

Étude de l'évolution de la réaction alcalis-silice par méthodes ultrasoniques

François Saint-Pierre, Patrice Rivard, Bruno Sauriol, Gérard Ballivy,
GRAI, Département de génie civil, Université de Sherbrooke, Canada J1K 2R1

RÉSUMÉ:

Il existe actuellement de nombreuses méthodes destructives mettant en évidence les dommages causés par la réaction alcalis-silice (RAS). Les méthodes reposent sur des expériences parfois longues à réaliser et qui ont pour inconvénient d'être destructives. Dans cet article nous proposons des techniques alternatives, appartenant aux méthodes non destructives, permettant de suivre l'évolution de la RAS dans le temps. Ces techniques reposent sur l'étude du comportement des ondes ultrasonores qui se propagent dans les bétons atteints de RAS. Ces méthodes sont au nombre de deux et leur principe repose sur l'étude des vitesses d'onde de volume et sur l'analyse spectrale de l'atténuation des ondes ultrasonores. Les résultats obtenus, à partir des deux méthodes, sont comparés à des essais connus de caractérisation de la RAS. Trois mélanges de béton ont été fabriqués avec des granulats réactifs et un autre mélange avec des granulats non réactifs servant de mélange témoin.

Certaines éprouvettes ont été placées quelques centimètres au-dessus de l'eau, dans des seaux fermés hermétiquement et à température ambiante (18-23°C). D'autres ont été plongées dans une solution à 1 mol/l de NaOH et placées à 38°C. Les essais mécaniques sur les éprouvettes réactives ont montré que le module de Young était plus affecté que la résistance en compression simple. Les mesures des vitesses d'onde de compression sur les éprouvettes de béton réactif ne varient pas de manière significative avec l'expansion. L'étude des ondes ultrasoniques dans le domaine des fréquences et en prenant en compte la masse volumique et la longueur des échantillons semble être mieux appropriée pour l'étude de l'endommagement liée à la RAS car les éprouvettes réactives présentent une atténuation caractéristique qui évolue avec l'expansion et le degré d'endommagement.

1 INTRODUCTION

La réaction alcalis-silice (RAS) est une réaction chimique, impliquant certains granulats siliceux et les ions hydroxydes alcalis dissous dans la solution interstitielle du béton. Cette réaction se manifeste par la fissuration et le gonflement des bétons et elle se déroule sur des périodes de temps très longues. L'étude de l'évolution de la RAS dans un ouvrage en service est donc très importante. Traditionnellement, cette étude a surtout été effectuée par des méthodes destructives conventionnelles (essais mécaniques, analyse pétrographique de plaques polies et étude quantitative de carottes de béton). Cependant, il n'existe pas beaucoup d'études sur le suivi de l'évolution de la RAS par des méthodes non destructives. Une étude préliminaire avait été présentée à l'occasion du colloque précédent [1]. On y indiquait que la distribution et l'orientation de la microfissuration associée à la RAS, dans un contexte d'expansion libre, étaient aléatoires et que cette caractéristique serait mieux définie par la mesure de l'atténuation de l'énergie spectrale des ondes ultrasonores plutôt que par la mesure de la vitesse de ces ondes.

En effet, les principales méthodes non destructives utilisées pour évaluer l'état d'endommagement lié à la RAS reposent essentiellement sur l'étude des ondes ultrasonores et, en particulier, sur les vitesses de propagation des ondes de compression et de cisaillement. Cependant les conclusions ne sont pas toujours évidentes. Pour le moment plusieurs travaux indiquent que les vitesses d'onde de volume, se propageant dans les bétons atteints de RAS, diminuent avec l'expansion [2-7]. Mais d'autres travaux montrent que ces vitesses ne sont que

très légèrement affectées par la RAS même lorsque l'expansion des éprouvettes étudiées est élevée [8-10].

Dans cet article, deux méthodes ultrasoniques sont comparées et des méthodes destructives sont utilisées pour caractériser l'évolution de la RAS. Il a aussi été effectué une comparaison entre l'atténuation des ondes ultrasonores qui se propagent dans le béton et le taux d'expansion engendré par la RAS. Des mesures de vitesse d'ondes ultrasonores et des essais de compression simple ont aussi été réalisées afin de suivre l'évolution de la RAS sur une période de plus de trois mois.

2 MÉTHODOLOGIE

2.1 Granulats

Deux types de granulats réactifs (calcaire Spratt et pierre volcanique du Nouveau-Mexique) ont été utilisés pour la fabrication des éprouvettes de béton. Ces granulats sont reconnus pour leur très grande réactivité dans le béton. Un granulats non réactif a aussi été utilisé pour les mélanges témoins : le calcaire Limeridge. Le sable utilisé est le sable polycristallin naturel et est composé de grains de quartz, de feldspath et de particules métasédimentaires.

2.2 Formulation des bétons

Chaque mélange a été conçu afin de suivre l'évolution de la RAS par des méthodes ultrasoniques et d'établir des critères d'endommagement engendrés par la RAS. La composition des mélanges réactifs A et B se veut proche de celle des bétons que l'on retrouve dans les ouvrages de génie civil. Le mélange C (non réactif) sert de témoin au mélange D (réactif).

La composition des différents mélanges de béton est donnée au tableau 1. Un ciment Portland type 10, à haute teneur en alcalis (0,90% $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$), a été utilisé dans tous les mélanges. Des granules de NaOH ont été ajoutées à l'eau de gâchage afin de rehausser la concentration totale en alcalis des quatre mélanges ($5,25 \text{ kg.m}^{-3} \text{ Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$). Un agent entraîneur d'air a été utilisé dans les mélanges A et B. Les bétons réactifs de mélange A et B contiennent 75% de calcaire Spratt et 25% de pierre volcanique du Nouveau-Mexique. Le béton réactif du mélange D contient uniquement du calcaire Spratt alors que le mélange non réactif (B) a été fabriqué avec du calcaire Limeridge.

Tableau 1: Formulation des bétons

Mélange	A (réactif)	B (réactif)	C (non réactif)	D (réactif)
E/C	0,66	0,75	0,50	0,50
Granulats	75% Nouveau-Mexique 25% Spratt (5-20 mm)	75% Nouveau-Mexique 25% Spratt (5-20 mm)	Limeridge (5-20 mm)	Spratt (5-20 mm)
Ciment (kg.m^{-3})	390	210	350	350
Eau (kg.m^{-3})	258	158	175	175
Granulats (kg.m^{-3})	1140	705	953,8	946,7
Sable (kg.m^{-3})	720	1133	946,3	946,7
$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ (kg.m^{-3})	5,25	5,25	5,25	5,25

2.3. Forme et conditions d'entreposage des éprouvettes

Un total de 16 prismes (75x75x300 mm) munis de plots de déformation aux extrémités et de 100 cylindres (100x200 mm) ont été fabriqués pour chacun des mélanges. Les éprouvettes ont été démoulées après 24 heures puis placées dans différentes conditions environnementales. A et B ont été placés, à température ambiante (18-23°C), au-dessus de quelques centimètres d'eau, dans des seaux fermés hermétiquement. Les éprouvettes des mélanges C et D ont été plongées dans une solution de NaOH (1 mol/l) maintenue à 38°C. L'expansion a été suivie régulièrement pendant plus d'un an pour les mélanges A et B et pendant plus de 6 mois pour les mélanges C et D. Les cylindres ont été utilisés pour les essais destructifs, tels que les essais mécaniques, et aussi pour les essais ultrasoniques.

3. DESCRIPTION DES ESSAIS

3.1 Détermination des propriétés mécaniques

Les essais mécaniques ont été réalisés à différentes périodes sur les cylindres de béton réactif et non réactif afin de déterminer la résistance à la compression simple et le module d'élasticité du béton et l'effet de la RAS sur ces propriétés. Les cylindres des mélanges A et B ont été placés dans les mêmes conditions de température et d'humidité que les prismes du même mélange (soit à 18-23°C au-dessus de l'eau) et ceux des mélanges C et D ont été placés au-dessus de l'eau dans des seaux fermés hermétiquement et maintenus à 38°C. Les essais ont été réalisés à 4, 13, 18 et 26 semaines pour les mélanges A et B et 4, 9 et 14 semaines pour les mélanges C et D.

3.2 Mesures des vitesses d'onde ultrasonique

Cet essai a pour but de suivre l'évolution des vitesses de propagation des ondes de compression de chaque mélange. Les mesures ont été effectuées sur des cylindres 100x200 mm avec un appareil de type Pundit® et en suivant la norme ASTM C597 [11]. Les cylindres de l'ensemble des mélanges ont été placés dans les mêmes conditions de température et d'humidité que les prismes du même mélange (mélanges A et B maintenus à 18-23°C au-dessus de l'eau et mélanges C et D plongés dans une solution de NaOH à 38°C).

3.3 Mesures de l'atténuation des ondes ultrasonores dans le domaine spectral

L'objectif de cette méthode est de mesurer la réponse spectrale d'une éprouvette de béton soumise à une excitation ultrasonique afin de quantifier son état d'endommagement. L'appareillage utilisé dans cette étude est composé de deux transducteurs avec une fréquence centrale de 250 kHz, un générateur de signal, un oscilloscope numérique et un ordinateur muni d'un système d'acquisition (Figure 1). La forme du signal émis par le générateur est un rectangle de largeur 1 μ s et d'amplitude 20 V. Par conséquent, le spectre de ce signal est plus large que le spectre propre des capteurs. La fréquence d'échantillonnage est de 4 MHz et la taille de la fenêtre d'acquisition est de 0,5 ms. La fonction moyennage de l'oscilloscope sur 1024 échantillons est utilisée afin de réduire au minimum le bruit.

Le signal de sortie $y(t)$ tient compte du spectre propre des capteurs. C'est pourquoi le spectre est corrigé par le produit de convolution entre $y(t)$ et l'inverse fonction $y_c(t)$ correspondant à la signature caractéristique du système ultrasonique (capteurs collés l'un à l'autre). La transformée de Fourier (FFT) de cette déconvolution correspond à une division dans le domaine spectral

(Eq. 1) et permet d'obtenir la réponse spectrale propre du béton $A(f)$ à une sollicitation ultrasonique.

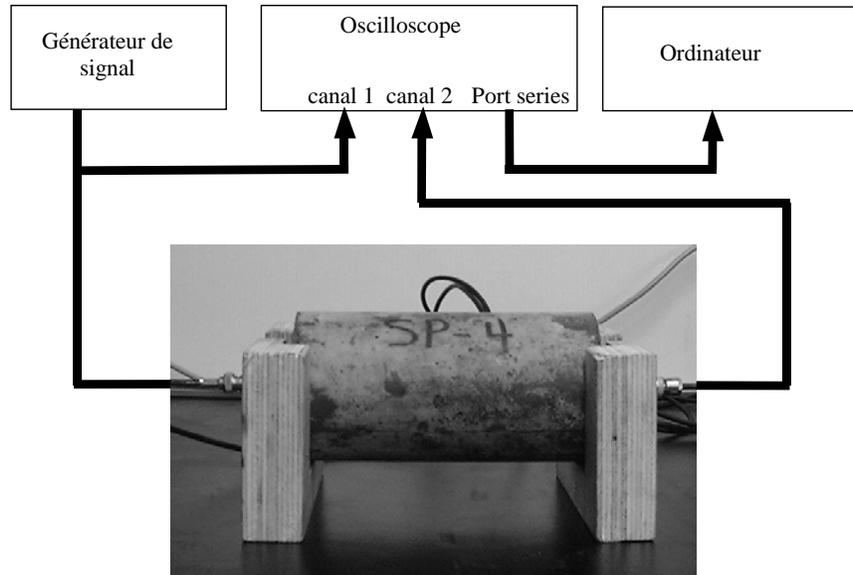


Fig. 1: appareillage ultrasonique

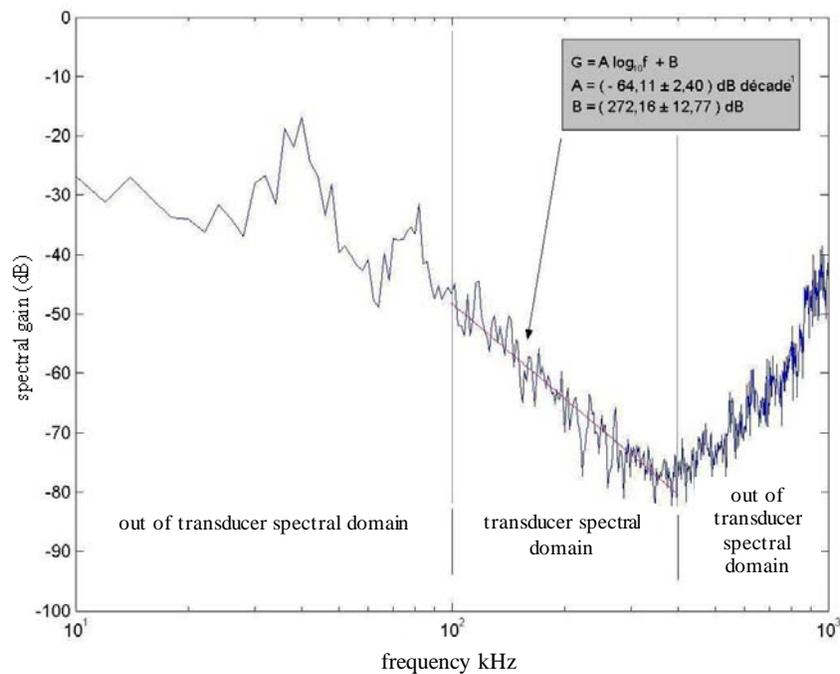


Fig. 2: Moyenne sur quatre mesures de la réponse spectrale d'un échantillon à une sollicitation ultrasonique

$$A(f) = \text{FFT}(y(t) * y_c(t)^{-1}) = \frac{\text{FFT}(y(t))}{\text{FFT}(y_c(t))} \quad (\text{Eq. 1})$$

f : fréquence

Après traitement, les résultats ont montré que la réponse spectrale du béton à une sollicitation ultrasonique est restée encore un peu bruitée. Ce bruit résiduel est lié à la diffraction de l'onde ultrasonique sur les granulats [12]. Afin de minimiser cet effet, quatre mesures sont effectuées sur la même éprouvette en positionnant à chaque fois les capteurs différemment (rotation des capteurs de 180° et échange des faces de cylindre sur lesquelles sont effectuées les mesures). La figure 2 montre que le béton se comporte comme un filtre passe-bas et la pente de ce filtre peut être caractérisée par une droite, dans la représentation log-log (équation dans la figure 2). L'unité de l'atténuation est exprimée en décibel (dB) et est donnée par l'équation 2.

$$A_{dB}(f) = 20 \log_{10}[A(f)] \quad (\text{Eq. 2})$$

$$A_{dBn} = A_{dB} - 20 \cdot \log(l/l_n) \quad (\text{Eq. 3})$$

A_{dBn} atténuation normalisée (dB)

l longueur de l'éprouvette

l_n longueur normalisée

Il est important de préciser que la pente de cette droite de régression est aussi fortement influencée par le contact entre les transducteurs et le béton. Cependant, des essais préliminaires ont montré que la valeur de l'atténuation à une fréquence 100 kHz mesurée sur la droite correspondant à la pente caractéristique du filtre passe-bas (Fig. 2) est stable et est faiblement influencée par le contact entre le béton et le transducteur [13]. C'est pourquoi la fréquence de 100 kHz a été choisie comme indicateur d'endommagement. La longueur et la masse volumique du béton des échantillons influencent aussi les mesures d'atténuation. L'équation (Eq. 3) permet de corriger ces effets.

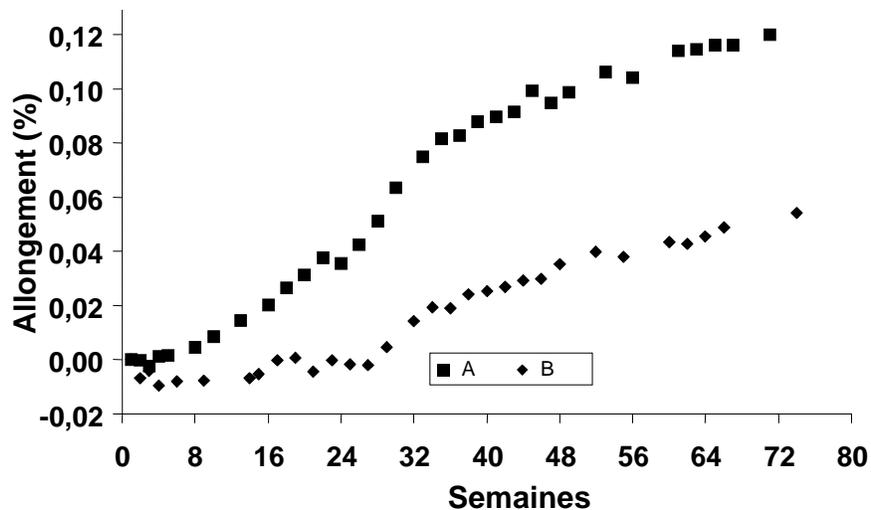


Fig. 3: Allongement en fonction du temps (21°C au-dessus de l'eau)

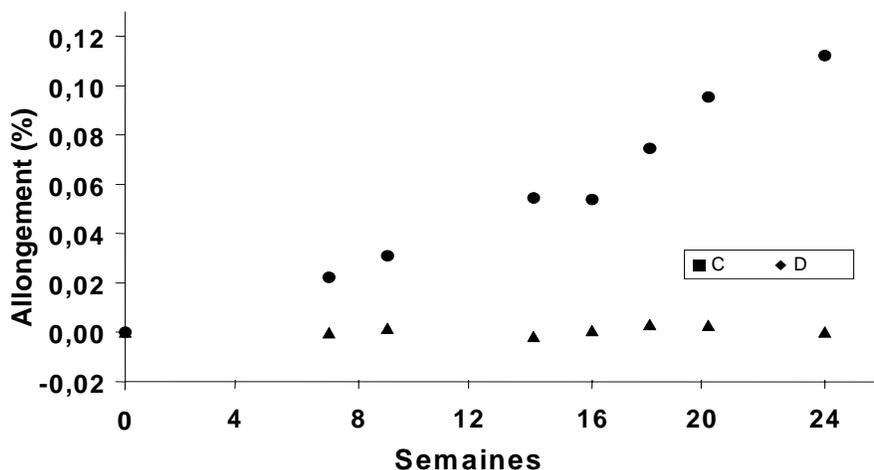


Fig. 4: Allongement en fonction du temps (38°C dans une solution de NaOH)

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1 Essais d'allongement

La courbe d'allongement moyen des éprouvettes réactives est présentée aux figures 3 et 4. Le mélange A présente un allongement quasi constant après 4 semaines alors que les éprouvettes du mélange B commencent à s'allonger à partir de 28 semaines. D'autre part, le mélange A a un taux d'allongement plus élevé que le mélange B car le rapport E/C du premier mélange est plus faible et la teneur en ciment et en granulats de ce même mélange est plus élevée. Le taux d'allongement à 52 semaines est de 0,10% pour le mélange A et de 0,04% pour le mélange B. Le mélange C, qui a été placé dans une solution de NaOH, présente un taux d'allongement encore plus élevé. Après 24 semaines, le taux d'allongement de ce dernier est de 0,11%. Le mélange non réactif (C) n'a pratiquement pas gonflé (0,005 % après 24 semaines).

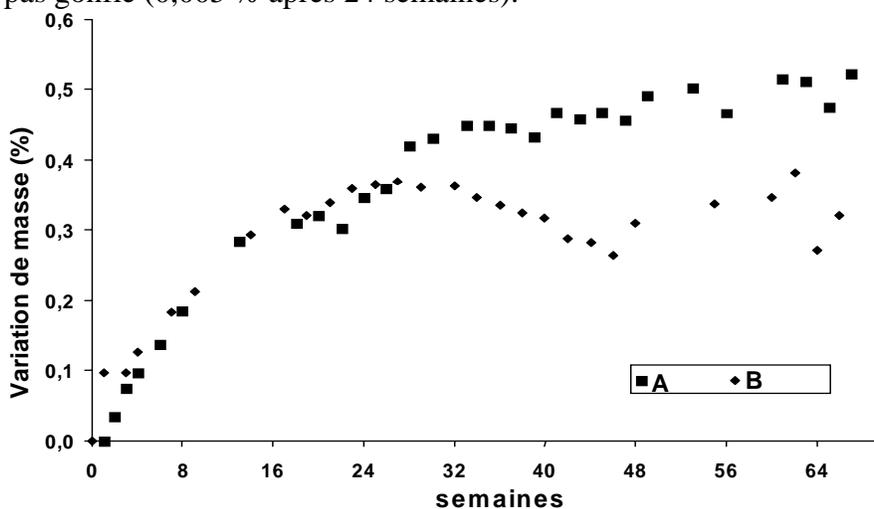


Fig. 5: Variation de masse en fonction du temps (21°C au-dessus de l'eau)

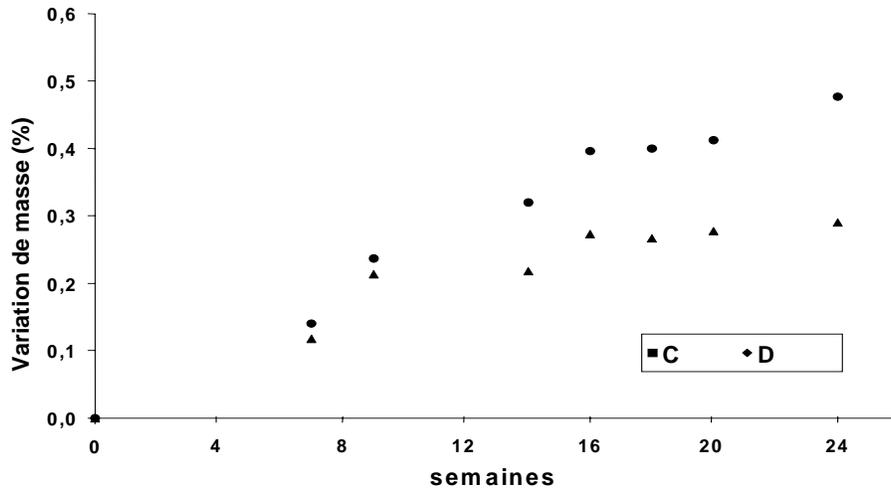


Fig. 6: Variation de masse en fonction du temps (38°C dans une solution de NaOH)

4.2 Mesures de variation de masse

Les figure 5 et 6 montrent que la masse des éprouvettes augmente. Cette tendance est due, de manière générale, à l'absorption d'eau par le béton. La formation de produit de réaction gonflant hydrophile, due à la RAS, accentue la prise de masse. La variation de masse des éprouvettes de mélanges A et B (placées à 21°C au-dessus de l'eau) croît de manière importante pendant 32 semaines (1,25% par semaine) alors que celle des éprouvettes de mélange C et D (placées à 38°C dans une solution de NaOH) croît de manière importante uniquement pendant 16 semaines (2,5% par semaine pour le mélange D et 1,9% par semaine pour le mélange C).

4.3 Essais mécaniques

La figure 7 illustre l'évolution de la résistance en compression simple des quatre mélanges. Il apparaît que la résistance mécanique des éprouvettes non réactives (C) et des réactives (D) augmente et que la RAS n'a pas affecté cette tendance. La résistance des mélanges réactifs A et B varie peu après avoir atteint un état maximal de résistance après 4 semaines et il apparaît encore que la RAS n'a pas affecté, de façon significative, les mesures de résistance à la compression simple de ces mélanges. Il est probable qu'à long terme, on note une décroissance de la résistance chez les mélanges réactifs.

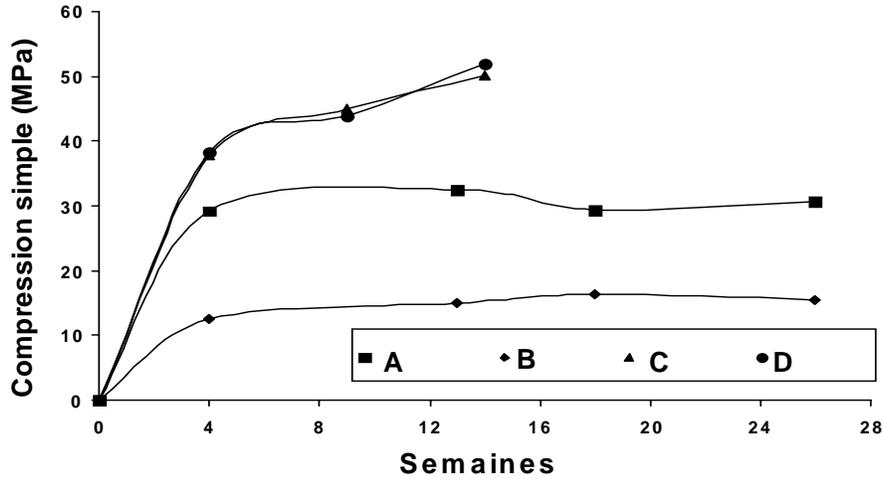


Fig. 7: Résistance à la compression simple

La figure 8 montre que le module de Young est plus sensible à la RAS que la résistance en compression simple, ce qui est en accord avec la littérature [1,2,5-8]. Les éprouvettes de béton non réactif (C) présentent une légère augmentation après 4 semaines alors qu'une tendance nette à la baisse, à partir de cette même date, est observée pour les éprouvettes de béton réactif (A, B et D).

4.4 Vitesse des ondes ultrasoniques des mélanges A et B

L'évolution des vitesses d'onde de compression des bétons de mélange réactif A et B est illustrée à la figure 9. Les vitesses moyennes des ondes se propageant dans les éprouvettes du mélange A sont plus élevées que celles se propageant dans le mélange B, ce qui est en accord avec les propriétés mécaniques mesurées sur ces deux mélanges. Pour les mélanges A et B, qui ont deux mélanges ayant des degrés de réaction différente, il est aussi constaté que les vitesses augmentent durant les 12 premières semaines et diminuent lentement par la suite (entre 12 et 64 semaines) avec la même pente. Rappelons que l'allongement à 64 semaine atteint 0,18% pour le mélange A et 0,04% pour le mélange B.

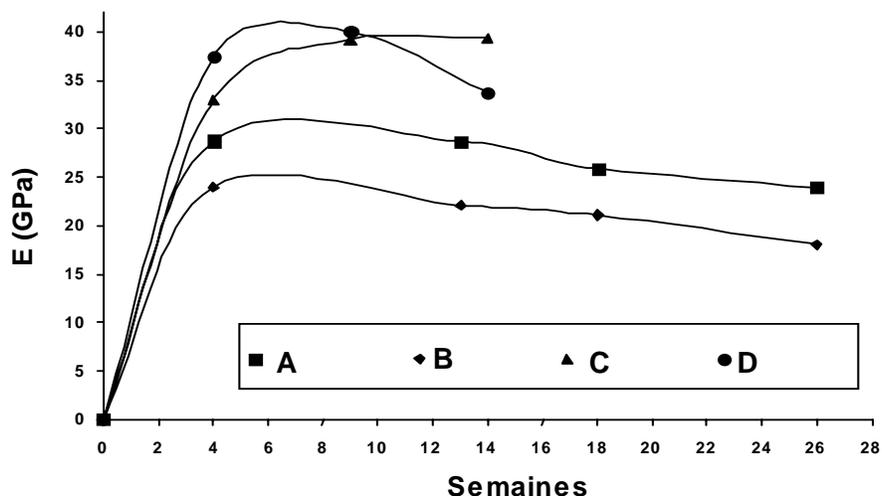


Fig. 8: Module d'élasticité

4.5 Vitesse des ondes ultrasoniques des mélanges C et D

La figure 10 illustre l'évolution des vitesses d'onde de compression des bétons du mélange non réactif C et du mélange réactif D. Les vitesses d'onde de compression se propageant dans les éprouvettes du mélange non réactif C augmentent de 1,0% entre 12 et 24 semaines, alors que celles se propageant dans le mélange D diminuent de 1,0% entre 12 et 24 semaines. La précision de la méthode est de 0,1%. Dans le cas des échantillons réactifs, cette diminution de vitesse est liée à l'apparition de fissures engendrées par la RAS. Mais l'endommagement n'est pas suffisant pour que la diminution de vitesse soit significative.

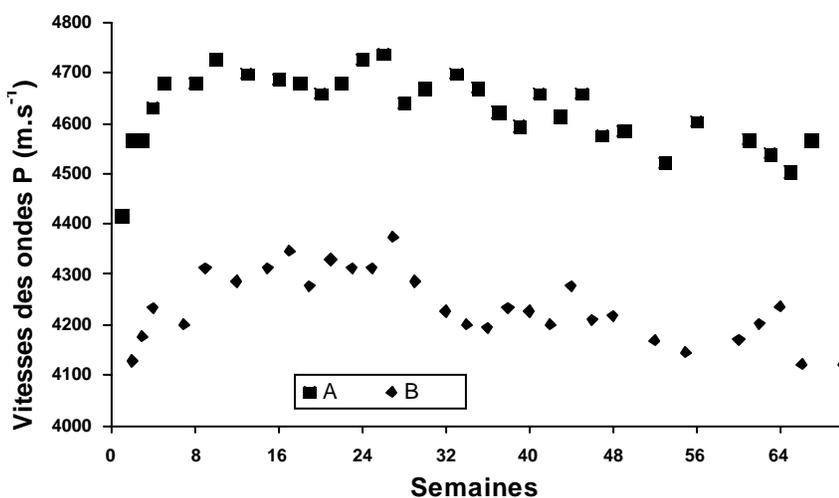


Fig. 9: Vitesses des ondes de compression des bétons de mélange A et B

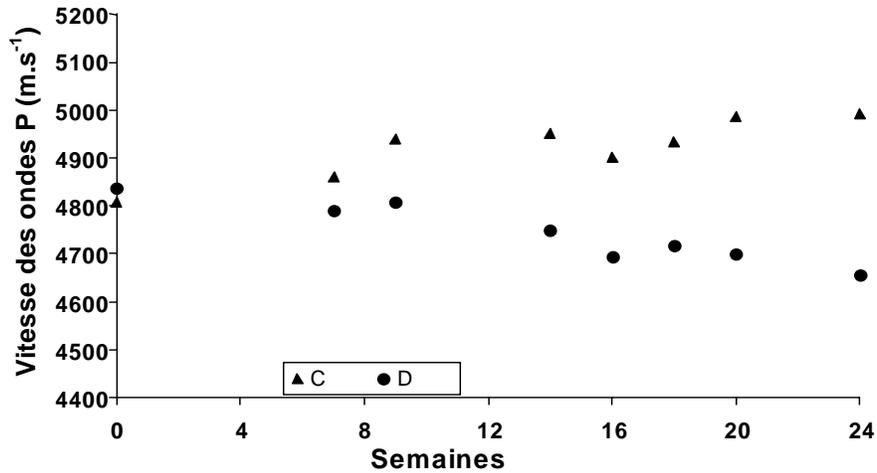


Fig. 10: Vitesses des ondes de compression des bétons de mélange C et D

4.6. Mesure de l'atténuation spectrale des ondes de compression

Les essais ont été réalisés sur des éprouvettes cylindriques de béton réactif D et non réactif C. L'atténuation des ondes ultrasonores des compressions dans les éprouvettes de mélange D augmente avec le temps (1,6 dB.g.cm⁻³ entre 0 et 24 semaines soit 50% en 12 semaines), alors que pour le mélange C, l'atténuation varie très peu et demeure aux environs de 28 dB.g.cm⁻³ (Fig. 11).

L'atténuation à une fréquence de 100 kHz, pour une longueur normalisée de 20 cm et multipliée par la masse volumique, semble être un bon paramètre pour suivre la RAS. En effet les microfissures n'influencent pas beaucoup les vitesses de propagation des ondes de compression dans le béton mais elles ont une influence importante sur l'atténuation. Les valeurs peuvent être comparées à celles obtenues sur un cylindre en aluminium 100x200 mm dont l'atténuation mesurée fut 26,7 dB.g.cm⁻³ (donc très faible comparativement au béton). La précision de la méthode est de ± 1 dB (5%) et la différence d'atténuation, après 24 semaines, entre un béton réactif et non réactif est d'environ 40dB. Ce phénomène est aussi observé in-situ, sur des carottes de forage et aussi lors des essais de tomographie acoustique dans des ouvrages de béton atteint de RAS.

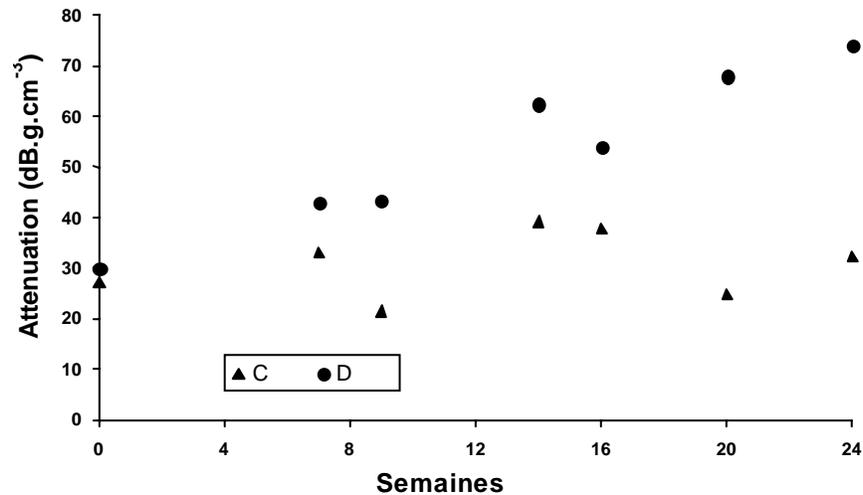


Fig. 11: Atténuation à 100 kHz, corrigée par la masse volumique et normalisée à 20 cm, des bétons de mélange C et D

5. CONCLUSION

L'évolution des dommages engendrés par la RAS sur les éprouvettes de béton fabriquées en laboratoire a été suivie par deux méthodes reposant sur la mesure des vitesses de propagation et de l'atténuation des ondes ultrasonores. Il ressort de cette étude sur l'évolution de la réaction alcalis-silice par des méthodes ultrasoniques que la sensibilité de la méthode de mesure des vitesses n'est pas suffisante pour établir des critères d'endommagement liés à la RAS. Cependant la mesure de l'atténuation à une fréquence de 100kHz, corrigée par rapport à la masse volumique, est un bon paramètre qui permet de suivre l'évolution de la RAS. La sensibilité de cette dernière méthode est bonne (variation de 50% en 12 semaines pour un béton réactif avec une erreur sur les mesures de 5%) mais celle-ci a des limites. En effet, le contact entre le béton et le transducteur, la température, et l'amplitude du signal d'entrée, influencent les mesures.

Des travaux à venir vont être entrepris, avec cette dernière méthode, afin d'établir des critères d'endommagement associés à la RAS. Il va aussi être étudié l'influence des paramètres de construction tels que les granulats et la forme des éprouvettes sur l'atténuation des ondes de volume.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier l'équipe du GRAI, particulièrement le Dr Jamal Rhazi, ainsi que le groupe béton de l'Université de Sherbrooke. L'aide financière a été assurée par les partenaires de la Chaire industrielle CRSNG sur l'auscultation des structures en béton et par le Fonds québécois de recherche sur la nature et les technologies (FQRNT).

REFERENCES

- [1] Rivard, P., Ballivy, G., Rhazi, J., Al-Wardany, R., Guissi, G., Dous, O., Suivi et caractérisation de la RAG par méthodes non destructives, 10^e Colloque sur la progression de la recherche québécoise portant sur les ouvrages d'art, Université Laval, Québec, 2003, 8 p.
- [2] Swamy, R.N. and Al-Asali, M.M., Engineering Properties of concrete affected by alkali-silica reaction. *ACI Materials Journal*, 85(5), 1988, p.367-374.
- [3] Gallias, J.L., Comparison of Damaging criteria for testing aggregates by autoclaving treatment. Proc. de la 11^e CIRAG, Québec, Canada, 2000, p.949-958.
- [4] Kojima, T., Hayashi, H., Kawamura, M., Kuzume, K., Maintenance of highway affected by AAR. Proc. de la 11^e CIRAG, Québec, Canada, 2000, p.1159-1166.
- [5] Ono, K. and Taguchi, M., Long-term behavior of AAR bridge pier and the internal deterioration. Proc. de la 11^{eme} CIRAG, Québec, Canada, 2000, p.1167-1174.
- [6] Ahmed, T., Burley, E., Rigden, S., Abu-Tair, A., The effect of alkali reaction on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Material*, 17(2), 2002, p.123-144.
- [7] Monette, L.J., Gardner, N.J., Grattan-Bellew, P.E., Residual strength of reinforced concrete beams damaged by alkali-silica reaction - Examination of Damage Rating Index method. *ACI Materials Journal*, 99 (1), 2002, p.42-50.
- [8] Hobbs, D.W., Some tests on fourteen year old concrete affected by the alkali-silica reaction. Proc. de la 7^{eme} CIRAG, Ottawa, 1986, p.342-346.
- [9] Pleau, R., Bérubé, M-A., Pigeon, M., Fournier, B., Raphaël, S., Mechanical Behaviour of concrete affected by ASR. Proc. de la 8^e CIRAG, Kyoto, Japon, 1989, p.721-726.
- [10] Amasaki, S., and Takagi, N., The estimate for deterioration due to alkali-silica reaction by ultrasonic spectroscopy. Proc. de la 8^e CIRAG, Kyoto, Japan, 1989, p.839-844.
- [11] ASTM C597, Standard test for pulse velocity through concrete. Norme ASTM, 1997,
- [12] Anugonda, P., Wiehn, J.S., Turner, J.A., Diffusion of ultrasound in concrete. *Ultrasonics*, 39 , 2001, p.429-435.
- [13] Sauriol, B., Mise en place et test d'une méthode permettant de mesurer la réponse spectrale d'éprouvettes de béton soumises à une sollicitation ultrasonore, Chaire CRSNG en auscultation, rapport GRAI-03-07-01, 2003, 36 p.