
Evaluation de la sensibilité à la fissuration des BAP: Apport de l'analyse du comportement viscoélastique.

Hamza SAMOUH^{1 2}

¹ Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM), UMR-CNRS 6183, Centrale Nantes, France.

² Quille construction, Nantes, France.

Prix Jeunes Chercheurs « René Houpert »

RÉSUMÉ. L'optimisation de la composition des Bétons autoplacants (BAP) impose une meilleure compréhension de leur comportement différé. En effet le volume de pâte relativement élevé de ces bétons conduit à un retrait plus grand. Cet aspect peut laisser penser que les BAP sont plus sensibles à la fissuration que les bétons ordinaires. La sensibilité à la fissuration dépend en réalité de nombreux paramètres, dont la relaxation des contraintes de traction. A partir d'un essai de retrait empêché (anneau), on développe ici une approche croisée expérimentale et numérique pour estimer la sensibilité à la fissuration des bétons et le calcul viscoélastique pour expliquer les tendances observées. Elle est ensuite appliquée à l'étude de l'effet de la substitution du ciment par du filler calcaire. Les résultats montrent que la sensibilité à la fissuration diminue avec cette substitution grâce à une plus grande capacité de relaxation des contraintes en situation de retrait empêché.

ABSTRACT. Optimizing the design of Self Consolidating Concrete (SCC) needs a good understanding of their behaviour. In this material the paste volume is higher than in vibrated concrete which leads to higher shrinkage. If we consider only this property, SCC should have a higher cracking sensitivity than ordinary concrete, which is not true. The cracking sensitivity actually depends on several parameters, such as relaxation of tensile stresses. Based on restrained shrinkage test (ring test), a new approach based on experimental and numerical analysis is developed to estimate the concrete cracking sensitivity and the viscoelastic calculation to explain the observed tendencies. Our method is then applied to study the effect of cement substitution by limestone filler. The results show that the cracking risk decreases with the limestone filler ratio thanks to a better stress relaxation.

MOTS-CLÉS: Bétons autoplacants, retrait, relaxation, sensibilité à la fissuration.

KEYWORDS: SCC, shrinkage, relaxation, cracking sensitivity

1 Introduction:

La fissuration des ouvrages en béton exposés à la dessiccation est préjudiciable à la pérennité des structures de bâtiment et de génie civil, car elle peut accélérer la dégradation des ouvrages. Cette question est une nouvelle fois d'actualité avec le développement et l'utilisation de nouvelles familles de béton, dont la maîtrise nécessite un certain acquis scientifique et technologique. Les bétons autoplaçants (BAP), dont l'utilisation ne cesse d'augmenter en France, s'inscrivent dans ce cadre [TUR 04]. En effet, les avantages de ces bétons comme la compaction sous son propre poids ou l'élimination des nuisances sonores et sanitaires liées à la vibration ont conduit plusieurs entreprises à généraliser leur utilisation.

L'expérience acquise avec les bétons ordinaires au niveau de la formulation ou de la mise en œuvre ne suffit pas pour une utilisation optimale des BAP. Ainsi, on a constaté sur des bâtiments l'apparition à long terme de fissurations non structurales. La tendance générale des professionnels est de les lier directement à la classe de résistance [EUR 04] ou au retrait. En effet les BAP ont un volume de pâte plus important et le retrait augmente linéairement avec le volume de pâte [ROZ 07]. Cependant, le phénomène de fissuration est plus compliqué et ne peut pas être déterminé simplement à partir de ces deux paramètres. Bien que le retrait ait une influence effective sur la sensibilité à la fissuration des bétons, plusieurs études s'accordent sur le fait qu'il n'est pas forcément le seul ou même le plus important lors de l'évaluation de la sensibilité à la fissuration des bétons [SWA 79] [BEN 00] [WEI 98] [BEN 02] [BEN 03]. La sensibilité à la fissuration dépend également entre autres du taux d'empêchement et de la relaxation des contraintes [BEN 02] [BEN 03].

Cette dernière composante, liée au fluage du béton, est un paramètre clé pour comprendre l'évolution de la sensibilité à la fissuration mais la détermination expérimentale du fluage en traction pose problème [SAL 12]. En effet, pour une composition de béton donnée, la déformation de fluage dépend de l'âge et du taux de chargement. Ce dernier peut évoluer, même lors d'un essai de fluage propre en traction ou en compression, car les propriétés mécaniques du béton évoluent avec l'hydratation et l'endommagement. En configuration de retrait empêché, ces paramètres ne cessent d'évoluer dès lors que le retrait du béton et les contraintes associées se développent. Des essais de fluage n'apportent donc pas une réponse suffisante pour estimer la contribution de la relaxation. Dans cette étude nous avons adopté une approche couplée fondée sur l'essai à l'anneau [GRA 11], qui permet de déterminer *in vivo* le module différé du béton. Cette approche est appliquée pour comprendre l'influence de la proportion d'addition calcaire sur l'évolution de la sensibilité à la fissuration des BAP. Ce paramètre de formulation est important car il influe fortement sur le coût économique et environnemental du béton. Ainsi, à partir des résultats obtenus la formulation des BAP peut être optimisée de manière à réduire le coût et la sensibilité à la fissuration des bétons.

2 Approches existantes: description, limites et améliorations proposées

Parmi les approches existantes visant à estimer la sensibilité à la fissuration, plusieurs exploitent les résultats de l'essai à l'anneau qui présente une plus grande souplesse et une simplicité par rapport aux autres tests dédiés aux mêmes objectifs [DON 14]. Il permet d'estimer les contraintes de traction [SEE 04] [HOS 06], le coefficient de fluage et même le degré d'empêchement [SEE 04]. Il est apprécié pour sa répétabilité et une grande précision [RAD 09]. Les méthodes d'exploitation des données de cet essai peuvent être regroupées en deux catégories : approches directes et indirectes. Nous allons présenter ces approches et mettre en évidence les améliorations proposées dans le cadre de cette étude.

2.1 Principe de l'essai et représentativité

La disposition d'anneau retenue est celle décrite dans [HOS 04] et [TUR 06] (Figure 1). La contrainte de traction développée dans l'anneau peut être calculée par la formule suivante [SEE 04]:

$$\sigma_t(t) = \frac{E_{st} r_{ic} h_{st}}{r_{is} h_c} \varepsilon_{st}(t) \quad [1]$$

E_{st} : Module d'Young de l'acier, r_{is} : rayon interne de l'anneau en acier (m), h_{st} : épaisseur de l'anneau en acier (m), h_c : épaisseur de l'anneau en béton (m), r_{ic} : rayon interne de l'anneau en béton (m)

Le degré d'empêchement R est donné par la formule suivante [SEE 04]:

$$R = \frac{A_{st} E_{st}}{A_{st} E_{st} + A_c E_c} \quad [2]$$

A_{st} : Section transversale d'acier (m²), A_c : Section transversale du béton (m²), E_c : Module d'Young du béton (GPa).

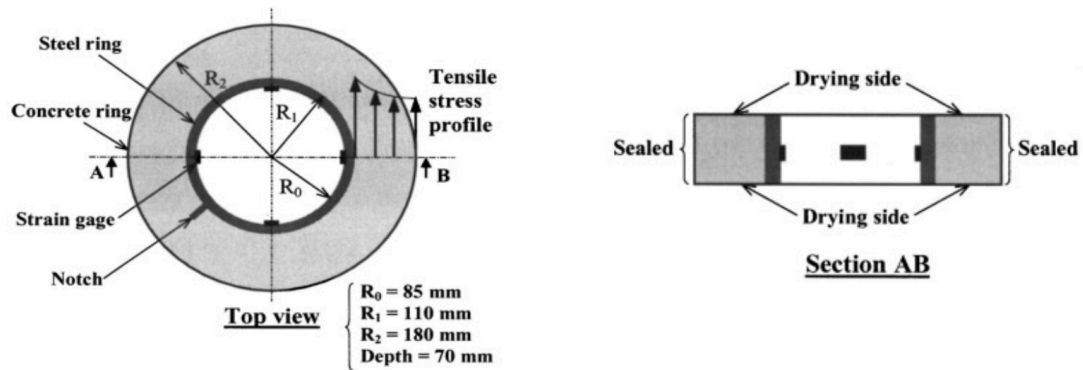


Figure 1. Configuration de l'essai [TUR 06].

Le taux d'empêchement ne dépend pas seulement des données géométriques de l'anneau, mais aussi du module d'Young du béton, qui varie en fonction de la formulation et du vieillissement. Pour les BAP courants le module varie après décoffrage entre 15 GPa et 40 GPa. Le calcul avec ces valeurs de rigidité fournit un taux d'empêchement qui se situe entre 65 et 83 %. Il reste représentatif des structures réelles puisque dans les voiles il varie entre 60% et 100% [BAM 07].

2.2 Détermination de critères de fissuration (ASTM)

Les deux organisations AASHTO et ASTM recommandent l'essai à l'anneau dans les rapports AASHTO [AAS 05] PP34-99 et l'ASTM C1581/C1581M-09a [AST 04]. Généralement, deux critères sont pris en compte lors des essais de fissuration à l'anneau. Le premier est l'âge de fissuration, le deuxième est la contrainte développée à l'intérieur des bétons. L'ASTM propose une combinaison des deux critères pour la détermination du risque de fissuration. Ce risque est classé en quatre catégories : bas, modéré-bas, modéré-élevé, élevé [AST 04]. Ainsi, l'évaluation du potentiel de fissuration d'un béton à partir des essais de retrait empêché à l'anneau, nécessite dans un premier temps le calcul du taux d'augmentation des contraintes lors de la fissuration par le biais de l'équation suivante [AST 04]:

$$q = \frac{G\alpha}{2\sqrt{t_{cr}}} \quad [3]$$

q : Taux d'augmentation des contraintes dans l'échantillon (kPa/jour), si plusieurs tests sont effectués le taux des contraintes S sera la moyenne des différents q calculés à partir des mesures. G : 72,2 GPa, constante proposée par l'ASTM. Pour nos dimensions d'anneau nous proposons une valeur de 185 GPa [SAM 15], t_{cr} : Temps de fissuration ou à la fin de l'essai (j) α : Pente de la régression linéaire de la déformation de l'anneau en fonction de la racine carrée du temps ($\mu\text{m}/\text{m}/\text{j}^{0.5}$). L'indice de fissuration est défini par Kovler [KOV 09] comme :

$$i_f = \frac{S}{t_{cr}} \quad [4]$$

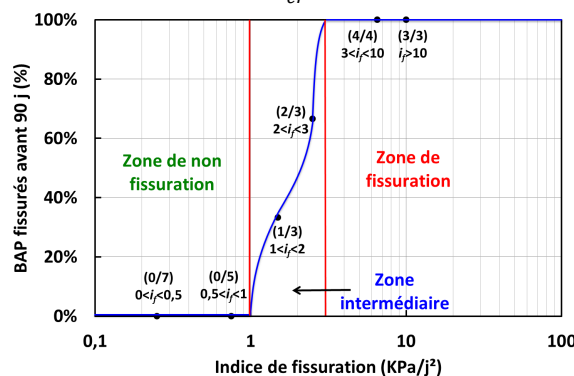


Figure 2. Pourcentage des BAP fissurés avant 90 j en fonction de l'indice de fissuration

Pour mieux clarifier les limites de cette approche nous traçons sur la Figure 2 le pourcentage de bétons fissurés avant 90 j en fonction des indices de fissuration. Les caractéristiques de ces bétons sont données dans

[ROZ 07], [SAM 13] et [TUR 06-2]. Nous identifions trois zones : une de non fissuration ($i_f < 1$), une de fissuration ($i_f > 3$) et une dernière intermédiaire ($1 < i_f < 3$) où la valeur de l'indice ne permet pas de conclure sur la sensibilité à la fissuration.

2.3 Modélisation et calcul viscoélastique

Différentes études s'accordent sur l'importance de la prise en compte de la relaxation dans la détermination des contraintes [WEI 98] [BA 08]. En effet, ce paramètre qui peut être déterminé par un calcul viscoélastique ou estimé à partir d'autres essais menés en parallèle est très important, car il permet une estimation des évolutions de la sensibilité à la fissuration. Grasley utilise le principe de correspondance pour déduire des équations suivantes les expressions viscoélastiques du module d'Young [5], et de la contrainte ortho-radiale dans le domaine de Laplace [6] [GRA 11]. La transformée inverse de ces équations donne l'évolution du module de Young viscoélastique et fournit la contrainte réelle dans l'anneau.

$$\bar{E}^g(s) = \frac{(a^2 - b^2)E^s D_1(s)(b^2(v^c - 1) - c^2(v^c + 1))}{4kb^2 \left(s\bar{\varepsilon}^f(s) - (s + \lambda)\bar{\varepsilon}^f(s + \lambda) \right) + (b^2 - c^2)D_1(s)[(a^2(v^s + 1) - b^2(v^s - 1))]} \quad [5]$$

$$\bar{\sigma}_\theta^c(r, s) = \frac{(b^2 - a^2)\frac{E^s}{s} D_1(s)(c^2 + r^2) - 2k\bar{E}^g(s)((b^2 + r^2)\bar{\varepsilon}^f(s) - (b^2 - c^2)(D_2(s) - r^2\bar{\varepsilon}^f(r, s)))}{2(b^2 - c^2)r^2} \quad [6]$$

$$D_1(s) = s\bar{\varepsilon}_a(s) - \frac{(s + \lambda)}{e^{\lambda t'}}\bar{\varepsilon}_a(s + \lambda) \text{ et } D_2(s) = \int_b^r r' \varepsilon^f(r', t) dr' \quad [7]$$

s la variable dans le domaine de Laplace, k et λ les paramètres de calibration de la fonction du vieillissement $v(t)$ [GRA 11]. La barre au-dessus des différents symboles représente la transformée de Laplace. a , b et c les dimensions géométriques de l'anneau [TUR 06] [SAM 13] [SAM 15].

$$v(t) = k(1 - \exp(-\lambda t)) \quad [8]$$

v^c : Le coefficient de Poisson de l'anneau externe en béton, et v^s le coefficient de Poisson de l'anneau interne en acier, ε_a : Déformation tangentielle mesurée sur la face interne de l'anneau en acier, ε^f : Retrait libre.

La résolution de ces équations ne peut se faire d'une manière analytique. Une approche numérique est nécessaire pour le calcul dans un premier temps des différentes valeurs dans le domaine de Laplace, puis dans un deuxième temps pour les inversions des résultats vers le domaine temporel. Nous avons développé un programme sous Matlab pour la résolution mathématique. L'inversion des équations du domaine de Laplace vers le domaine temporel se fait avec la méthode Zakian [HAS 07].

Pour l'extraction des propriétés viscoélastiques, le retrait libre développé dans le matériau est nécessaire. Grasley [GRA 11] propose sa détermination par des relations liant le retrait à l'humidité relative interne du béton. Les profils d'humidité sont modélisés à partir de la résolution des équations de séchage. Malheureusement, il est difficile d'obtenir les données d'entrée de la modélisation du comportement hydrique réel du béton. Pour contourner cette difficulté nous proposons la détermination du retrait libre de l'anneau à partir de celui mesuré sur des éprouvettes ($\Phi 78$ mm, 280 mm) donné par l'équation [10] en tenant compte des différents rayons de séchage [SAM 12] [SAM 15]. Ainsi dans notre approche les données d'entrée du calcul sont les évolutions temporelles du retrait libre sous forme logarithmique, du module d'Young sous forme exponentielle [8], et la déformation de l'acier de l'anneau [10].

$$\varepsilon^f = \frac{t\varepsilon^\infty}{t + N_s} \quad [9]$$

$$\varepsilon_a = At^B \quad [10]$$

ε^∞ : retrait à long terme, N_s : durée nécessaire pour atteindre la moitié du retrait à long terme. A , B : paramètres de calage des courbes de déformation de l'anneau.

3 Programme expérimental

3.1 Bétons étudiés

Des études antérieures montrent que la substitution du ciment par du filler calcaire impacte la sensibilité à la fissuration des bétons. Elles fondent leur raisonnement sur le fait que la teneur élevée en ciment augmente le

retrait endogène, ce qui fait augmenter le risque de fissuration [BEN 00] [BEN 03] [HOS 04] [BA 08]. Dans notre cas deux séries sont étudiées. Une première série de BAP avec un $D_{max} = 14\text{mm}$ et une deuxième nommée MBAP (micro-BAP) de $D_{max} = 8\text{ mm}$. Chacune contient trois compositions où seule la proportion de filler calcaire varie, à volumes de pâte et d'eau constants.

Tableau 1. Compositions des bétons étudiés.

	BAP 31%	BAP 40%	BAP 46%	MBAP 0%	MBAP 26%	MBAP 41%
Gravier 6/14	840	840	840	-	-	-
Gravier 4/8	-	-	-	790	790	790
Sable	780	780	780	670	670	670
Filler calcaire (A)	170	210	248	0	165	255
Ciment (C)	378	330	291	663	470	365
Superplastifiant	3,5	2,8	2,8	6.2	4.8	5.2
Eau efficace (Eeff)	205	205	205	199	198	199
Eeff/Liant éq.	0,50	0,57	0,65	0,30	0,39	0,50
Volume de pâte	417	415	418	417	414	415
A/(A+C)	31%	40%	46%	0%	26%	41%

3.2 Détermination expérimentale des données d'entrée du modèle

Les deux campagnes expérimentales menées au laboratoire GeM sur les BAP et micro-BAP ont permis de constituer une base de données. Des mesures de retrait libre et empêché sont effectuées pour des durées moyennes de trois mois. Le retrait libre est mesuré sur des éprouvettes ($\Phi 78\text{ mm}$, 280 mm). Les bétons sont soumis aux mêmes conditions de température $20 \pm 1^\circ\text{C}$ et d'humidité relative $50 \pm 5\%$ après leur décoffrage à 24 heures. Le retrait de dessiccation est obtenu par différence entre les mesures de retrait total et de retrait endogène. Les mesures des résistances en compression et en traction (fendage) et des modules sont effectuées à 1 j, 2 j, 7 j et 28 j sur des éprouvettes cylindriques $\Phi 11 \times 22\text{ cm}$.

4 Approche viscoélastique: Application à l'étude de l'effet de la proportion d'addition

4.1 Résultats expérimentaux

Les résultats de la fissuration à l'anneau montrent que dans les deux cas, la composition avec la plus grande proportion de filler a une sensibilité à la fissuration plus faible (Figure 3 et Figure 4).

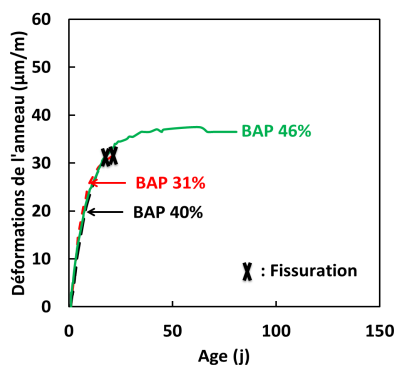


Figure 3. Déformations de l'anneau pour l'étude de l'effet de la substitution du ciment par du filler calcaire

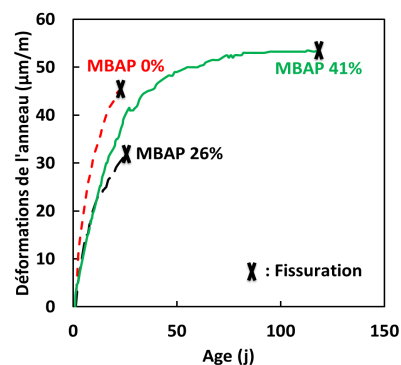


Figure 4. Déformations de l'anneau pour l'étude de l'effet de la substitution du ciment par du filler calcaire

Le raisonnement classique prévoirait un risque de fissuration plus élevé pour les bétons faisant plus de retrait et ayant des résistances plus faibles. Ceci correspond dans la première série au BAP 46% qui au contraire ne fissure pas (Figure 3). Les différents paramètres du calcul viscoélastique sont rassemblés dans le Tableau 2.

Tableau 2. Paramètres de calcul pour l'étude de l'effet de la substitution du ciment par du filler calcaire

	BAP 31%	BAP 40%	BAP 46%	MBAP 0%	MBAP 26%	MBAP 41%
$A/(A+C)$	31%	40%	46%	0%	26%	41%
$\epsilon_{\infty}(\mu m/m)$	590	809	827	797	734	551
$N_s \text{ ring}(j)$	41,6	56,4	46	60,3	65,3	61,2
$E_0(\text{GPa})$	20,7	22,0	13,7	34,5	29,5	30,7
K	1,45	1,38	1,86	1,12	1,19	1,11
λ	0,9	1,86	0,79	1,17	1,7	1,16
$A(\mu m/m)$	5,41	3,97	4,98	6,59	4,24	5,2
B	0,61	0,64	0,65	0,64	0,64	0,59
$f_i(\text{MPa})$	3.6	3.4	3.2	6.1	3.9	4.1

4.2 Application de l'analyse couplée

L'approche directe confirme les premières observations, puisque le risque calculé de fissuration passe de *modéré-bas* à *bas* quand on substitue du ciment par du filler (Tableau 3.). Ceci est valable pour les BAP comme pour les MBAP. Pour la compréhension de ce résultat nous utilisons le calcul viscoélastique.

Tableau 3. Indicateurs du risque de fissuration pour l'étude de l'effet de la substitution du ciment par du filler calcaire

	BAP 31%	BAP 40%	BAP 46%	MBAP 0%	MBAP 26%	MBAP 41%
$\alpha (10^{-6}/j^{0.5})$	9,0	10,4	8,8	12,0	8,0	9,7
$t_{cr} (j)$	22	20	80	24	26	143
$q (\text{KPa}/j)$	178	214	91	226	144	75
$i_f (\text{KPa}/j^2)$	8,1	10,7	1,1	9,4	5,5	0,5
Risque de fissuration	<i>Modéré-bas</i>	<i>Modéré-bas</i>	<i>bas</i>	<i>Modéré-bas</i>	<i>Modéré-bas</i>	<i>bas</i>

La Figure 5 présente les contraintes calculées pour les BAP. On remarque qu'au bout de 30 jours elles diminuent en fonction du pourcentage de filler. Ceci s'explique par la relaxation (Figure 6). Cette approche permet donc l'accès à la relaxation qui est élevée pour le BAP 46%, et qui permet d'expliquer la variation de la sensibilité à la fissuration en fonction de la proportion d'addition.

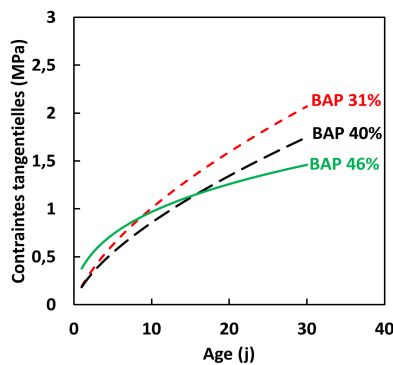


Figure 5. Contraintes tangentielles réelles, BAP

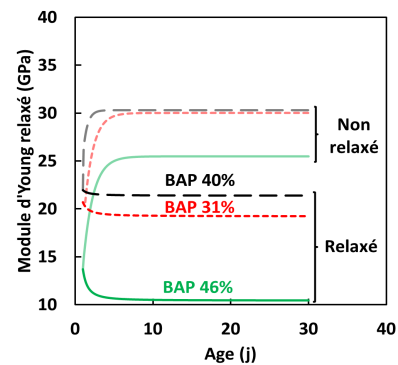


Figure 6. Module de Young relaxé, BAP

En ce qui concerne les MBAP, les contraintes tangentielles développées dans l'anneau sont supérieures pour la composition sans addition (Figure 7.), ce qui explique sa fissuration rapide. La relaxation augmente légèrement en fonction du taux de substitution de ciment par du filler (Figure 8.), et encore une fois la formule avec la plus grande proportion de filler calcaire (41%) a la sensibilité à la fissuration la plus faible.

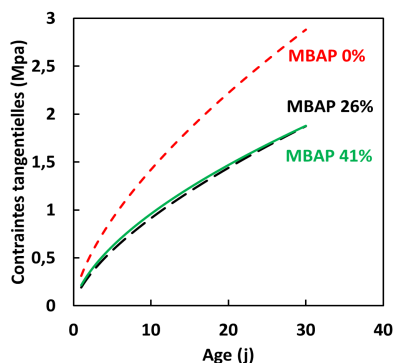


Figure 7. Contraintes tangentielles réelles, MBAP

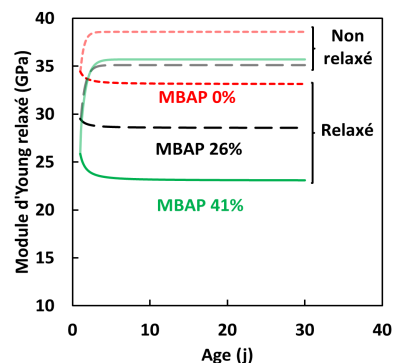


Figure 8. Module de Young relaxé, MBAP

Les résultats des deux séries d'essais se rejoignent, et montrent que l'augmentation de la proportion de filler calcaire dans les BAP diminue la sensibilité à la fissuration. Ce résultat est obtenu par l'approche classique permettant de quantifier ce risque par le biais d'un indice. Cependant, cette approche directe ne permet pas de comprendre les liens entre la formulation, le retrait et la fissuration. Ainsi, le calcul viscoélastique représente une approche complémentaire permettant d'expliquer la meilleure aptitude de formules à teneur élevée en addition calcaire à relaxer les contraintes.

5 Conclusion

La sensibilité à la fissuration des ouvrages en béton exposés à la dessiccation reste l'une des propriétés les plus importantes des matériaux cimentaires mais aussi une des plus difficiles à déterminer et à expliquer. Des approches directes et indirectes proposent son évaluation à partir de l'essai à l'anneau. Malheureusement, elles ne sont pas directement applicables. Nous décrivons l'amélioration et le couplage de deux méthodes afin d'évaluer la sensibilité à la fissuration selon une approche empirique et de comprendre les évolutions observées par le biais d'un calcul viscoélastique.

L'approche directe est adaptée et exploitée. Elle permet de quantifier le risque de fissuration mais ne permet pas de l'expliquer. L'approche viscoélastique est améliorée en proposant la substitution de la modélisation du retrait par une extrapolation des résultats de mesures effectuées, considérée comme plus fiable. Ainsi la première approche est utilisée pour quantifier le risque de fissuration et la deuxième pour expliquer les tendances observées. Cette analyse croisée peut être appliquée pour l'étude des paramètres de formulation ou des conditions externes. Nous l'appliquons ici à l'étude de l'effet du taux de substitution du ciment par du filler calcaire, car cela permet à la fois la réduction du prix de revient et du bilan carbone des BAP. Les résultats démontrent que cette substitution permet la diminution de la sensibilité à la fissuration des BAP, en leur procurant une meilleure relaxation des contraintes. Ainsi, un béton qui est moins résistant et qui fait plus de retrait pourrait avoir un faible risque de fissuration s'il a une bonne aptitude à relaxer les contraintes. En perspective, l'approche pourra être appliquée pour les nouveaux matériaux de construction comme les bétons recyclés ou les géopolymères.

6 Références

- [AAS 05] AASHTO PP34-99: Standard practice for cracking tendency using a ring specimen,
- [AST 04] ASTM C1581/C1581M-09a: Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage,
- [BA 08] BA, H., SU, A., GAO, X., & TAO, Q. «Cracking tendency of restrained concrete at early ages » *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 23(2), pp.263–267.
- [BAM 07] BAMFORTH, P. B. Early-age thermal crack control in concrete, London.
- [BEN 00] BENTUR, A. «Early Age Shrinkage and Cracking in Cementitious Systems » *In International RILEM Workshop on Shrinkage of Concrete.* pp. 1–20.
- [BEN 02] BENTUR, A. Chapter 6.5: early age cracking tests. *RILEM state of the art report-early age cracking in cementitious systems,*

- [BEN 03] BENTUR, A., & KOVLER, K. «Evaluation of early age cracking characteristics in cementitious systems » *Materials and Structures*, 36(April), pp.183–190.
- [DON 14] DONG, W., ZHOU, X., & WU, Z. «A fracture mechanics-based method for prediction of cracking of circular and elliptical concrete rings under restrained shrinkage » *Engineering Fracture Mechanics*.
- [EUR 04] Eurocode 2: Design of concrete structures EN1992-1-1,
- [GRA 11] GRASLEY, Z. C., & D'AMBROSIA, M. D. «Viscoelastic properties and drying stress extracted from concrete ring tests» *Cement and Concrete Composites*, 33(2), pp.171–178.
- [HAS 07] HASSANZADEH, H., & POOLADI-DARVISH, M. «Comparison of different numerical Laplace inversion methods for engineering applications » *Applied Mathematics and Computation*, 189(2), pp.1966–1981.
- [HOS 04] HOSSAIN, A. B., & WEISS, J. «Assessing residual stress development and stress relaxation in restrained concrete ring specimens » *Cement and Concrete Composites*, 26(5), pp.531–540.
- [HOS 06] HOSSAIN, A. B., & WEISS, J. «The role of specimen geometry and boundary conditions on stress development and cracking in the restrained ring test » *Cement and Concrete Research*, 36(1), pp.189–199.
- [KOV 09] KOVLER, K., & BENTUR, A. «Cracking Sensitivity of Normal- and High-Strength Concretes » *ACI MATERIALS JOURNAL*, (106), pp.537–542.
- [RAD 09] RADLINSKA, A., & WEISS, J. «Assessing the repeatability of the restrained ring test. In *Brittle Matrix Composites* ». Elsevier, pp. 335–346. Available at: <http://dx.doi.org/10.1533/9781845697754.335> [Accessed November 20, 2014].
- [ROZ 07] ROZIÈRE, E., GRANGER, S., TURCRY, P., & LOUKILI, A. «Influence of paste volume on shrinkage cracking and fracture properties of self-compacting concrete » *Cement and Concrete Composites*, 29(8), pp.626–636.
- [SAL 12] SALIBA, J., Apport de l'émission acoustique dans la compréhension et la modélisation du couplage fluage-endommagement du béton, Thèse de doctorat de l'École Centrale de Nantes, 2012.
- [SAM 12] SAMOUH, H., ROZIÈRE, E., & LOUKILI, A. «Interprétation des mesures du retrait de dessiccation des bétons autoplaçants (BAP) » In *XXXe Rencontres AUGC-IBPSA*. Chambéry, Savoie, 6 au 8 Juin 2012.
- [SAM 13] SAMOUH, H., ROZIÈRE, E., LOUKILI, A., & SIGWALT, P. «Stress relaxation and cracking sensitivity of self-consolidating concrete: effect of limestone filler content». In *7th RILEM Conference on Self-Compacting Concrete 2013*.
- [SAM 15] SAMOUH, H. «Nouvelles approches des relations entre formulation et comportement différé des matériaux cimentaires: application aux bétons autoplaçants». Thèse Ecole Centrale de Nantes, 2015.
- [SEE 04] SEE, H. T., ATTIOGBE, E. K., & MILTENBERGER, M. A. «Shrinkage Cracking Characteristics of Concrete Using Ring Specimens » *ACI MATERIALS JOURNAL*, (100), pp.239–245.
- [SWA 79] SWAMY, R. N., & STAVRIDES, H. «Influence of Fiber Reinforcement on Restrained Shrinkage and Cracking». *ACI MATERIALS JOURNAL*, March(76), pp.443–460.
- [TUR 04] TURCRY, P. *Retrait et fissuration des bétons autoplaçant: Influence de la formulation*. Thèse Ecole Centrale de Nantes, 2004.
- [TUR 06] TURCRY, P. ET AL., «Cracking Tendency of Self-Compacting Concrete Subjected to Restrained Shrinkage: Experimental Study and Modeling» *JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING*, January/February 2006.
- [TUR 06-2] TURCRY, P. ET AL., «Influence de la substitution du ciment par une addition sur le risque de fissuration des BAP - Discussion sur l'interprétation des mesures du retrait de séchage», *Transferts 2006*, Lille, 2006.
- [WEI 98] WEISS, J., YANG, W., & SHAH, S. P. (1998). «Shrinkage cracking of restrained concrete slabs » *JOURNAL OF ENGINEERING MECHANICS*, (July), pp.765–774.