (Fig.4).

On note pour les poutres en béton (A) de référence qu'elles maintiennent une bonne texture interne et externe avec une peau saine, sans décoloration ni fissurations. Par contre les poutres en béton (B) sont attaquées par les alcalins, des taches blanchâtres apparaissent au bout de 2 à 3 semaines de la conservation. Ces taches deviennent de plus en plus larges en surface externe du parement de la poutre

proportionnellement au temps. C'est le gel mobile de l'AAR en poudre (<1 mm) se trouve en grande quantité aux cavités, pores et au réseau de fissure du béton. Les microfissures occupaient la surface externe du béton sous forme (Y) à 120° d'angle (fissure de l'AAR ou Isle of Man), elles évoluent et se propagent dans tous les sens et même en profondeur. Elles se joignent pour créer des polygones de faïençage et avec le temps ils se divisent de plus en plus. L'extrême ouverture de fissure mesurée est de 1,5 mm, et le nombre maximum compté de faïençage est de 17758 Maille/m² avec une décoloration totale externe (blanchâtre) au bout de 6 mois (Fig.4). Deux sortes de décoloration interne ont été décelées, distribuées en trois zones du béton armé (B) uniquement (Fig.5):

- Zone (a et b) : sont blanchâtre, sèche et plane avec le gel blanc en poudre dans les surfaces horizontales d'enrobage d'acier longitudinal (zone a), en surface de moulage. Ce gel en (zone b) est le centre du confinement.
- Zone (c): est la surface mouillée permanente, le long des armatures transversales et longitudinales.

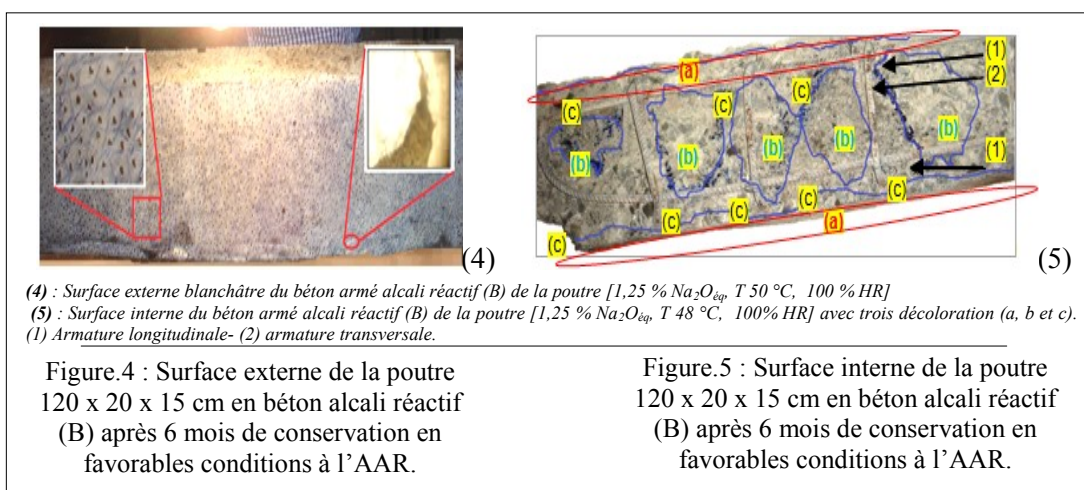
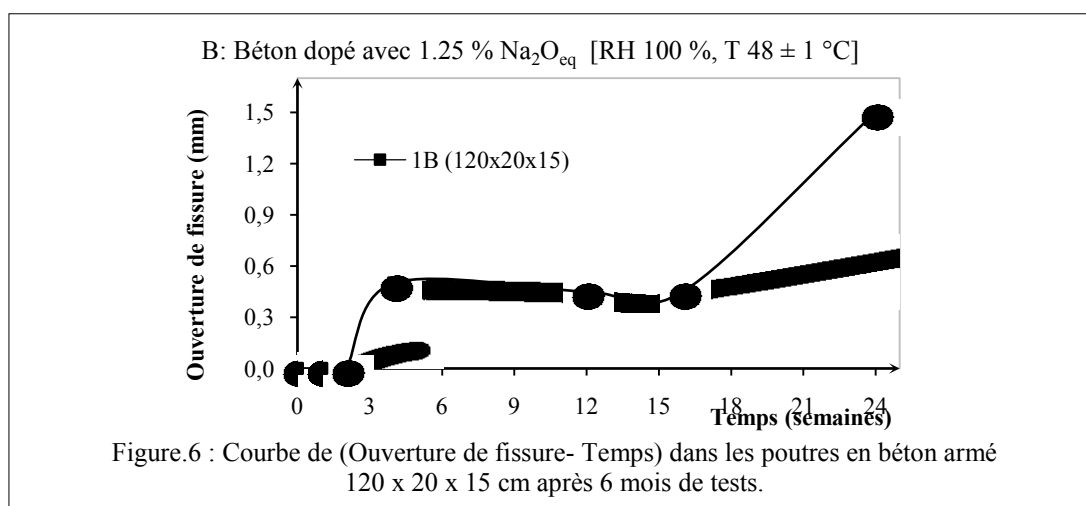


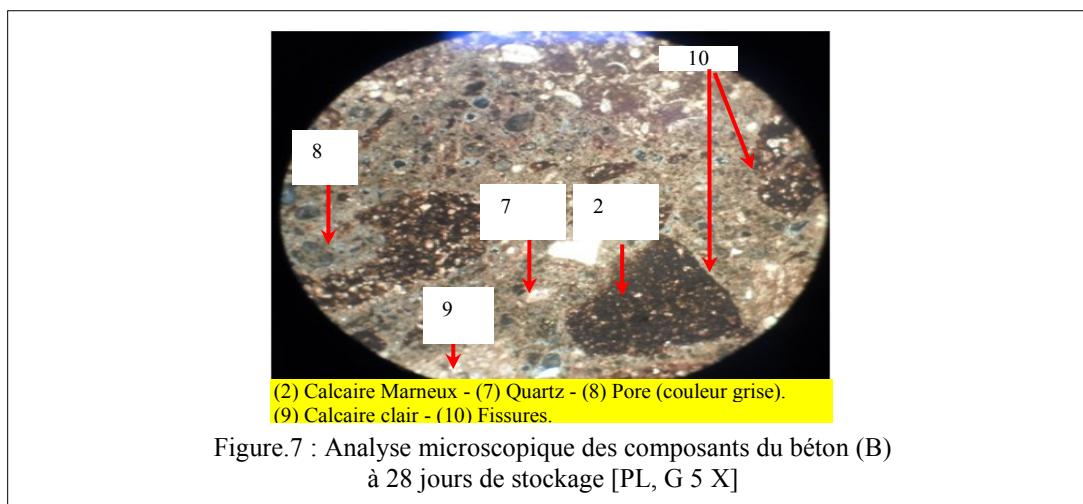
Figure.4 : Surface externe de la poutre 120 x 20 x 15 cm en béton alcali réactif (B) après 6 mois de conservation en favorables conditions à l'AAR.

Figure.5 : Surface interne de la poutre 120 x 20 x 15 cm en béton alcali réactif (B) après 6 mois de conservation en favorables conditions à l'AAR.

Le mouvement du gel n'est en réalité que la cause directe de l'évolution des ouvertures de fissure en fonction du temps à travers le parement des poutres en béton (B). (Fig.6)



On constate selon l'analyse microscopique sur des échantillons en béton prélevé des éprouvettes dont l'âge est de 28 jours (Fig.7), où on a repéré les fissures au niveau de la zone d'adhérence. Ces fissurations prennent naissance pour évacuer le gel en exsudation. Les premières fissures sont au niveau de la zone de contact 'Granulat- Alcalin' ou bien 'Zone d'adhérence granulat-ciment'.

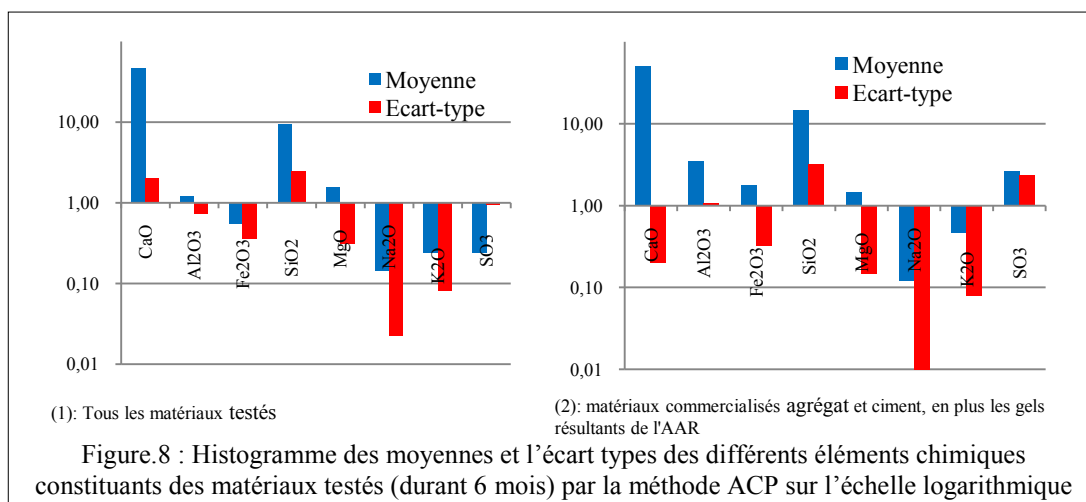


3.2 Aspect mécanique

Après une conservation de 6 mois et à la rupture pour l'essai de flexion par 4 points, la résistance de compression aux poutres en béton (A) augmente jusqu'à 9,75 MPa. Or le béton (B) affecté par l'AAR présente une valeur de 10,17 MPa, avec un gain de 4,27 % en plus que celle de (A). Cela explique la participation du gel solide à l'amélioration de la caractéristique mécanique de la compression en remplissant les pores et les fissures.

3.3 Aspect chimique étudié par la méthode statistique ACP

Le traitement des analyses par ACP est exprimé par une matrice et un cercle de corrélation identifiant les analyses chimiques au moyen du FRX et un plan de projection des individus qui sont au nombre de 58 et les variables sont 8. Les échantillons prélevés sont des granulats pris des poutres en trois zones de coloration et endroits différents (zone a, b et c) le long des 9 axes aux bétons armés (A et B). L'évolution des taux des composants chimiques des agrégats est élaborée de l'état pur avant cohésion (granulat commercialisé). Ensuite à l'état de cohésion avec le ciment au béton (A) et à la fin de la réaction alcaline au béton (B). Globalement, l'ensemble des données est présenté par leurs moyennes et l'écart types dans la figure 8, durant 6 mois d'essai pour les agrégats, ciment et même les gels formés. L'élément chimique le plus dominant est le CaO, or la silice SiO₂ reste faible. Et pour les plus faibles quantités de ces composants, on trouve le Al₂O₃ et MgO ensuite SO₃, Na₂O_{eq} et à la fin le Fe₂O₃. Pour les bétons (A et B), nous ne notons pas de grande supériorité entre ces deux types de béton, que ce soit pour les moyennes ou pour les écarts types, ils sont équilibrés.



3.3.1 Ciment et Gels du béton armé B de 28 jours et 6 mois d'âge

• Matrice de corrélation

La lecture des données obtenues pour les matériaux ciment et gels relatifs à la matrice des corrélations des variables (Tab.5) révèle une forte corrélation positive entre les éléments (CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃) et (SiO₂, K₂O, SO₃) de (0,95 à 0,99). On note une autre forte corrélation négative entre les éléments (CaO, Al₂O₃ et Fe₂O₃) et (SiO₂, K₂O et SO₃) de (0,97 à 0,99).

On remarque aussi, une extrêmement forte corrélation négative entre Na₂O et (CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃, SiO₂, et K₂O), elle atteint parfois la valeur -1 entre SO₃ et Na₂O. Une corrélation négative moyenne est notée entre le MgO et (CaO, K₂O) de (0,58 à 0,64).

Tableau.5 : Matrice de corrélation les différents matériaux (Ciment, Gels).

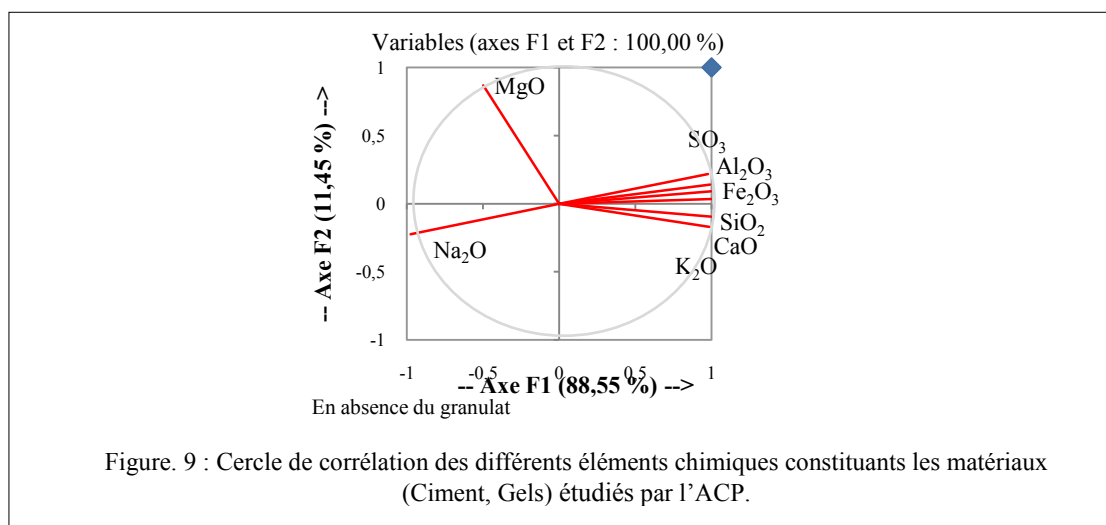
	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
CaO	1	0,973	0,983	0,992	-0,577	-0,949	0,997	0,952
Al ₂ O ₃		1	0,999	0,994	-0,372	-0,996	0,952	0,997
Fe ₂ O ₃			1	0,998	-0,416	-0,991	0,966	0,992
SiO ₂				1	-0,469	-0,981	0,979	0,983
MgO					1	0,291	-0,637	-0,299
Na ₂ O						1	-0,923	-1,000
K ₂ O							1	0,926
SO ₃								1

En présence du granulats (commercialisé) en plus des ciments et gels, la matrice de corrélation change d'aspect où on note une diminution des corrélations et parfois d'une façon non significative surtout entre le CaO avec tous les autres éléments et en plus le MgO avec (Al₂O₃, Fe₂O₃, Na₂O et SO₃) mais atteint une valeur $\pm 0,99$.

• Cercle de corrélation

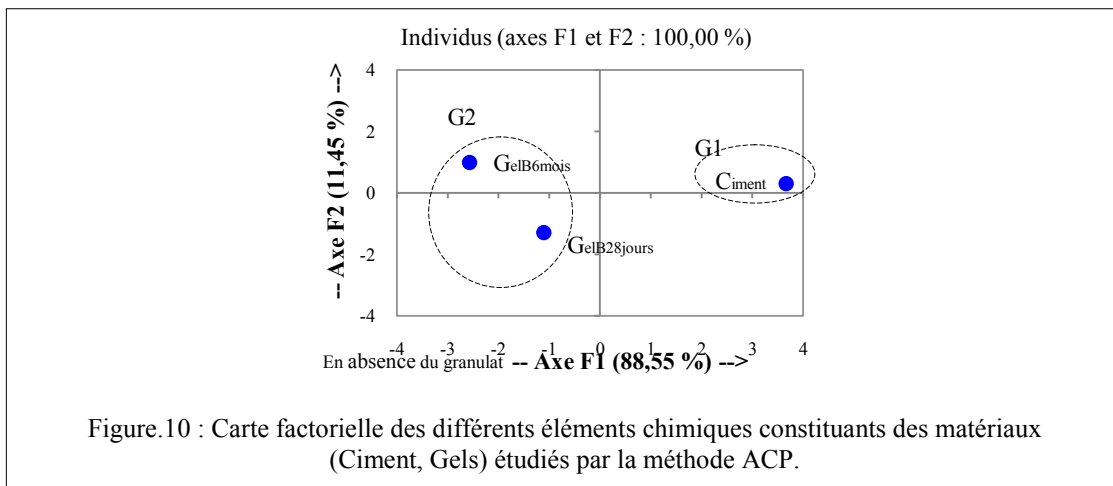
La lecture des données obtenues pour les matériaux ciment et gels sur le cercle de corrélation de la figure 9 permet de voir clairement que la grande majorité des paramètres sont fortement corrélés positivement et ils sont portés par l'axe F1. Cependant, on remarque une opposition de l'élément Na₂O à tous les autres composants. L'axe F2 est exprimé par un seul élément qui est MgO.

En présence du granulats (commercialisé) en plus du ciment et gel sur le cercle de corrélation, on note une inversion de pôle entre MgO et Na₂O. La majeure partie des éléments sont portés par l'axe F1 mais un seul élément CaO est porté par F2.



• **Plan factoriel des individus**

L’analyse de la projection des individus sur le plan factoriel F1-F2 pour les matériaux ciment, gels et granulat de la carrière a permis de définir une distribution concentrée sur F1 dans la figure 10. On peut voir une famille composée de deux groupes G1 et G2. Le groupe G1 est porté par F1 au sens positif, il contient le ciment uniquement à la figure 10 toujours mais en présence du granulat pur, il se divise en deux (02) sous-groupes opposés l’un à l’autre. Et le groupe G2 est aussi porté par F1 et il s’oppose à G1, il assemble deux types de gels alcali réactif qui inverse leurs positions par rapport à l’axe F1 (Fig.10).



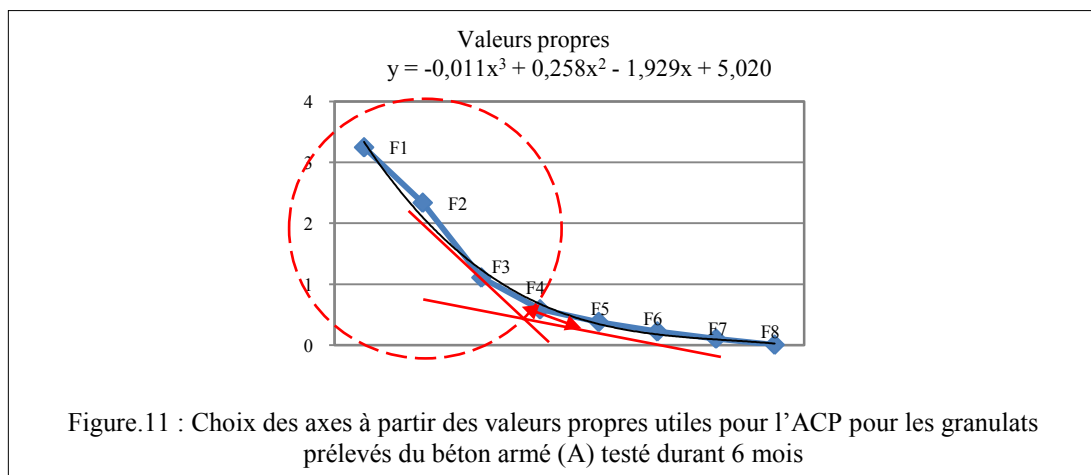
3.3.2 Granulats

3.3.2.1 Etat 01- Granulats purs

On a traité le cas du granulat avec les précédents matériaux (ciment et gels) qui montrent une bonne corrélation avec ces matériaux, vu qu’ils ne sont pas en phase réactionnel (adhérence) comme en béton (A ou B).

3.3.2.2 Etat 02- Granulats du béton armé (A) de référence de 6 mois d’âge

Selon la bibliographie, le choix des axes se limite à la conservation des quatre premiers axes de F1 à F4, de façon que la courbe de tendance soit Bilinéaire avec la courbe polynomiale de l’ordre de 3. La tendance doit également coïncider le plus possible avec l’allure des valeurs propres. Ce graphique nous a permis de déterminer le point de déviation considéré comme étant la dernière valeur propre donnant ainsi le nombre d’axes à prendre en considération. (Fig.11)



• **Matrice de corrélation**

Les données qu'on peut tirer pour le matériau granulat du béton (A) relativement à la matrice des corrélations des variables au tableau 6. Ils ont permis tous d'abord de voir clairement la chute des valeurs de corrélation positives et négatives entre les divers composants chimiques.

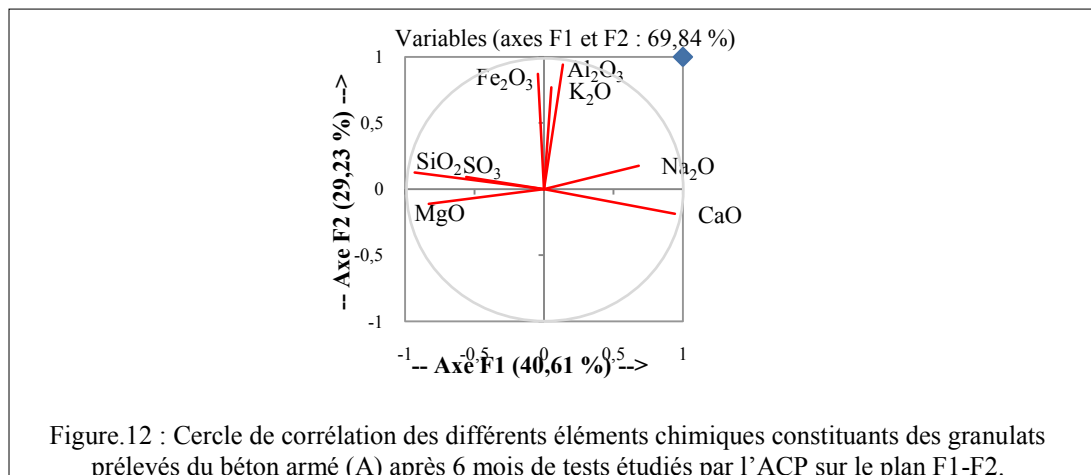
Tableau.6: Matrice de corrélation des granulats prélevés du béton armé (A) testé après 6 mois de conservation.

	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
CaO	1	-0,031	-0,197	-0,988	-0,794	0,465	-0,080	-0,402
Al ₂ O ₃		1	0,806	-0,024	-0,157	0,263	0,637	-0,005
Fe ₂ O ₃			1	0,121	-0,060	0,097	0,422	0,087
SiO ₂				1	0,783	-0,440	0,041	0,366
MgO					1	-0,388	-0,187	0,172
Na ₂ O						1	0,075	-0,583
K ₂ O							1	0,071
SO ₃								1

On distingue une forte corrélation positive entre les éléments (Al₂O₃, Fe₂O₃) et (MgO, SiO₂) de (0,78 à 0,81) et moyenne entre les éléments (Al₂O₃ et K₂O), elle ne dépasse pas 0,64. Il est à noter également une forte corrélation négative entre les éléments (CaO, SiO₂ et MgO) de (0,79 à 0,99) et moyenne entre le Na₂O et SO₃ de 0,58.

• **Cercle de corrélation**

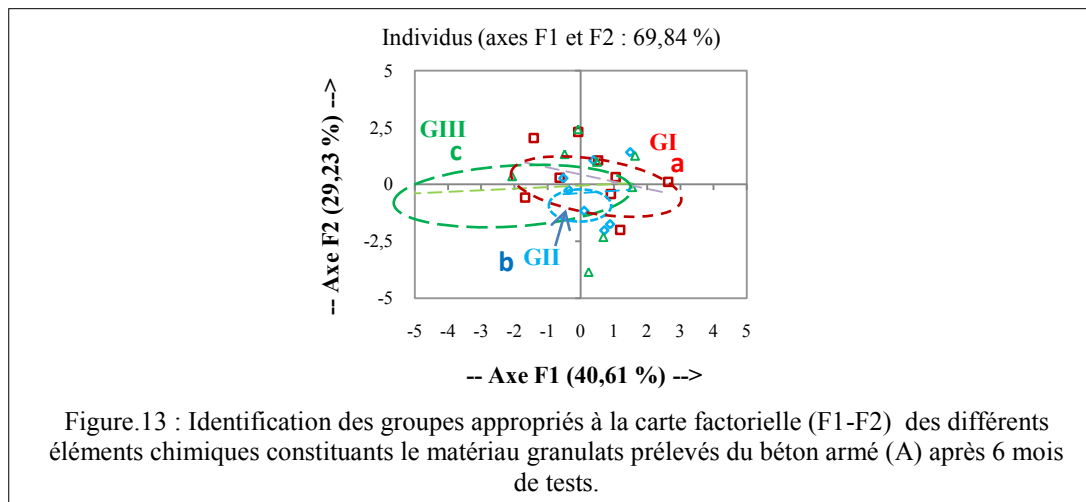
La lecture des résultats obtenus change totalement pour les matériaux granulat du béton (A) relative aux cercles de corrélation appropriée à la figure 12. Nous possédons quatre axes pour la lecture des données, sur lesquels on trouve une distribution très différente par rapport au cas précédent avec une chute considérable des corrélations. L'axe F1 n'est porté que par deux éléments Na₂O et CaO au sens positive et au sens négatif, il est porté par MgO, SiO₂ et SO₃, et celui F2 est porté par le Fe₂O₃, Al₂O₃ et K₂O. L'axe F4 est porté par K₂O et celui de F3 est porté par SO₃ dans les sens positifs et par Na₂O dans le sens négatif.



• **Plan factoriel des individus**

La projection des individus sur le plan factoriel F1-F2 ainsi F3-F4 pour le matériau granulat prélevé du béton (A) nous a donné une distribution centrée pour le plan F1-F2, mais pour F3-F4 la distribution est répartie sur F3. Au moyen de la courbe de tendance (linéaire), on peut avoir une famille composée de trois groupes G_I, G_{II} et G_{III} sur un petit intervalle limité par un cercle de rayon de 2,5 environ dans le béton (A) (Figure 13). Le groupe G_I représente la zone (a) qui est portée par F1 et F2 dans leurs sens positifs autour du point de l'origine. Le groupe G_{II} est plus restreint que G_I, G_{II} représente la zone (b) est portée par F1 et F2 toujours aux sens positif et négatif. Le groupe G_{III}

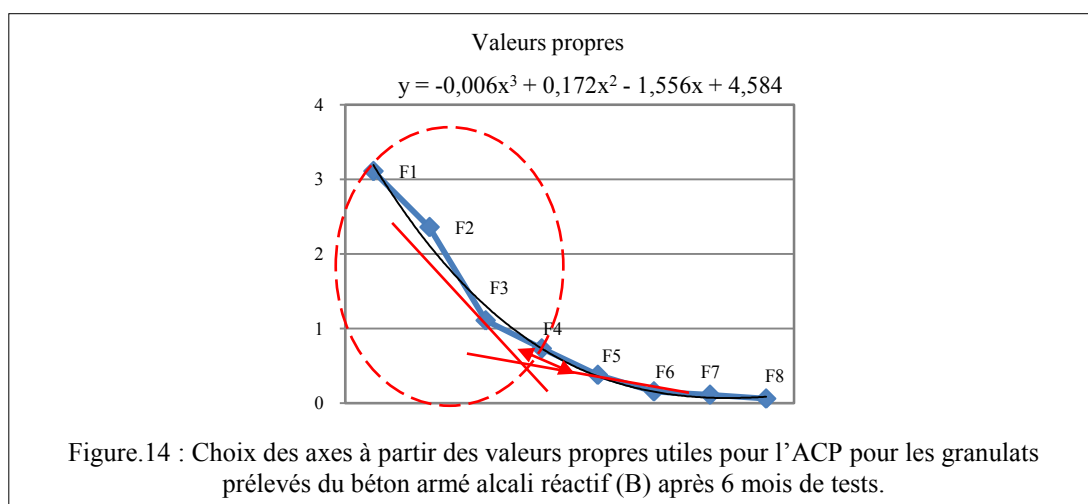
représente la zone (c) est portée en majorité par F1 aux sens positif et négatif. Le plan F3-F4 n'est en réalité qu'une forme plus restreinte du plan précédent, il occupe moins de surface centrée sur un petit intervalle limité par un cercle de rayon de 2,0 environ. Les groupes G_I, G_{II} et G_{III} sont présents et confirment les mêmes zones (a, b et c) respectivement du béton (A).



On peut dire que les zones (a, b et c) sont confondues presque selon l'ACP car leurs familles G_I, G_{II} et G_{III} sont centrées. Ce qui explique l'absence de la décoloration à l'intérieur du béton (A) mais en réalité ils sont présents malgré leur invisibilité à l'œil nu ou sous microscopique. À ce fait, l'ACP est le seul moyen de la détection de ces zones même si le matériau béton (A) montre un aspect normal d'un béton sain.

3.3.2.3 Etat 03- Granulats du béton armé (B) affecté par l'AAR de 6 mois d'âge

Le choix d'axes se limite toujours à la conservation des quatre premiers axes F1, F2, F3 et F4, avec une courbe de tendance bilinéaire et polynomiale de l'ordre de 3 comme le montre la figure 14.



- **Matrice de corrélation**

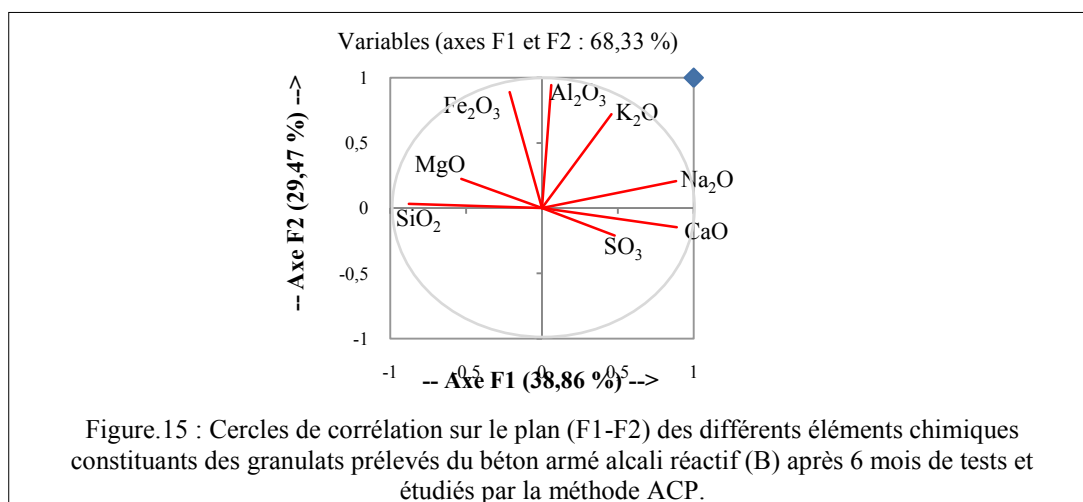
Les résultats obtenus relatifs à la matrice des corrélations des variables pour les granulats de béton (B) (Tab.7) montrent la continuité de la chute en nombre et aux taux des composants chimiques avec les deux signes (±). Ils présentent une forte corrélation positive uniquement entre les éléments (Al₂O₃, Fe₂O₃) de 0,83. Les éléments (K₂O, Na₂O) sont positivement corrélés entre eux de 0,66 et ils présentent également une corrélation positive moyenne avec Al₂O₃ et CaO de 0,60 et 0,64 successivement. La forte corrélation négative réside uniquement entre les éléments (CaO, SiO₂) de 0,89 et une seule corrélation négative moyenne entre le Na₂O et SiO₂ de 0,65.

Tableau.7 : Matrice de corrélation des granulats prélevés du béton armé alcali réactif (B) testé durant 6 mois.

	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
CaO	1	-0,062	-0,239	-0,889	-0,432	0,638	0,192	0,349
Al ₂ O ₃		1	0,831	-0,097	0,093	0,178	0,599	-0,221
Fe ₂ O ₃			1	0,126	0,332	-0,089	0,396	-0,218
SiO ₂				1	0,406	-0,653	-0,181	-0,319
MgO					1	-0,348	-0,094	0,075
Na ₂ O						1	0,661	0,428
K ₂ O							1	0,103
SO ₃								1

• Cercle de corrélation

Les résultats obtenus appropriés aux granulats du béton (B) relative aux cercles de corrélation indiquent la possession de quatre axes toujours pour la lecture des données. Avec une autre forme de distribution proche à celle du béton (A), et une chute vis-à-vis des taux des corrélations. L'axe F1 n'est porté que par deux éléments Na₂O et CaO au sens positif et deux éléments au sens négatif où il est porté par MgO et SiO₂. Et l'axe F2 est porté par les Fe₂O₃, Al₂O₃ et K₂O et celui de F3 est porté par MgO et SO₃. (Fig.15).

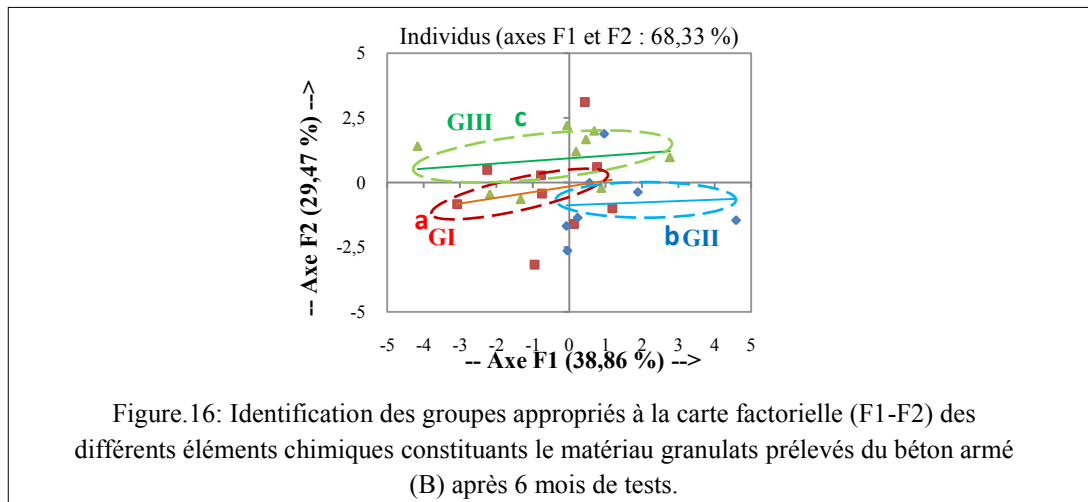


• Plan factoriel des individus

Sur le plan factoriel F1-F2 ainsi F3-F4 pour le granulat prélevé du béton (B) la projection des individus a donné des résultats contraires à ceux du béton (A), la distribution est centrée pour le plan F3-F4 et sur le plan F1-F2 elle est majoritairement portée par les axes F1 et F2 aux deux sens négatif et positif. On doit prendre en considération le type de la zone et la position de l'axe de la poutre pour la lecture de ces résultats de l'AAR.

Au moyen de la courbe de tendance (linéaire), on a pu voir une famille composée de trois groupes G_I, G_{II} et G_{III} sur un intervalle plus grand que celui du béton (A), limité par un cercle de rayon de 3,0 environ dans la figure 16. Ces groupes occupent des surfaces presque similaires mais ils se disposent différemment qu'au béton (A). Le groupe G_I représente la zone (a) du béton (B), il est porté par F1 et F2 aux sens négatifs. Le groupe G_{II} représente la zone (b) est portée par F1 au sens positif et F2 au sens négatif. Le groupe G_{III} représente la zone (c) est portée par F2 au sens positif et par F1 au sens négatif.

Au moyen de la tendance on a pu repérer également ces trois groupes G_I, G_{II} et G_{III} représentant les mêmes zones (a, b et c) respectivement du béton (B). Dont les groupes G_{II} et G_{III} se rapprochent l'un à l'autre dans le sens positif des axes F3 et F4.



On peut dire que les zones (a, b et c) pour le béton (B) sont moins confondues par rapport au béton (A) selon l'ACP. Ce qui explique la présence de la décoloration à l'intérieur du béton (B). L'ACP est un moyen de confirmation plus performant de la détection des zones de la réaction (a, b et c) en plus des autres moyens d'investigation des bétons atteints de l'AAR.

3.4 Discussion des résultats de l'ACP

- **Matrice de corrélation**

- **Pour les matériaux (ciments, gels de 28 jours et 6 mois et granulat pur)**

Les matériaux ciment, gels des bétons (B) de 28 jours et de 6 mois d'âge montrent une très forte corrélation positive et négative. En présence des granulats purs on remarque une diminution des corrélations et parfois d'une façon non significative surtout entre le CaO et le MgO avec le reste des éléments chimiques.

- **Pour les granulats des bétons (A et B)**

En béton (A) les granulats sont en réaction avec le ciment, on note la chute des valeurs de corrélation positives et négatives entre les divers composants chimiques par rapport au cas précédent (avant la réaction). La corrélation positive est forte entre (Al_2O_3 , Fe_2O_3) et (MgO , SiO_2) et moyenne entre (Al_2O_3 et K_2O). La forte corrélation négative réside uniquement entre (CaO et SiO_2) et négative moyenne entre le (Na_2O et SO_3).

En béton (B) les granulats en réaction avec le ciment sont attaqués par les alcalins, on note la continuité de la chute. Les corrélations changent par rapport au béton (A), la corrélation est positive forte entre (K_2O , Na_2O) avec (MgO , SiO_2) et moyenne entre (Al_2O_3 et CaO). Au sens négatif, la corrélation forte réside uniquement pour le (CaO et SiO_2) et moyenne entre le (Na_2O et SiO_2).

On constate que l'ACP permet de voir clairement l'évolution des taux de corrélation entre les divers individus en ajoutant et en réduisant des matériaux, ce qui montre leurs effets en contrôlant leurs composants chimiques. Pour la prévention en cas de l'AAR, ce résultat nous permet également de sélectionner facilement les additions minérales on se basant sur leurs composants chimiques tels que : le laitier de haut fourneau qui est un bon réducteur des expansions dues à l'AAR, son composant principal est le fer (Fe). L'ACP a montré que le fer minimise les corrélations entre les bétons (A et B).

- **Cercle de corrélation et Plan factoriel des individus**

- **Pour les matériaux (ciments, gels de 28 jours et 6 mois et granulats purs)**

En comparant les cercles de corrélation et les cartes des individus (Fig.9 avec Fig.10), on constate que le gel de 28 jours est influencé par le Na_2O et le gel de 6 mois est influencé par le MgO vu la grande compatibilité sur l'axe F1 au sens négative entre les deux gels et le Na_2O et MgO. On voit bien que le facteur temps influe essentiellement sur la composition des gels en fixant le CaO. On note également, que le ciment et le granulat pur sont portés par le reste des éléments chimiques, la consommation du CaO par les gels inverse le classement de ces composants chimiques.

- **Pour les granulats des bétons (A et B)**

En combinant les cercles de corrélation et les cartes des individus des granulats des zones (a, b et c) des bétons (A et B) associés aux figures 12 avec 13; et les figures 15 avec 16. On voit une grande correspondance entre les divers éléments chimiques et les ellipses qui limitent les zones (a, b et c). (Tab.8).

Tableau.8 : Tableau récapitulatif des zones (a, b et c) et leurs composants chimiques des bétons (A et B).

Béton	Zone	Composants chimiques		Composants chimiques dominants	
		Plan F1-F2	Plan F3-F4	Plan F1-F2	Plan F3-F4
A	a	Fe ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃ et K ₂ O	CaO, K ₂ O, MgO, SO ₃ et SiO ₂	Fe ₂ O ₃ et Al ₂ O ₃	CaO et K ₂ O
	b	Na ₂ O et CaO	Na ₂ O, MgO, SiO ₂ et Al ₂ O ₃	Na ₂ O et CaO	Na ₂ O
	c	SiO ₂ , SO ₃ et MgO	Fe ₂ O ₃ , K ₂ O, CaO et Al ₂ O ₃	SiO ₂ , SO ₃ et MgO	Fe ₂ O ₃ et K ₂ O
B	a	SiO ₂ et MgO	Al ₂ O ₃ , CaO et Fe ₂ O ₃	SiO ₂	-
	b	SO ₃ , CaO et Na ₂ O	MgO, SO ₃ et Na ₂ O	CaO et Na ₂ O	MgO et SO ₃
	c	MgO, Fe ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃ et K ₂ O	Na ₂ O, SiO ₂ et K ₂ O	Fe ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃ et K ₂ O	K ₂ O

On constate que la zone hydrique (c) représente la surface de déroulement des réactions chimiques (granulat- alcalin) vu l'absence du gel en poudre, mais il est en état soluble. Cette zone représente en réalité l'aire du groupement de tous les composants du béton (B) : agrégat, ciment, acier et alcalin. Les zones blanchâtres (a et b) ne sont que les emplacements de la formation et du passage du gel formé vers l'extérieur en peau dans la poutre de béton armé vu sa présence intensive, c'est l'aire du dépôt ou de décantation du gel. L'identification minéralogique des composants du gel est identifiée par la fixation du CaO surtout comme on vient de le dire. En analysant le mouvement du gel en exsudation au béton (B), on a pu identifier les étapes et l'état du gel que présentent le tableau 8 et la figure 17.

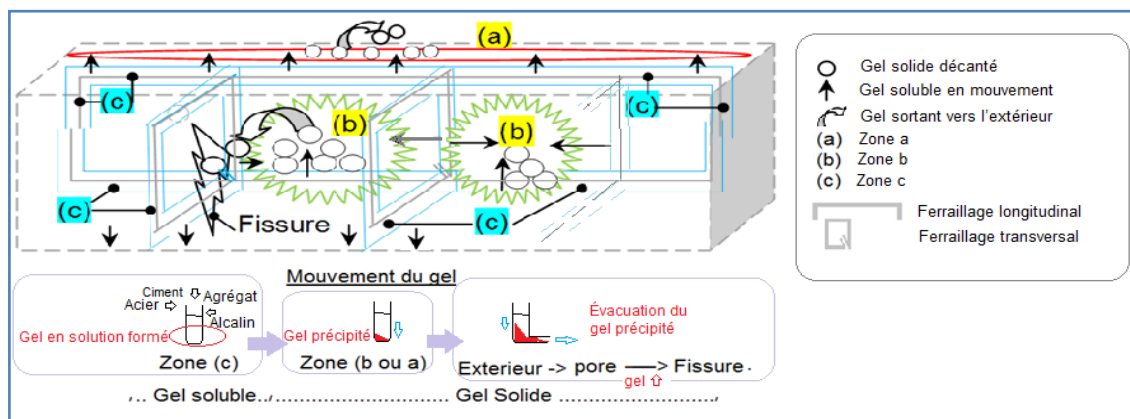


Figure.17 : États du gel de l'AAR formé et son mouvement interne dans une poutre 120 x 20 x 15 cm en béton alcali réactif (B) durant 6 mois, conservé dans des conditions favorables à l'AAR.

La figure 17 montre :

- Etape 01 : la réaction chimique entre les composants du béton avec les alcalins commence d'abord en zone (c) dont les granulats sont riches en « MgO, Fe₂O₃, Al₂O₃ et K₂O » conservés dans un milieu très humide et chauffé d'où la formation d'un gel soluble transparent et translucide.

- Etape 02 : le gel soluble formé se déplace par la suite vers la plus proche zone (b ou a), en laissant la place à d'autres alcalins et le reste des composants du béton pour réagir à nouveau vu leurs disponibilités. le gel soluble se précipite et se transforme en poudre solide dans les zones (a et b) pour vue de l'excès de sa concentration.
- Etape 03 : le gel cumulé en zone (a) tend à sortir vers l'extérieur à travers la surface de moulage de la poutre en béton armé, les granulats de la zone (a) sont riches en SiO_2 avec un peu de MgO . Or, le gel cumulé en zone (b) tend à sortir vers l'extérieur à travers les parois du béton armé (côtés), mais les granulats de cette zone sont riches en SO_3 , CaO avec une faible quantité de Na_2O . En dernier stade, le gel sortant riche en CaO libère pratiquement les lieux (a et b) pour d'autre gel résultant de la réaction alcaline en présence d'un milieu favorable à l'AAR. Quand le débit du gel solide sortant dépasse le volume des pores et les cavités du béton, il crée des réseaux de fissure en maillage par pression pour dégager la totalité du gel de l'AAR.

4. CONCLUSIONS

Après 6 mois de tests de l'AAR sur des poutres 120 x 20 x 15 cm en béton armé (A et B), on a trouvé:

- *la poutre en béton armé de référence (A)*: maintient un aspect normal sans décoloration ni fissurations en surface externe et interne.

- *La poutre en béton armé en béton alcali réactif (B)* : plusieurs dégradations se manifestent :

i- Aspect physique interne et externe

- À la fin de l'essai de 6 mois, la poutre en béton armé (B) dans les parements externes se décolore (totalement blanchâtre), se fissure (1,5 mm) et s'éclate en maillage (17758 Maille/m²). La matrice interne le long de la poutre montre trois zones de décoloration (a, b et c):

○ Zone (c): c'est la zone hydrique permanente (huilée) sans gel blanc, répartie le long des armatures transversales et longitudinales et se situe entre les zones (a et b). C'est là où se déroulent les réactions chimique entre (granulat, alcalin, acier, ciment) en produisant un gel soluble.

○ Zone (a et b) : une surface blanchâtre avec des quantités intensives du gel blanc en poudre, sèche, qui occupe la périphérie et le centre du béton confiné. Ces zones ont un double rôle pour le gel : zones de passage du gel mobile formé de l'intérieur vers l'extérieur ; elles représentent également l'aire du dépôt du gel (gel précipité) pour vue de l'augmentation de la concentration ionique.

ii- Aspect mécanique et performance

La résistance de compression par flexion des poutres 120 x 20 x 15 cm en béton armé (B) présente un gain de 4,27 % que celui dans le béton (A), ce qui est expliqué par la participation du gel solide en poudre des zones (a et b) par le remplissage des pores ainsi des fissures d'où l'amélioration de sa résistance de compression.

iii- Aspect chimique et l'ACP des matériaux « Granulats (pur et en béton A et B) - Ciment - Gels formés »

- Moyennes et l'écart types

Pour les matériaux : agrégats, ciment et même les gels formés l'élément chimique le plus dominant est le CaO , la silice SiO_2 reste faible mais les autres composants sont en très faibles quantité. Les bétons (A et B), ne se diffèrent pas beaucoup ils sont équilibrés.

- Matrice de corrélation

La corrélation entre les éléments chimiques pour les agrégats, ciment et même les gels formés est très forte et parfois moyenne à signe positif ou négatif en fonction du type de matériau et l'âge.

- Cercle de corrélation

Les axes étudiés sont 4 dans leur nombre, les composants chimiques qui ne sont pas portés par F1, F2, F3 et F4 sont corrélés faiblement ou moyennement et disposés entre ces deux axes. Les granulats dans le béton (A) ont une distribution très supérieure des autres matériaux utilisés.

- Plan factoriel des individus

L'ACP montre l'existence des zones (a, b et c) en béton armé (A) qui se confondent, ce qui explique l'absence de la décoloration à l'intérieur du béton (A) sur toutes les échelles macroscopique, mésoscopique et microscopique. À ce fait, l'ACP est le seul moyen de la détection des zones (a, b et c) de la réaction même si le matériau montre un aspect normal et sain. Pour le béton alcali réactif (B),

ces zones sont divergentes ce qui explique la présence de la décoloration à l'intérieur de ce béton. D'où, l'ACP est un moyen de confirmation plus performant de la détection de l'AAR par les zones de la réaction (a, b et c).

- La formation du gel dans le béton B passe par trois étapes (03) :
 - Étape 01 : la réaction chimique entre les composants du béton avec les alcalins se produit en zone (c) qui est riche en MgO, Fe₂O₃, Al₂O₃ et K₂O pour ses granulats, le gel formé est soluble transparent et translucide.
 - Étape 02 : ce gel se déplace vers la zone la plus proche (b ou a), en laissant la place à d'autres alcalins et le reste des composants du béton pour réagir, il se précipite et se transforme en poudre solide dans les zones (a et b).
 - Étape 03 : le gel cumulé en zone (a) tend à sortir vers l'extérieur à travers la surface de moulage de la poutre, les granulats de cette zone sont riches en SiO₂ avec un peu de MgO. Et le gel cumulé en zone (b) tend à sortir vers l'extérieur à travers les parois des côtés, la zone (b) possède des granulats riches en SO₃, CaO avec faible taux de Na₂O. Le gel sortant à travers le réseau de fissure exerce une pression qui forme des fissurations en maillage, il est riche en CaO.

RECOMMANDATION

L'ACP permet de choisir le type d'ajouts qui minimise les effets de l'AAR, en se basant sur l'emplacement des zones de réaction (a, b et c) qui doivent être rapproché l'une à l'autre. La réparation et la prévention en cas de l'AAR ne deviennent plus aléatoires comme aux parts avant, il est recommandé de s'appuyer essentiellement sur la sélection du type de substituant dont la nature chimique est connue et on peut étudier son effet au moyen de l'ACP.

REFERENCES

- [1] Villeneuve V., 2011. Détermination de l'endommagement du béton par méthode pétrographique quantitative, Thèse de doctorat en géologie et génie géologique, Université Laval Québec, Canada, 1-183.
- [2] Hadley D.W., 1964. Alkali reactivity of dolomitic carbonate rocks, Symposium on Alkali-Carbonate Rock Reaction, Highway Research Council, USA, Record Number. 45, 1-20.
- [3] Calgaro J.A & Lacroix R., 1992. Maintenance et réparation des ponts, Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, 347-386.
- [4] Fournier B., Bérubé M.A., 2000. AAR dans le béton, Revue du concept basique et implications de l'ingénierie, Revue canadienne de Génie Civil, Vol. 27, 167-191.
- [5] Katayama T., 2010. Ce qu'on appelle ACR sa minéralogie et détails géochimique, avec référence spéciale de l'ASR, Journal de Ciment et recherches sur le béton, Vol. 40, 643-675.
- [6] Plumier A., 2006. Pathologie et préparation structurelles des constructions, caractérisation d'une structure existant, Faculté des sciences appliquées, département d'Architecture, géologie, environnement et constructions, Université de Liège, Belgique, partie 2, 101-135.
- [7] ASTM C 78- 02, 2004. Flexural-Strength Test, American standard of testing materials, USA.
- [8] ACNOR A23.2-9C, 1994. Compressive strength of cylindrical concrete specimens, Canadian standard association, Canada, 171-389.
- [9] ACNOR CSA A23.2- 8C, 1994. Flexural Strength of Concrete (Using a Simple Beam with Third Point Loading), Canadian standard association, Canada, 351-353.
- [10] AFNOR NF P18- 407, 1990. Bétons-Traction par flexion (par quatre points) sur éprouvettes prismatiques, association Française de normalisation, France, 238-241.
- [11] AFNOR NF P18- 406, 1990. Concretes: Compression test, French standards association, France, 235-237.
- [12] ACNOR CSA A23.2- 14, 1994. Potential expansively of aggregates (procedure for length change due to alkali-aggregate reaction in concrete prisms at 38°C, Canadian standard association, Canada, 230-240.
- [13] AFNOR NF P18- 587, 1990. Aggregates: Dimensional establishes in alkaline field- Test for Concrete, French standards association, France.
- [14] Mohamed I., 2004. Contribution à l'étude du confinement du béton Alcali-Réactif par matériaux composites Carbone Epoxy, Thèse de doctorat en Génie Civil, Université Claude Bernard, Lyon 1, France, 1-276.
- [15] ACNOR CSA 23.2- A25, 1994. Test method for detection of alkali-silica reactive aggregate by accelerated expansion of mortar bars, Canadian standard association, Canada, 263-270.

- [16] ASTM-C1260, 2004. Potential Alkali Reactivity of Aggregate: (mortar-bar method), American standard of testing materials, USA, (1994), 1-4.
- [17] AFNOR NF P18- 301, 1983. Aggregates- Natural aggregates for hydraulic concrete (E), French standards association, France, 19-28.
- [18] AFNOR NF P18- 304, 1973. Granulates- Granulometry of aggregates (E), French standards association, France, 33-39.
- [19] AFNOR NF P18- 309, 1982. Aggregates: Rotary- Furnace made expanded clay or shale aggregates for making concrete (E), French standards association, France, 48-60.
- [20] AFNOR NF P18- 554, 1979. Granulates- Aggregates- Measurements of mass per unit volume, porosity, coefficient of absorption and contain in water of chippings and pebbles (E), French standards association, France, 78-80.
- [21] AFNOR NF P18- 555, 1980. Granulates- Aggregates- Measurements of mass per unit volume, coefficient of absorption and contain in water of sands (E), French standards association, France, 81-83.
- [22] AFNOR.EN- 933.2, 1997. Tests Method for geometrical properties of aggregates, French standards association & European Standard, France.
- [23] Curtil L. & Habita M.F., 1994. Etude de l'AAR sur des prismes en béton, Journal Elsevier: Recherche sur le ciment et le béton, N°3-24, 473-478.
- [24] Carlson R.W., 1942. Discussion sur « Expansion du béton par réaction entre le ciment et l'agrégat » par T.E. Stanton, Procédure de la société américaine de Génie Civil, Vol.47.
- [25] Vivian H. E., 1951. Quelques effets de la température sur l'expansion des mortiers, Journal des sciences appliquées, Australie, Vol.2.
- [26] Chen H., 1988. L'effet du ciment composé en AAR, Rapport final, Institut de la recherche en construction, Conseil de Recherche Nationale, DSS N°1SQ84-00349, & N°1SQ84-00349, Canada.
- [27] Habita M.F., 1992. Contribution à l'étude de l'incidence de l'Alcali-Réaction sur le comportement mécanique des poutres en béton armé, Thèse de doctorat en Génie Civil, Université Claude Bernard, Lyon 1, France, 1-221.
- [28] AFNOR NF P15- 451, 1963. Testing technique, setting test (E), mechanic tests, blending and compression (E), French standards association, France, 140-141.
- [29] ACNOR CSA A23.2- 5C, 1994. Concrete slump determination, Canadian standard association, Canada, 339-341.
- [30] AFNOR NF P18- 405, 1981. Concretes data test manufacturing and samples conservation (E), French standards association, France, 232-234.
- [31] ASTM C78-02, 2004. Flexural Strength Test, American standard of testing materials, USA.
- [32] ACNOR CSA A23.2- 8C, 1994. Flexural Strength of Concrete: (Using a Simple Beam with Third Point Loading), Canadian standard association, Canada, 351-353.
- [33] AFNOR NF P15- 467, 1985. Hydraulic binders, Practical instrumental method for the analysis of cement by X-ray fluorescence spectrometry (E), French standards association, France, 107-110.