
Détection et analyse de la fissuration d'ouvrages massifs en béton armé en retrait libre : les apports du PN CEOS.fr

Rospars Claude¹, pour le projet CEOS.fr

¹ Université Paris Est, Ifsttar, 14-20 bd Newton, Cité Descartes, Champs sur Marne, 77447 Marne La Vallée Cedex 2, France, mail : clauderospars@ifsttar.fr

RÉSUMÉ. Le contrôle de la fissuration des ouvrages massifs en béton armé ou précontraint est majeur pour assurer leur durabilité et le cas échéant leur étanchéité. Pour ces ouvrages, les effets Thermo-Hydro-Mécaniques (THM), les effets d'échelle et structuraux induisent des comportements à la fissuration particuliers. Pour instruire ces questions, le projet national CEOS.fr a donné lieu à des essais spécifiques, les uns en grandeur réelle sur des blocs massifs (en retrait libre ou en retrait gêné), les autres en laboratoire ou sur maquettes 1/3 (poutres et voiles). De plus, des développements en modélisation en liaison avec le projet MEFISTO de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) ont permis un échange modèle-expériences très bénéfique.

Dans cet article, on s'intéressera plus particulièrement au cas des poutres massives en retrait libre testées sous chargement de flexion 4 points (poutres RL). Des techniques de mesures novatrices par corrélation d'images ont été mises en oeuvre pour détecter les fissures au cours du chargement mécanique et déterminer l'évolution des patterns de fissuration avec la charge. Une grande quantité de capteurs, réseaux de Bragg, fibres optiques, capteurs à corde vibrante a également été déployée en surface et dans les corps d'épreuve. L'ensemble de ces données a pu être traité pour éclairer sur le rôle du jeune âge dans les mécanismes de fissuration des blocs épais. Ces résultats ont conduit à proposer des évolutions pour l'estimation de la fissuration de ces structures épaisses sous charge de service pour le dimensionnement à l'ELS [COR 16].

....
....
....

ABSTRACT. Control of cracking of reinforced concrete or pre-stressed concrete structures is important to ensure their durability and sustainability and appropriate tightness. For these concrete works, the Thermo-Hydro-Mechanical effects (THM), scale and structural effects may induce specific cracking. To answer these questions, the French national project CEOS.fr designed specific tests, full-scale tests on massive blocks (free shrinkage or restrained shrinkage), and laboratory tests or scaled tests (1/3), and furthermore developments in simulation models in conjunction with the MEFISTO project of the National Research Agency (ANR). This paper focuses on the case of the massive beams tested under 4-point bending load after at least one month of free shrinkage (RL beams). Digital Image Correlation techniques have been implemented to detect cracks during loading and determine the evolution of cracking patterns with the mechanical load. A large amount of sensors, Fibre Bragg grating, optical fibres sensors, vibrating wire strain gauges were also deployed on the surface and inside the test body. All these data were processed to underline the role of early age in the cracking mechanisms of thick blocks. These results led to propose changes to the design of these thick structures under service load for dimensioning [COR 16].

....
....
....
....
....
....
....

MOTS-CLÉS : Béton armé, ouvrages massifs, fissuration, jeune âge.

KEY WORDS : RC structures, massive structures, cracking, early-age.

1. Introduction

La maîtrise de la fissuration des ouvrages en béton armé ou précontraint est indispensable pour garantir leur durabilité et le cas échéant leur étanchéité. L'Eurocode 2 (EC2) et plus récemment le code modèle 2010 (CM2010) prennent en compte la durabilité des structures et contiennent des règles de calcul pour estimer et limiter la fissuration en fonction des caractéristiques du béton, de ses armatures et des classes d'exposition de l'ouvrage. Cependant, ces règles sont en général prévues pour des ouvrages usuels. Elles ne rendent pas suffisamment compte du comportement d'ouvrages comportant des structures massives en béton armé ou précontraint ou répondant à des exigences de service particulières (étanchéité, durée de vie, etc.) ou encore soumis à des chargements exigeant une protection élevée contre les aléas naturels ou les agressions extérieures par exemple. Pour ces ouvrages, les effets Thermo-Hydro-Mécaniques (THM), les effets d'échelle et structuraux induisent des comportements à la fissuration spécifiques. Ainsi, dans le cas de dalles et voiles épais, le retrait et le fluage constituent des phénomènes essentiels à prendre en compte au jeune âge comme à long terme.

Pour instruire ces questions, un projet national, le projet CEOS.fr (Comportement et Évaluation des Ouvrages Spéciaux – fissuration, retrait) a fédéré de 2008 à 2015 une quarantaine de partenaires français du monde académique, des instituts de recherches, des bureaux d'études et des maîtres d'ouvrages. Il a donné lieu d'une part à des essais, les uns en grandeur réelle sur des blocs massifs (en retrait libre ou en retrait gêné), les autres en laboratoire ou sur maquettes 1/3, et d'autre part à des développements de modèles de simulation en liaison avec le projet MEFISTO de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR). Un grand nombre de capteurs ont été utilisés pour mieux comprendre le fonctionnement des corps d'épreuve et une attention particulière a été portée à la mesure du pattern de fissuration grâce au déploiement de technique de corrélation d'images.

L'objectif du projet a été de réaliser puis d'exploiter des essais représentatifs des essais standard usuellement réalisés en laboratoire, de type poutre en flexion ou voile soumis à un cisaillement, mais à une échelle représentative des ouvrages spéciaux. Les essais ainsi réalisés afin de répondre aux trois thématiques suivantes :

- La fissuration sous chargement statique monotone,
- Le comportement Thermo-hydro-Mécanique,
- La fissuration sous chargement cyclique et séisme.

Pour l'étude du comportement statique monotone, des poutres massives de grandes tailles testées sous flexion 4 points ont donc été réalisées ($h=0,8\text{m}$; $b=1,6\text{m}$; $L=6,1\text{m}$). Après coulage, la maturation s'est effectuée librement, d'où la nomenclature de poutres en retrait libre RL adoptée. Les principaux apports du PN CEOS.fr sur ces poutres massives et donc la fissuration sous chargement statique monotone d'éléments massif en béton armé sont présentés ci-après. On pourra également se référer au site du projet www.pnceosfr.org pour de plus complètes informations sur l'ensemble des essais. Enfin un guide de recommandation à usage des maîtres d'œuvre, maîtres d'ouvrages et bureau d'étude a été édité [CEO 15].

L'étude des poutres RL sera donc présentée au paragraphe suivant complétée par des poutres échelle 1/3 ($L=1,9\text{ m}$, $b=50\text{ cm}$, $h=25\text{ cm}$) qui permettent de se rapprocher des essais standards et d'évaluer l'influence des effets d'échelle.

Enfin, les résultats sur les poutres massives seront discutés vis à vis de la phénoménologie du jeune âge et de son impact sur la fissuration sous chargement de flexion.

2. Présentation des essais sur poutres en retrait libre

Les poutres de grandes tailles (RL) ont été réalisées et testées sur les installations du centre technique de VINCI-CONSTRUCTIONS (Marolles en Hurepoix 91630) en extérieur. Les poutres échelles 1/3 (RL1/3) ont été réalisées et testées au CEBTP Elancourt sous hall d'essais.

Les corps d'épreuve coulés en extérieurs ont été conservés à l'extérieur et testés à l'extérieur. Les essais ayant été séquencés pour utiliser le même bâti d'essais, le planning s'est échelonné sur plus d'une année ce qui a conduit à des conditions climatiques très différentes suivant les corps d'épreuve. Un suivi soigné des conditions environnementales a été effectué (ensoleillement, température, hygrométrie...) à l'aide du centrale météorologique.

4.2 Poutres massives échelle 1 (RL)

Les poutres RL sont des blocs parallélépipédiques de dimensions $h=0,80m \times b=1,60m \times l=6,1$ m. Après coulage, la maturation s'est effectuée librement, en extérieur, sur des durées de quatre semaines à huit semaines. 7 blocs RL1 à 7 ont été testés. Deux blocs identiques RL1 et RL6, appelés par la suite blocs de références, devaient permettre d'obtenir un panel de mesures équivalentes de fissuration. Nous verrons par la suite que les conditions de coulage et de maturation ont conduit à deux prototypes différents. Les blocs de référence sont constitués de béton C50/60, et de 16 HA32. Deux lits de 8 HA32 constituent les armatures principales de flexion, l'enrobage étant de 50 mm (cf. figure 2). Tous les blocs ont un pourcentage d'armatures de l'ordre de 1%, sauf une poutre dimensionnée en condition de ferrailage minimum (RL2) qui ne sera pas exploitée ici. De façon à étudier la variabilité des paramètres dimensionnant vis à vis de la fissuration, les autres blocs sont déclinés sur la base de ces blocs de référence mais en faisant varier un paramètre (table 1 et figure 2), soit l'enrobage, soit la qualité du béton, soit le diamètre des armatures utilisées. Un bloc supplémentaire RL7 est identique aux blocs de référence, mais présente quatre tubes placés verticalement de part et d'autre du centre de la poutre pour représenter l'inclusion constituée par un câble de précontrainte.

Ainsi, le ferrailage des blocs RL4, RL5 et RL7 est strictement identique aux deux blocs de référence RL1 et RL6. La figure 3 montre le ferrailage des blocs RL2 et RL3. Les caractéristiques mécaniques des constituants des blocs de référence (RL1 et RL6) sont données tableau 2.

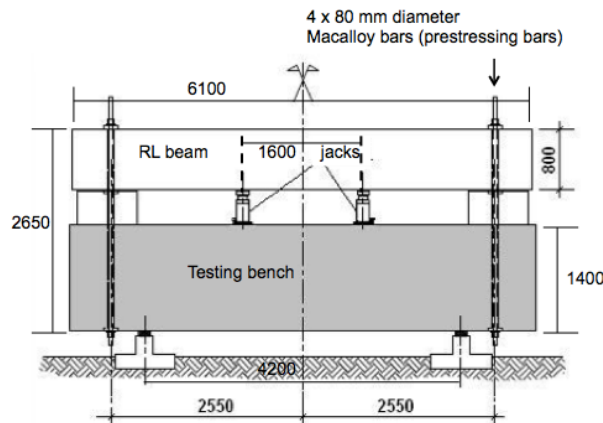


Figure 1. Schéma de principe des essais de flexion sur poutre RL [DEM 10].

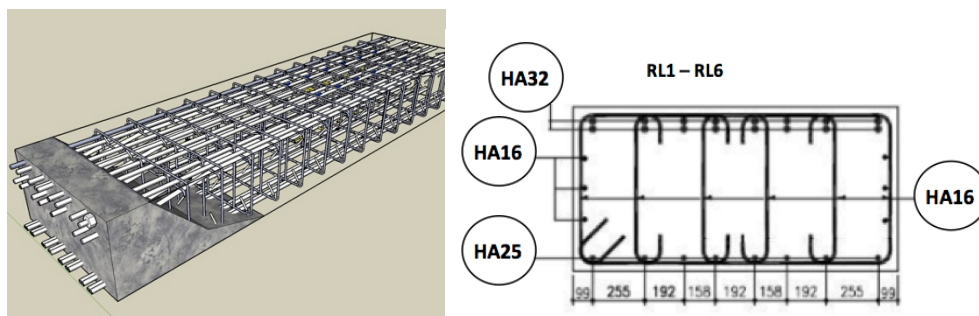


Figure 2. Visualisation des armatures sur la poutre RL de référence (RL1 et RL6) - Coupe section centrale

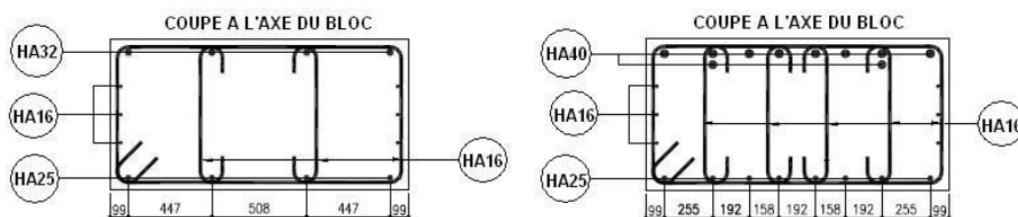


Figure 3. Coupe section centrale des poutres RL2 (gauche) et RL3 (droite)

Toutes les poutres, après la période de maturation d'au moins un mois, ont été testées en flexion 3 points inversée telle que présentée à la figure 1. Le charge a été appliquée par deux lignes de vérins encadrant une zone

utile de 4,2 m, par palier de 300 KN par linges de vérins et jusqu'à 2500 KN environ de manière à obtenir un moment de flexion d'environ 2000KNm et donc à couvrir l'ensemble de l'État Limite de Service (ELS). L'évaluation de la fissuration étant l'objectif principal du projet, il a été décidé d'instrumenter au maximum les corps d'épreuve de façon à accéder à des évaluations de la fissuration en surface et aux déformations externes et internes. Des capteurs de déplacements LVDT ont été disposés régulièrement sur la face en traction, des capteurs à fibres optiques (FO) base longue (réseau de Bragg) ont été placés au niveau de la zone utile centrale en surface du corps d'épreuve et 3 fibres optiques longues ont été noyées à cœur. Des extensomètres à cordes vibrantes (notés ECV) sont répartis sur plusieurs sections internes des poutres pour évaluer les déformations locales à proximité des surfaces externes, et à cœur. Quelques jauges de contrainte sont disposées sur les lits d'armatures principaux. La température interne est relevée en de multiples points, en continu depuis le coulage, par des Pt100 qui viennent compléter les mesures locales des ECV. Enfin, à chaque palier de chargement des clichés ont été pris et traités par corrélation d'images (Digital Image Correlation, noté DIC) pour évaluer le pattern de fissuration.

Les capteurs ont été interrogés depuis le coulage, pendant la maturation et sous chargement mécanique de flexion et les prises de vue ont été faites pendant chaque palier de chargement, tous les 300 KN, de manière à observer le pattern de fissuration par corrélation d'images.

Tableau 1. *Caractéristiques des poutres RL*

Type	Spécificité	Enrobage	Béton	Premier lit d'armatures
RL1 RL6	Poutres de référence	50 mm	C50/60	16 HA32
RL2	Poutre en ferrailage minimum	50 mm	C50/60	4 HA32
RL3	Modification du diamètre des armatures (même pourcentage)	50 mm	C50/60	10 HA40
RL4	Augmentation de l'enrobage	70 mm	C50/60	16 HA32
RL5	Modification de la gamme de béton	50 mm	C30/37	16 HA 32
RL7	Poutre de référence avec inclusions rigides	50 mm	C50/60	16HA32

Table 2. *Caractéristiques mécaniques des constituants des blocs de référence RL1-6*

Caractéristique	symbole	unité	Valeur moyenne
Limite à rupture en traction	f_{ctm}	Pa	4.67
Limite à rupture en compression	f_{ck}	Pa	63.75
Module d'Young	E_{ctm}	Pa	40.
Coefficient de Poisson	ν	-	0.2
Module des aciers	E_s	MPa	208000

4.2 Poutres échelle 1/3 (RL 1/3)

Les dimensions des poutres sont identiques aux poutres RL mise à l'échelle 1/3, avec 1,9 m de longueur, 50 cm de largeur et 25 cm de hauteur. Les poutres ont été coulées avec un béton C50/60 : 5 blocs avec un béton D8 (taille maximale des granulats de 8 mm après mise à l'échelle) et une poutre en D20. Elles correspondent exactement aux poutres RL à l'échelle 1/3, du point de vue de l'échelle et du point de vue des constituants. Les caractéristiques principales des 6 poutres sont présentées dans le tableau 2. Les deux blocs notés B sont donc identiques au bloc RL1 et RL6, à l'échelle 1/3.

La charge est appliquée de la même manière que pour les poutres RL, les deux vérins hydrauliques étant espacés de 50 mm en zone centrale. 18 paliers de chargement de 15 KN ont été effectués. Les mesures des faciès de fissuration ont également été relevées par la technique de corrélation d'images (DIC). Les essais à l'échelle 1/3 ayant été réalisés en fin de projet, ils ont bénéficié du retour d'expérience des mesures par corrélation d'images sur poutres RL.

Tableau 2. Caractéristiques des poutres RL 1/3

Corps d'essai	Nombres	Type de béton	Diamètre max des granulats	Armatures supérieures	Armatures inférieures	Cadres	Espacement	Enrobage longitudinal
A	1	C50	20 mm	16 HA10	8 HA8	HA5	10 cm	15 cm
B (bloc de référence)	2	C50	8 mm	16 HA10				
C	1	C50		8 HA14		HA6		
D	2	C50		16 HA10				

Des fissuromètres à microscopie optique ont complété localement les mesures d'ouvertures de fissures et ont permis de valider les mesures par corrélation d'images. Des capteurs à cordes vibrantes (ECV) sont également dispatchés dans les poutres et permettent de suivre la déformation du bloc pendant la maturation et lors du chargement mécanique en flexion. Ces mesures locales internes sont complétées par des capteurs externes, fibres optiques base longue à réseau de Bragg et LVDT sur la face supérieure, correspondant à la face en traction (figure 4).

3. Analyse des patterns de fissuration

L'un des objectifs majeurs du PN CEOS.fr est de caractériser la fissuration d'ouvrages massif en béton armé. Une attention particulière a donc été portée sur la reconstruction des patterns de fissuration par DIC, notamment la mesure de l'espacement moyen entre fissures et les ouvertures de fissures à l'ELS. L'analyse de la fissuration s'est basée sur la mesure prise au niveau du premier lit d'armatures (50 mm du haut de la poutre). Le choix a été justifié dans [ROS 15] et la procédure détaillée dans [RUO 12]. La précision de la mesure par analyse d'images est d'environ 0,04 mm, un seul appareil photo ayant été utilisé pour toute la poutre (image de 4272 x 2848 px). Cette mesure est suffisamment précise et représentative de l'ouverture de fissure obtenue au droit des armatures et caractérisée dans l'EC2 ou le CM2010. Une fois les fissures identifiées et l'ouverture de chaque fissure mesurée au niveau du premier lit d'armature, les espacements entre fissures sont évalués.

4.2 Poutres échelle 1/3 (RL 1/3)

Les résultats sur la fissuration des poutres 1/3, notamment de la poutre B qui correspond à la poutre de référence mise à l'échelle 1/3, montre que l'évolution de l'ouverture des fissures en fonction de la charge appliquée suit assez bien les prédictions des codes d'ingénierie (figure 5). Le faciès reconstruit est tracé sur la figure 4.

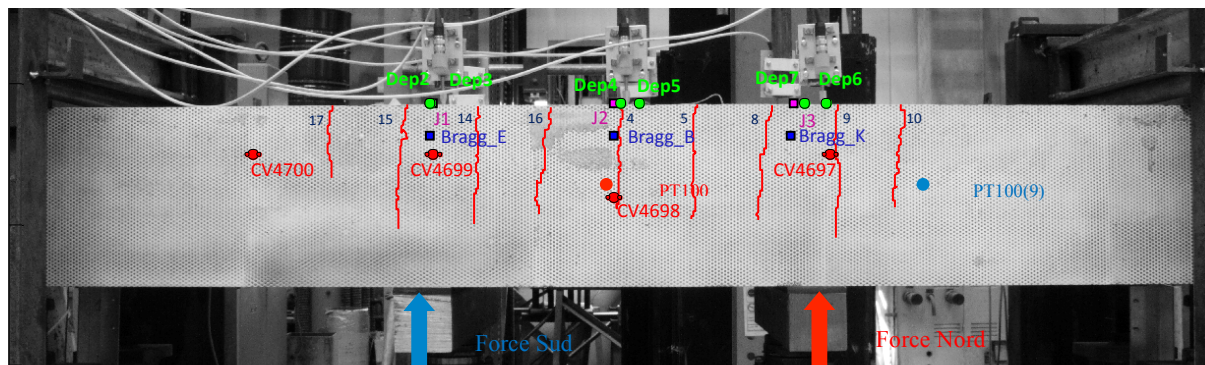


Figure 4. Position des capteurs sur la face peinte de la poutre et faciès des fissures détectées mécaniquement par DIC au dernier palier de chargement (jauges à réseau de Bragg collées sur armatures (Bragg_X), extensomètres à corde vibrante (ECV), capteur de température (Pt100), capteurs de déplacement LVDT sur la surface supérieure (Dep))

Dans leur ensemble, les résultats constatés sur les espacements de fissures mesurés et les ouvertures maximales moyennes de fissures suivent assez bien les résultats prévus par les codes d'ingénierie, notamment le CM2010 (figure 5 et tableau 3). On note cependant une grande dispersion des ouvertures de fissures obtenues pour chaque palier. Cette dispersion n'est pas aussi grande sur les poutres RL, elle s'explique principalement par une plus grande variation de l'ouverture de fissure sur sa longueur. Dans leur ensemble, la fissuration des poutres échelles 1/3 est donc en accord avec les prévisions des codes. On note également une bonne

reproductibilité des deux poutres B. Notons que ces essais ont été effectués sous hall d'essais sur des tailles et des formes de corps d'épreuve relativement standard.

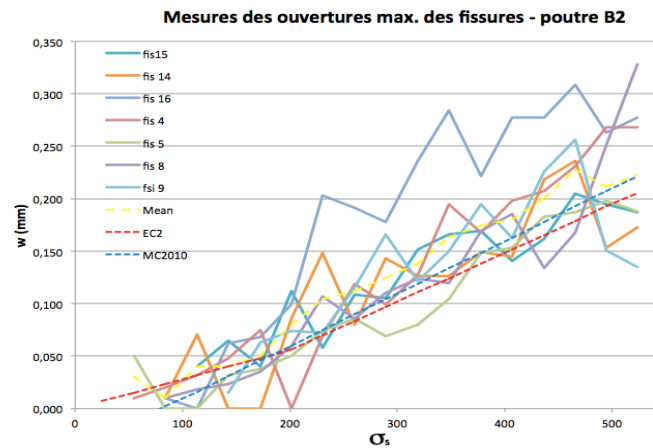


Figure 5. Résultats des mesures obtenues par DIC à 50 mm du haut de la poutre de référence à l'échelle 1/3 (ouverture (w en mm) en fonction de la contrainte de traction théorique évaluée dans les armatures en MPa).

Tableau 3. Mesures DIC et visuelles sur les espacements de fissures à 50 mm RL1/3

	en mm	CM 2010	Mesure visuelle	Analyse d'images
	Eurocode 2			
Bloc A	93	100	100	100
Bloc B1	93	100	106	105
Bloc B2	93	100	100	99
Bloc C	104	116	102	100
Bloc D1	93	100	91	99
Bloc D2	93	100	102	73

4.2 Poutres échelle 1 (RL)

Les mesures par corrélation d'images ont permis d'étudier les patterns de fissuration dans la zone centrale de chaque poutre. Le relevé des fissures identifiées dans la zone de moment constant (traité à la hauteur de 60 mm du bord supérieur de la poutre) permet de considérer que les ouvertures de fissures obtenues sont des ouvertures maximums. La précision de la mesure reste de 0,04 mm par DIC, plusieurs photos ayant été prises pour caractériser toute la zone centrale. Deux types de comportement sont cependant observés, un de type RL1 et un de type RL6, ces deux poutres étant les poutres de référence, identiques dans leur conception.

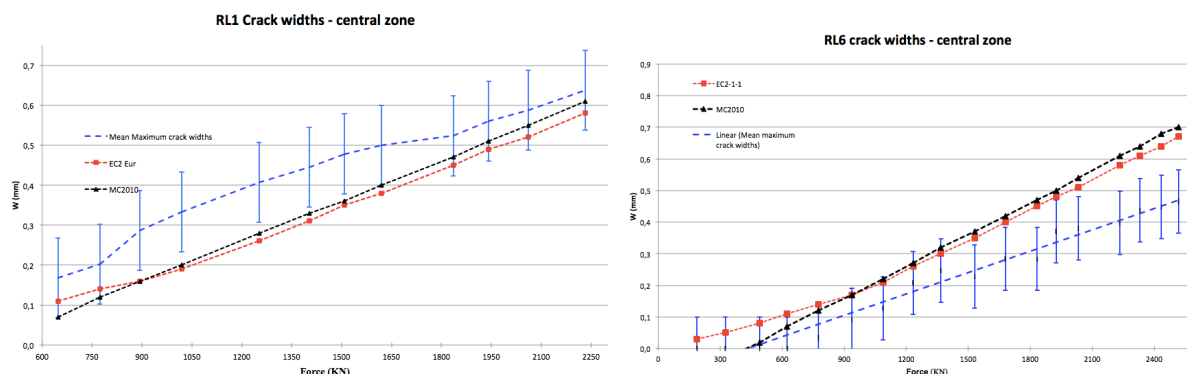


Figure 6 – Moyenne des ouvertures de fissures maximums mesurées pour la poutre RL1 (gauche) et RL6 (droite) en fonction de la charge, avec la variabilité de la mesure – comparaison avec l'EC2 et le CM2010.

La différence de comportement est également visible sur le pattern de fissuration (figure 7). L'espacement des fissures est plus grand pour la poutre RL1. Le pattern de la poutre RL6 est proche de celui attendu pour ce

type de poutre par le CM2010 notamment. La déformée globale sous chargement mécanique due au moment appliquée aux poutres restent conforme à la déformée attendue pour les deux poutres. Ainsi, un espacement entre fissures plus grand conduit nécessairement à des ouvertures de fissures plus grandes.

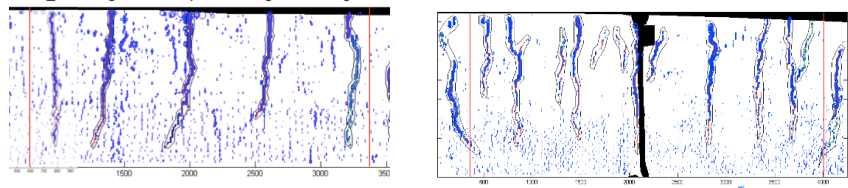


Figure 7 Pattern de fissuration obtenu par DIC à 2500 KN – zone centrale, RL1 (droite) et RL6 (gauche)

Ces essais ayant été conduits en extérieur, seules diffèrent les conditions de coulage et de maturation. A partir du panel de capteurs ECV, Pt100 notamment disponibles à cœur et sur plusieurs sections de ces poutres une comparaison des phénoménologies au jeune âge a pu être conduite.

4. Prise en compte de la phénoménologie du jeune âge

L'analyse des résultats sur la fissuration a conduit à poser plusieurs questions :

- sur la qualité de la mesure et sa précision,
- sur la signification d'une mesure réelle par rapport à une ouverture de fissure « caractéristique » définie dans l'EC2 ou le CM2010,
- Sur le rapport entre l'ouverture de fissures mesurées en surface et l'enrobage, plus important dans le cas des ouvrages épais.

Ces points ne sont pas discutés dans ce document. On considère ici que la mesure obtenue est représentative de la fissure caractéristique prévue dans les codes EC2 et CM2010. On pourra se référer à [ROS 15] [COR 16] pour des détails sur les mesures et leurs conséquences sur l'estimation de la fissuration. Par contre, la phénoménologie au jeune âge et de son influence sur le pattern de fissuration, notamment à des espacements de fissures plus grands pour certaines poutres (RL1 et RL5) est présentée ci-après.

4.2 Condition de coulage et pic exothermique

La poutre RL6 a été coulée en juillet. La température du béton en sortie de toupie était à 29°C ce qui est excessif, mais ce qui correspond aux conditions de chantier réel en extérieur. Après quelques heures de maturation, le pic exothermique est atteint avec une température mesurée à cœur de 76°C. Avec ces conditions thermiques extrêmes, l'écart de température entre la surface supérieure et le cœur reste proche de 5°C.

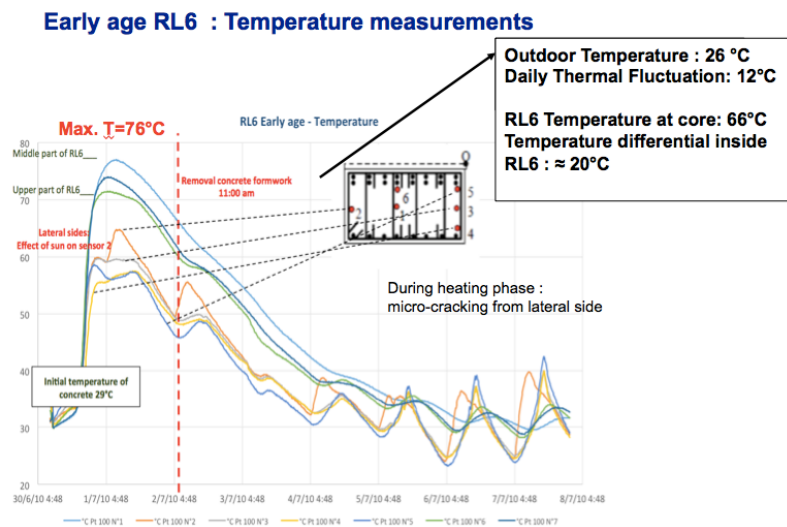


Figure 8. Mesures de températures des ECV à partir du coulage – RL6

Cependant, la différence de température est supérieure avec les faces latérales, dont la température se stabilise autour de 60°C. Notons que la température extérieure ambiante est alors de 26°C. La face latérale ensoleillée atteint 65°C, celle à l'ombre se stabilise à 58°C (figure 8). Dès cet instant, des fluctuations des mesures de température apparaissent et suivent les fluctuations thermiques journalières mais en les amplifiant. Les ECV placés au centre de la poutre, à cœur et ceux proches de la surface supérieure montrent une diminution régulière de la température, sans fluctuation à partir de cette valeur. Lorsque la température se stabilise autour de 30°C, les capteurs positionnés à proximité des faces externes continuent à donner des valeurs de température fluctuant de plus des 12°C par cycle diurne-nocturne. Ces fluctuations sont caractéristiques de fissures en surface, suffisamment profondes pour atteindre le premier lit d'armature. Notons que l'instant du décoffrage est particulièrement visible avec une reprise de montée en température sur les faces fissurées.

Cependant, la différence de température est supérieure avec les faces latérales, dont la température se stabilise autour de 60°C. Notons que la température ambiante est alors de 26°C. La face latérale ensoleillée atteint 65°C, celle à l'ombre se stabilise à 58°C (figure 8). Dès cet instant, des fluctuations des mesures de température apparaissent et suivent les fluctuations thermiques journalières mais en les amplifiant. Les ECV placés au centre de la poutre, à cœur et ceux proches de la surface supérieure montrent une diminution régulière de la température, sans fluctuation à partir de cette valeur. Lorsque la température se stabilise autour de 30°C, les capteurs positionnés à proximité des faces latérales externes continuent à donner des valeurs de température fluctuant de plus des 12°C par cycle diurne-nocturne. Ces fluctuations sont caractéristiques de fissures en surface, suffisamment profondes pour atteindre le premier lit d'armature. Notons que l'instant du décoffrage est particulièrement visible avec une reprise de montée en température sur les faces fissurées.

La poutre RL1 a été coulée en octobre. Le pic exothermique a atteint 60°C à cœur, avec une température externe ambiante de 13°C. Aucun signe de fissuration n'est constaté avant le décoffrage de la poutre sur les mesures de température qui sont régulières avec un écart de 10°C entre le cœur de la poutre et les surfaces.

4.2 Maturation des poutres RL1 et RL6

La figure 9 montre les mesures des déformations fournies par les mêmes capteurs (ECV). Le retrait du béton obtenu en laboratoire est de 110 $\mu\text{m}/\text{m}$. Comme le montre les mesures des microdéformations le retrait global du corps d'éprouve se stabilise en fin de maturation vers -80 $\mu\text{m}/\text{m}$. Ce retrait est proche de celui mesuré par une éprouvette témoin coulée et conservée à proximité de la poutre. A ce stade, il y a peu d'écart entre la partie supérieure et inférieure du corps d'éprouve. Les présences des armatures expliquent ces écarts. Le retrait à cœur est de -75 $\mu\text{m}/\text{m}$. La figure 9 montre également l'amplification des mesures de déformations constatées sur les mesures de température après le pic exothermique pour les mêmes capteurs. Cependant, ces fluctuations diminuent progressivement pour reprendre le cycle diurne – nocturne normal en fin de maturation. En effet la dilatation du béton est d'environ 12 $\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$ et les microdéformations obtenues correspondent à une fluctuation journalière d'environ 5°C.

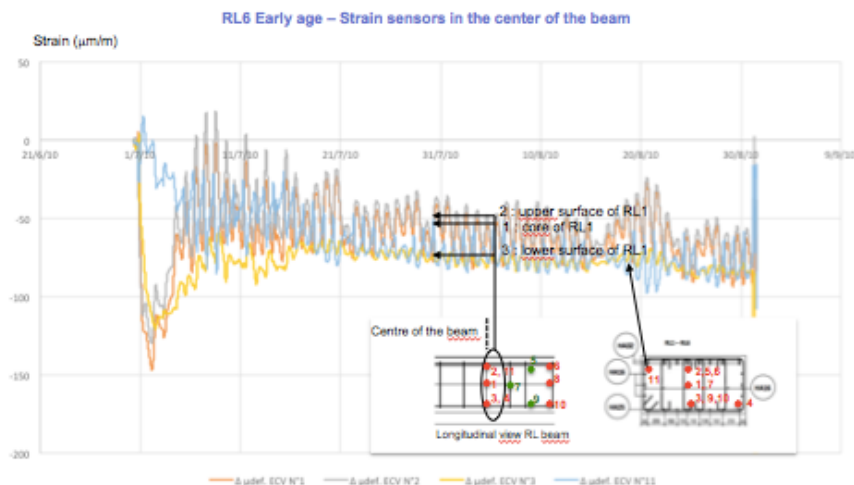


Figure 9. Mesures de déformations des ECV à partir du coulage dans la section centrale – RL6

De cette analyse, nous pouvons conclure que la température excessive de coulage du RL6 a conduit à des fissures en surfaces latérales de la poutre. Ces fissures ont atteint les armatures puisque les jauges de contrainte

posées sur ces armatures ont clairement montré une reprise des efforts dans les zones fissurées. Cependant, ces fissures apparues au très jeune âge se sont progressivement refermées lors de la maturation du béton, qui présente un retrait global homogène sur la section d'environ $-80 \mu\text{m/m}$. Lors du chargement mécanique, malgré les conditions thermique constatées, la fissuration du bloc s'effectue de manière indépendante des fissures de surfaces apparues, puis refermées lors du jeune âge.

La figure 10 présente les déformations locales mesurées par les mêmes capteurs ECV sur la section centrale de la poutre RL1 lors de la maturation.

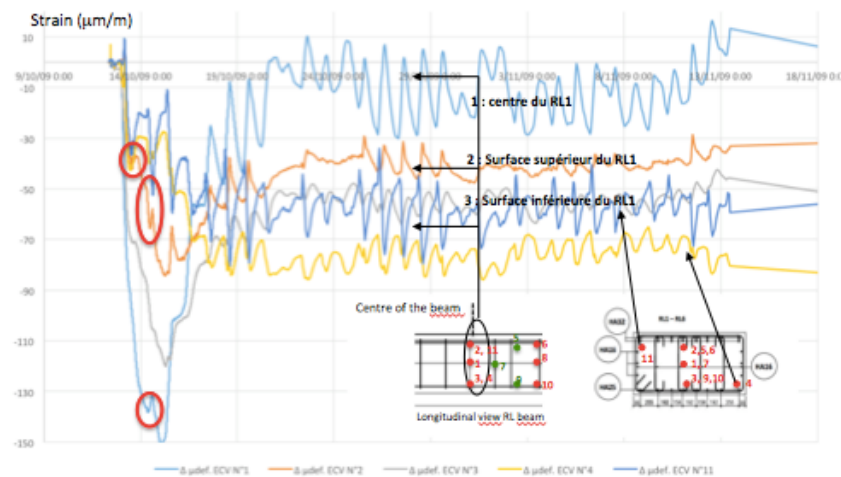


Figure 10. Mesures de déformations des ECV à partir du coulage dans la section centrale – RL1

Les microdéformations mesurées dès le pic exothermique sont caractéristiques du développement d'une microfissuration interne. Le décoffrage a eu lieu à 48h, la température interne du bloc étant de 55°C et la température extérieure n'excédant pas 13°C . Ainsi l'écart thermique entre le corps d'épreuve et la température ambiante excède 42°C . Dans ces conditions, la poutre subit un choc thermique propice au développement de fissures internes, du fait du différentiel de température entre la surface externe et le cœur. Contrairement aux fissures de surfaces observées sur le RL6, les fissures du RL1 se caractérisent par un retour à zéro des l'ensemble de la ligne de capteur situé à cœur. Seuls les effets amplifiés des fluctuations de températures diurne – nocturne sont mesurés par les ECV situés au centre de la poutre. A contrario, les ECV situés à proximité des surfaces inférieures et supérieures mesurent le retrait de $-50 \mu\text{m/m}$ en partie supérieure et $-80 \mu\text{m/m}$ en partie inférieure.

Le décoffrage à 48h a eu lieu trop tôt au regard de la température du bloc qui excède de 40°C la température ambiante. Dans ces conditions, une fissuration à cœur apparaît et elle ne se referme pas au cours de la maturation. Le bloc est donc très fissuré à cœur lors de la réalisation de l'essai de flexion. Cette fissuration au jeune âge conditionne le pattern de fissuration observé lors du chargement mécanique qui est alors conditionné par les fissures de jeune âge qui s'ouvrent en surface.

Ces mesures ont pu être analysées comparativement à des éprouvettes témoins dont le retrait a été soigneusement mesuré, l'une en retrait libre, l'autre conservée en conditions semi-adiabatiques.

5. Conclusion

Les essais sur poutres de grandes tailles ont permis de mettre en évidence l'importance du jeune âge sur la fissuration obtenue sous chargement mécanique. Les fissures au jeune âge susceptibles d'apparaître sont soit dues à un différentiel de température entre cœur et surface, soit dues à un écart entre la température du corps d'épreuve et la température ambiante lors du décoffrage.

Nous avons pu montrer que les fissures apparues en surface sont susceptibles de se refermer sous l'effet du retrait pendant la maturation. Les fissures apparues à cœur suite à un choc thermique, dû dans nos expériences à un décoffrage intervenu trop tôt, conditionnent la fissuration sous chargement mécanique. Plusieurs recommandations ont donc été produites sur la base de ces retours d'expériences :

- la température de coulage ne doit pas excéder les préconisations déjà éditées pour le coulage des ouvrages en béton armé en vue d'éviter le développement de pathologies,

- le décoffrage ne doit pas avoir lieu systématiquement à 48h, mais une fois la température suffisamment descendue pour que l'écart avec la température ambiante soit, si possible, inférieur à 40°C. Le suivi des capteurs internes (Pt100 ou ECV) est indispensable pour piloter le décoffrage,

- les capteurs internes doivent être contrôlés pour mesurer les différentiels de température entre surface et cœur,

- l'exploitation des mesures internes à l'ouvrage nécessite la réalisation d'éprouvettes témoins de type 16*32 incluant un ECV de façon à suivre le retrait du béton indépendamment des armatures et les températures. On préconise une éprouvette maturée en retrait libre et une éprouvette conservée en caisson QAB qui sera représentative du béton à cœur.

Enfin, pour ce qui concerne la fissuration, nos études ont montré que les poutres à l'échelle 1/3 présentent des mesures de fissuration (espacement et ouvertures) assez conformes aux prévisions des codes EC2 et CM2010. Les poutres de grandes tailles, échelles 1 sont donc dépendantes du jeune âge qui peut fortement influencer sur la fissuration sous chargement mécanique. Les fissures développées en surface et refermées lors de la maturation sous l'effet du retrait ne contribuent pas à la fissuration développée sous chargement mécanique. Les fissures à cœur pilotent complètement le développement du pattern de fissuration observé sous chargement mécanique.

Sur la base de ces mesures, des évolutions des formules de l'EC2 ont été proposées pour mieux évaluer les caractéristiques de la fissuration [COR 16]. L'effet d'échelle a également été observé et influe sur l'apparition de la première fissure ce qui a été observé pour l'analyse du jeune âge des poutres en retrait gêné [TOR 16].

6. Remerciements

Les travaux présentés dans cet article ont été menés dans le cadre du Projet National CEOS.fr soutenu par le Ministère de l'Environnement de l'Energie et de la Mer (DRI).

7. Bibliographie

- [CEO 15] CEOS.fr (Comportement et évaluation des ouvrages spéciaux vis-à-vis de la fissuration et du retrait), Recommandations pour la maîtrise des phénomènes de fissuration, Presses des Ponts, 2015.
- [DEM 10] Demilecamps L., Reliable Shrinkage and Crack Design: Ceos.fr French National Research Program, Experimental Aspects. 3rd fib International Congress, 2010.
- [ROS 15] Rospars C., Chauvel D., CEOS.fr experimental programme and reference tests results, European Journal of Environmental and Civil Engineering, DOI: 10.1080/19648189.2015.
- [RUO 12] Ruocci G., Rospars C., Bisch P., Erlicher S., Moreau, G., Cracks distance and width in reinforced concrete membranes: experimental results from cyclic loading histories, 15WCEE, Lisbon, Portugal, 2012.
- [TOR 16] TORRENTI J.M.T., Fissuration due au retrait gêné au jeune âge des structures massives : les apports du PN CEOS.fr, 34^{ème} Rencontres de l'AUGC, Université de Liège, Belgique, 25)27 mai 2016.
- [COR 16] CORTADE J., Calcul de la fissuration (espacement, ouverture) des poutres : deux propositions issus du PN CEOS.fr au jeune âge des structures massives : les apports du PN CEOS.fr, 34^{ème} Rencontres de l'AUGC, Université de Liège, Belgique, 25)27 mai 2016.