

CONSEQUENCES MECANIQUES DE L'ATTAQUE SULFATIQUE EXTERNE SUR LES BETONS AUTOPLAÇANTS

Reçu le 29/02/2007 – Accepté le 30/10/2008

Résumé

L'étude présentée dans cet article communication traite des conséquences mécaniques de l'attaque sulfatique externe sur les bétons autoplaçants. Deux différents protocoles d'attaque sulfatique externe ont été appliqués pour quatre types de bétons autoplaçants à base d'agrégats concassés. Le premier protocole est l'immersion totale des échantillons dans une solution à 5% de Na_2SO_4 , $10\text{H}_2\text{O}$ à 20°C et le second l'exposition des éprouvettes des bétons à des cycles d'immersion/séchage à 60°C pour accélérer l'altération. L'exposition des échantillons aux deux protocoles a abouti au classement des différents bétons testés vis-à-vis de la résistance à l'attaque sulfatique externe.

La corrélation établie entre la résistance et le module dynamique permet d'utiliser une méthode non destructive pour évaluer les conséquences mécaniques

Mots clés : Béton autoplaçant, attaque sulfatique externe, altération, module dynamique, module d'Young Production

Abstract

In this paper one considers; A numerical distance protection based on the dialogue of two protections using the numerical technology of relay 7SA612 and REL316*4: Which constitutes a powerful means in term of speed and of selectivity for the elimination of the lines and bars faults in connecting stations, it can also ensure a " distant " help under good conditions. This will make it possible to have permanently two protections of numerical distance to supervise the decentralized production connected through a HV line. Some simulation results are given to confirm that.

Keywords : Self-compacting concrete, external sulphate attack, alteration, dynamic modulus, Young's modulus.

R. KHELIFA^{1,2},
X. BRUNETAUD²,
H. CHABIL¹,
M. AL-MUKHTAR²

¹Département de Génie Civil,
Université Mentouri
Constantine, Algérie.

²Centre de Recherche sur la
Matière Divisée,
CNRS-CRMD d'Orléans -
Ecole Polytechnique,
Université d'Orléans –
1b, rue de la Ferronnerie,
45071 Orléans Cedex 2
France

ملخص

الخرسانة الذاتية الوضع تتميز عن الخرسانة العادية بخصائصها في الحالة اللدنة. فهي قادرة على التدفق تحت تأثير وزنها الذاتي مهما كان تعقيد مكان صبها وتظل متجانسة خلال التدفق. لتحقيق هذه المواصفات، تصاغ الخرسانة الذاتية الوضع بشكل مختلف عن الخرسانة العادية.

الهدف من البحث المقدم في هذه الرسالة هو دراسة تأثير هجوم الكبريتات الخارجية على الخرسانة الذاتية الوضع. لهذا الغرض أعدت أربعة أنواع من الخرسانة الذاتية الوضع مشكلة من الأسمنت، الحصى وإضافات. كل خرسانة خضعت لأربعة بروتوكولات مختلفة لهجوم الكبريتات الخارجية وهي: الغمس الكلي، الغمس والتجفيف عند 105°C مئوية، الغمس والتجفيف عند حرارة 60°C مئوية، وتعريض العينات الى بخار مالح.

الكلمات المفتاحية: صلب - خرسانة - عناصر الربط - تجربة - كمره مركبة

Les bétons autoplaçants (BAP) désignent des bétons très fluides, homogènes et stables, mis en place sans vibration. Leur compaction s'effectue par le seul effet gravitaire et ils confèrent à la structure une qualité au moins équivalente à celle correspondant aux bétons classiques mis en œuvre par vibration. Les bétons autonivelants (BAN) correspondent aux applications horizontales de type dallage tandis que le terme BAP concerne plus particulièrement des applications verticales de type voiles et poteaux.

Les BAP et BAN se distinguent des bétons ordinaires principalement par leurs propriétés à l'état frais. Ces propriétés particulières sont évaluées par des tests d'étalement en utilisant le cône d'Abrams et les anneaux japonais, ainsi que des tests de stabilité et de ressuage [1].

La formulation des bétons autoplaçants se distingue de celle des bétons ordinaires par une présence plus importante de volume de pâte (pâte = ciment + fines + eau + adjuvants). Un superplastifiant haut réducteur d'eau et un agent colloïdal ont été utilisés comme adjuvants. Le superplastifiant augmente la maniabilité du béton, son dosage est limité pour éviter les risques de ségrégation et de ressuage. L'agent colloïdal peut être utilisé pour limiter l'effet négatif du superplastifiant, ou plus généralement pour améliorer la stabilité des bétons fluides [2, 3].

Cette étude, s'intègre dans une recherche dont l'objectif est de développer, en utilisant exclusivement des matériaux disponibles en Algérie, des formulations de BAP et BAN aux caractéristiques à l'état frais satisfaisantes et durables. Le premier point de recherche consiste à formuler des bétons autoplaçants en utilisant des agrégats concassés, majoritairement disponibles en Algérie. La notion de durabilité de ces bétons, qui fait l'objet du second point de cette étude, est testée vis-à-vis de l'attaque sulfatique externe, du fait que l'environnement algérien est potentiellement propice au développement de cette pathologie comme la construction sur terrains gypseux très humides durant l'hiver [4].

Deux protocoles ont été appliqués à tous les bétons: l'immersion complète et l'immersion/séchage à 60°C.

1. MÉTHODE EXPERIMENTALE

La campagne expérimentale repose sur la fabrication et le test d'échantillons cylindriques (4x8 cm) en béton prélevé par carottage sur des éprouvettes 11x 22 cm (Figure 1). Deux paramètres sont étudiés pour évaluer l'influence de la formulation du béton : le rapport E/C et le type de ciment (Tableau 1).

La porosité des différents types de béton a été déterminée après la conservation des échantillons dans l'eau jusqu'à saturation puis leur séchage à 60°C jusqu'à stabilisation de leurs poids.

Pour tous les protocoles, le poids et le temps de propagation du son à travers les éprouvettes sont relevés pour tous les échantillons chaque semaine. Le module dynamique se déduit de la vitesse de propagation du son par la relation suivante : $G = V^2 \times \rho$, G est le module dynamique en N/m^2 , V est la vitesse en m/s et ρ est la masse volumique en kg/m^3 .



Figure 1 : Confection des mini-cylindres 4x8cm

Ce module dynamique sert à caractériser de manière non destructive les caractéristiques mécaniques des échantillons, et ainsi de détecter un endommagement du matériau.

Les tests de résistance à la compression à 28 jours ont été effectués sur des éprouvettes 11x22 cm. Chaque échantillon a été testé à 0 et 30 jours d'exposition pour les deux protocoles.

Dans le cas d'un endommagement significatif, un test est systématiquement réalisé une fois l'endommagement stabilisé.

Tableau 1 : Composition et résistance à court terme des différents BAP

Dénomination	L'immersion complète et l'immersion/séchage à 60°C			
	CEMII/59	CEMI/59	CEMII/49	CEMI/49
Ciment de classe 42,5 dosé à 350 kg/m^3	CEM II (L)	CEM I*	CEM II (L)	CEM I*
Eau/Ciment	0,59	0,59	0,49	0,49
Superplastifiant	1,4 %	1,1 %	2,0%	1,6%
Agent colloïdal	0,05%	0,05%	-	-
R_c à 7 j [MPa]	16,1	23,3	24,0	32,8
R_c à 28 j [MPa]	18,1	29,6	27,9	38,0

* ciment classé résistant aux sulfates CPA-CEM-42.5 selon la norme [NA443]

Les deux protocoles sont susceptibles de générer une attaque sulfatique externe.

L'immersion complète est le protocole le plus utilisé dans la bibliographie [5, 6], il simule le cas typique de l'attaque des bétons par les sulfates issus de la pollution des sols, notamment dans le cas de sols gypseux saturés. Dans ce protocole, les éprouvettes en béton sont immergées dans de l'eau dosée à 5% de $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ à 20°C et renouvelée tous les 30 jours.

L'immersion/séchage est généralement un protocole utilisé pour l'accélération du vieillissement pour les pierres comme pour les bétons [7, 8]. La température de séchage de ce test a été baissée a été fixée à 60°C pour éviter tout risque de générer une réaction sulfatique interne [9].

Dans ce protocole, les éprouvettes de béton sont immergées dans l'eau dosée à 5 % de Na_2SO_4 , $10\text{H}_2\text{O}$ à 20°C [10 et 11] pendant 4 heures (saturation complète) puis séchées dans une étuve à 60°C pendant 20 heures, ce qui fait un cycle immersion/séchage de 24 heures.

Ce protocole a été choisi dans l'objectif d'accélérer le vieillissement des bétons causé par l'immersion complète en favorisant leur endommagement par l'attaque sulfatique externe [12].

2. RESULTATS ET DISCUSSION

2.1. Résistances initiales et porosités

Les bétons les plus poreux sont les moins résistants, comme le montre le tableau 2. Alors que les deux ciments utilisés sont de la même classe (42,5), les résistances des bétons issus de ces deux ciments diffèrent pour un même rapport E/C.

La différence de porosité permet d'expliquer en partie cette différence de résistance.

Tableau 2 : Valeurs des porosités et des résistances à 28j des quatre types de béton

	CEMII/59	CEMII/49	CEMI/59	CEMI/49
Porosité [%] ± 0,5 %	13,8	12,0	10,5	8,7
R_{C28j} [MPa] ± 1 MPa	18,8	29,6	27,9	38,0

2.2. Evolution de la masse et du module dynamique dans le temps

La variation de masse et l'évolution du module dynamique des échantillons exposés à l'immersion complète sont présentées en figures 2 et 3.

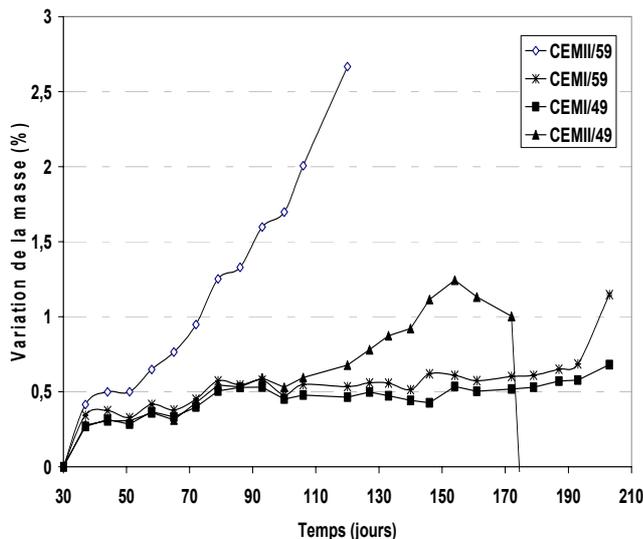


Figure 2 : Variation de masse des échantillons de bétons en immersion complète

En ce qui concerne le protocole d'immersion/séchage à 60°C , ces mêmes grandeurs sont présentées en figure 4 et 5.

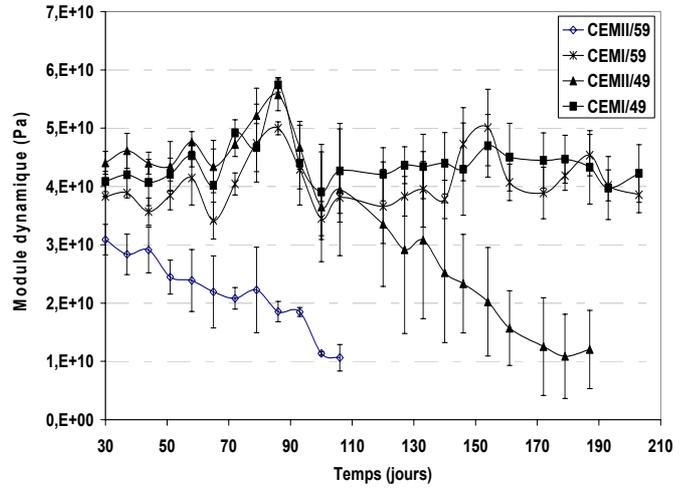


Figure 3 : Evolution du module dynamique des échantillons de bétons en immersion complète

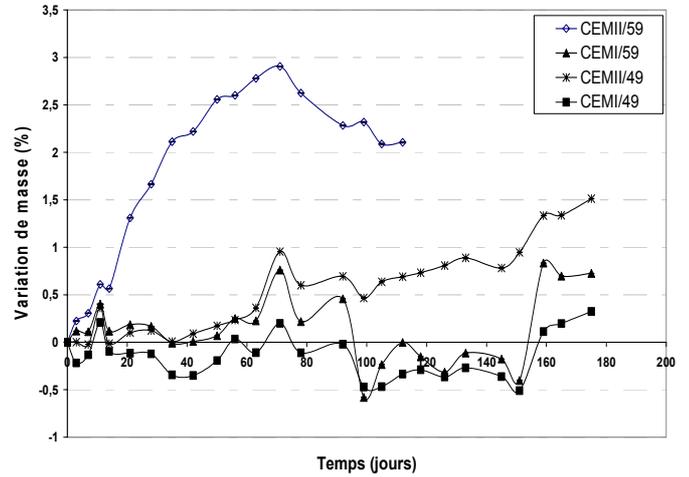


Figure 4 : Variation de masse des échantillons de bétons en immersion/séchage à 60°C

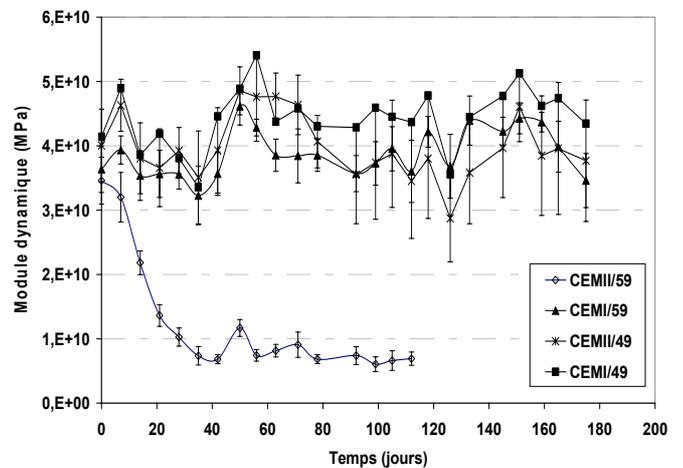


Figure 5 : Evolution du module dynamique des échantillons de bétons en immersion/séchage à 60°C

La figure 6 montre les conséquences macroscopiques de l'immersion complète l'échantillon de béton CEMII/49. Ces photographies révèlent un faïencage de surface correspondant à une fissuration importante des interfaces pâte / granulats, ainsi qu'un gonflement plus prononcé localisé au niveau des extrémités des échantillons, zones qui sont les plus exposées à l'environnement extérieur.



Figure 6 : Photographies des échantillons de béton CEMII/49 ayant subi l'immersion complète

Dans le cas de l'immersion complète, les échantillons CEMII/59 et CEMII/49 se sont endommagés jusqu'à la ruine, tandis que les échantillons CEMI/59 et CEMI/49 sont restés intacts. Pour les deux premiers types, on remarque une diminution importante du module dynamique accompagnée par une augmentation significative de la masse ainsi qu'un gonflement visible des parties les plus exposées des échantillons.

La diminution du module dynamique ainsi que le gonflement localisé sont cohérents avec un phénomène d'endommagement par fissuration importante.

Le gain de masse peut provenir de l'eau qui remplit les fissures, mais aussi d'une masse d'eau utilisée pour précipiter une phase hydratée telle que l'ettringite. Ces symptômes concordent parfaitement avec un cas de réaction de gonflement interne [13].

Du fait que les granulats utilisés sont exclusivement calcaires, il ne peut s'agir d'une réaction alcali-silice. Il s'agit donc inévitablement d'une réaction sulfatique externe.

Dans le cas de l'immersion/séchage à 60°C, c'est un protocole qui permet un vieillissement accéléré de l'attaque sulfatique externe des bétons, seuls les minicylindres issus du béton CEMII/59 se sont entièrement endommagés suite à l'attaque sulfatique externe.

En effet, dans ce cas aussi, on remarque une prise de masse simultanée avec un gonflement de l'éprouvette et une diminution du module dynamique (Figures 4, 5 et 7).



Figure 7 : Photographie de l'échantillon de béton CEMII/59 ayant subi l'immersion/séchage à 60°C.

Les principaux symptômes macroscopiques de l'attaque sulfatique externe sont les suivants : gonflement de l'échantillon, prise de masse et fissuration affectant les caractéristiques mécaniques du matériau. A ce jour, les seuls bétons qui révèlent sans équivoque ces symptômes sont les bétons confectionnés à partir du CEMII/59 et du CEMII/49 pour l'immersion complète et du CEMI/59 pour l'immersion – séchage à 60°. Tous ces échantillons présentent un gonflement localisé de l'ordre de 10 % mesuré sur le diamètre et une fissuration importante. Concernant le CEMI/59 et le CEMI/49, les échantillons ne présentent aucun signe d'altération.

2.3. Comparaison des comportements : béton saint / endommagé

Deux exemples de courbes de comportement contrainte / déformation sont représentés en figure 8, pour un même béton : avant et après exposition aux sulfates pendant 30 jours à l'immersion/séchage à 60°C. Cette figure montre à quel point l'endommagement généré par l'attaque sulfatique externe affecte à la fois la résistance et le module d'Young. Il devient aussi possible de constater que l'allongement à la rupture augmente lorsque le béton est endommagé, tandis que sa résistance et son module d'Young diminuent. Ces modifications peuvent être attribuées à l'ouverture de fissures, qui tendent à se refermer durant un essai de compression.

2.4. Corrélation entre l'immersion complète et l'immersion/séchage à 60°C

Il ne semble pas a priori exister une corrélation entre les essais en immersion/séchage à 60°C et l'immersion complète, pour l'essai correspondant au CEMII/49.

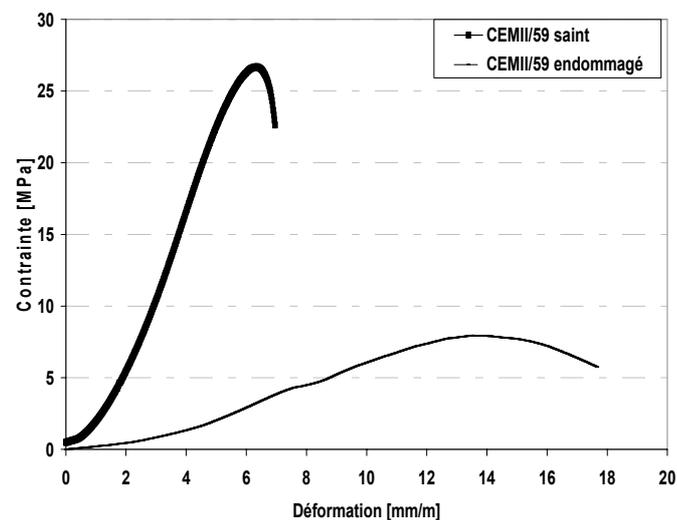


Figure 8 : Conséquence de l'attaque sulfatique externe sur le comportement d'un béton sain

En effet, les échantillons du CEMII/49 semblent ne pas s'endommager suite à l'exposition à l'immersion séchage tandis qu'ils s'endommagent suite à l'exposition à l'immersion complète.

La Figure 9 permet d'affiner la comparaison des protocoles et de montrer qu'il existe bien un léger endommagement du CEMII/49 exposé à l'immersion/séchage à 60°C, sur la période 80-120 jours.

La dispersion générale des mesures de module dynamique tend à rendre cet effet uniquement faiblement significatif. Par conséquent, il existe bien une corrélation entre ces deux protocoles, même si l'immersion séchage se montre moins agressive à long terme.

Comme le montrent les travaux de Pavoine [7], l'exposition à plusieurs cycles d'immersion/séchage peut accélérer l'effet d'une réaction sulfatique, tandis qu'une exposition prolongée peut avoir l'effet inverse. Une meilleure solution pourrait donc consister à réaliser un nombre de cycles d'immersion/séchage à 60°C restreint puis d'exposer les échantillons à une immersion complète.

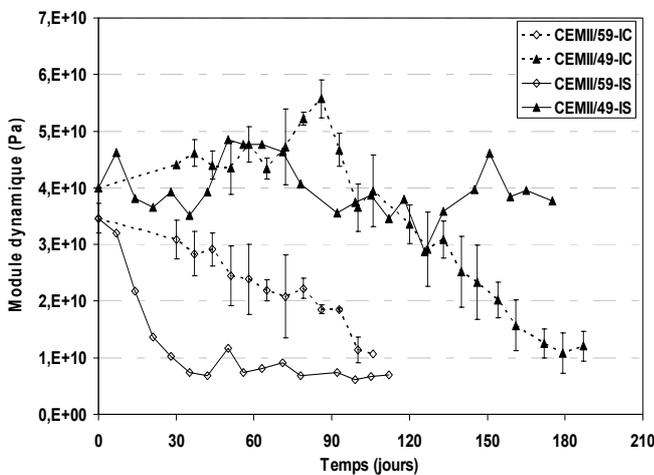


Figure 9 : Comparaison des protocoles : immersion / séchage à 60°C et immersion complète

D'après la figure 10, la durée d'exposition aux cycles d'immersion/séchage doit être inférieure à 100 jours, puisqu'à cette date, il n'existe plus de différence significative entre les deux protocoles.

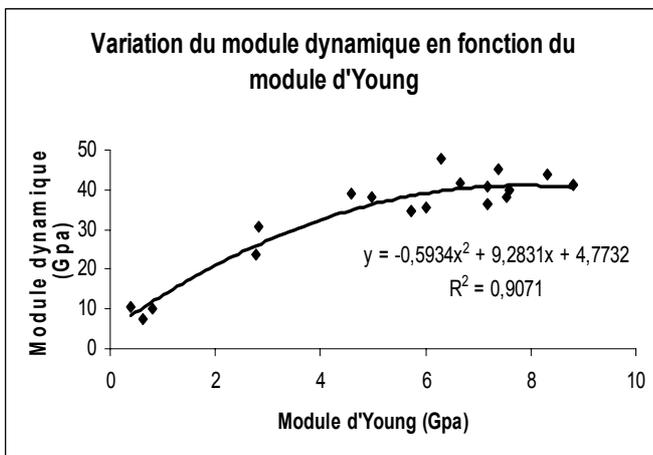


Figure 10 : Variation du module d'Young en fonction du module dynamique

2.5. Relation entre le module dynamique et la contrainte maximale à la compression

La figure 10 montre qu'il est possible de relier les mesures du module dynamique aux mesures du module d'Young par une relation de type parabolique. Cette relation peut donc être utilisée pour évaluer le module d'Young de tous les bétons, à partir de la mesure du module dynamique, qui est beaucoup plus simple et rapide à réaliser.

Pour compléter cette relation, une très bonne corrélation existe entre le module d'Young et la résistance à la compression, comme le représente la figure 11.

Il devient ainsi possible d'estimer avec une bonne précision l'évolution des principales caractéristiques mécaniques des bétons (résistance et module d'Young) au cours de leur exposition, à partir d'une mesure du module dynamique, qui est une méthode rapide et non destructive.

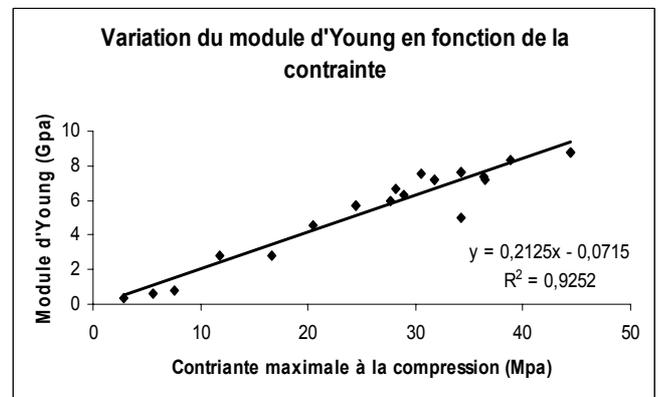


Figure 11 : Variation du module d'Young en fonction de la contrainte maximale

CONCLUSION

La durabilité des quatre types de bétons autoplaçants a été testé vis-à-vis de l'attaque sulfatique externe en utilisant deux protocoles différents ; l'immersion complète et l'immersion – séchage à 60°C.

Le premier est le protocole classique dans ce genre d'attaque et le second est un protocole d'accélération du vieillissement. Les deux protocoles ont généré un endommagement. Le béton le plus faible a été endommagé le premier et les bétons confectionnés avec le ciment CEMI n'ont pas été affectés.

Le protocole immersion – séchage à 60°C fonctionne effectivement comme un protocole d'accélération pour les bétons dont E/C=0.59, tandis que l'endommagement qu'il provoque dans les bétons dont E/C=0.49 est peu significatif. Une meilleure solution pourrait donc consister à réaliser un nombre de cycles d'immersion – séchage à 60°C restreint puis d'exposer les échantillons à une immersion complète.

La corrélation établie entre la résistance et le module dynamique permet d'évaluer les conséquences mécaniques d'une manière continue, rapide et non destructive.

REFERENCES

- [1] AFGC, Bétons atoplaçants – Recommandations provisoires, Juin 2000.
- [2] Sedran T., Thèse de Doctorat en Structure et Matériaux, « Rhéologie et rhéométrie des bétons - Application aux bétons autonivelants », Ecole Nationale des Ponts et Chaussées de Nantes, le 08 Mars 1999.
- [3] Turcry P., Thèse de doctorat en Génie Civil, « Retrait et fissuration des bétons atoplaçants – Influence de la formulation », Ecole Centrale de Nantes, Université de Nantes, le 3 février 2004.
- [4] Rapport L.T.P.Est, «Pont d'Oued Djeddi de Biskra (Algérie)», Constantine, Avril 2004.
- [5] Kenai S. and all, «Mechanical and durability properties of cement mortar with Algerian natural pouzzolana», Springer Science+Business Media, LLC 2006.
- [6] Merida A. and all, «Contribution à l'étude de la corrosion des BHP de pouzzolane en milieu sulafaté», L.B.E, Université Houari Boumediene, Alger, 2005.
- [7] Pavoine A. Evaluation du potentiel de réactivité des bétons vis-à-vis de la formation de l'ettringite, thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, 2003.
- [8] EN 12370 standard. 1999. «Natural stone test methods – determination of resistance to salt crystallization», 7p
- [9] Brunetaud X. «Etude de l'influence de différents paramètres et de leurs interactions sur la cinétique et l'amplitude de la réaction sulfatique interne au béton», Thèse de doctorat, Ecole Centrale des Arts et manufactures, Ecole Centrale de Paris, 2005.
- [10] Sahmaran M. and all, «Sulfate resistance of plain and blended cements esposed to wetting-drying and heating-cooling environments», Construction and Building MATERIALS, 2006.
- [11] Sahmaran M. and all, «Effects of mix composition and water-cement ratio on the sulphate resistance of blended cements», Science Direct, January 2007.
- [12] Khelifa R. and All, «Effet de l'attaque sulfatique externe sur les bétons atoplaçants», GEODIM08, 3 et 4 Avril 2008.