

Suivi par émission acoustique de l'endommagement des composites à matrice cimentaire

Nadège Reboul, Mohamed Saidi, Aron Gabor

Laboratoire des Matériaux Composites pour la Construction, Université Lyon 1

39^{èmes} RUGC - 26 au 28 mai 2021 - à distance



Université Claude Bernard  Lyon 1



Laboratoire des Matériaux
Composites pour la Construction
EA 7427

1 Introduction

2 Matériaux et Méthodes

3 Résultats

- Comportement global
- Classification des signaux acoustiques
- Endommagement de l'interface textile/matrice
- Ouverture de fissure

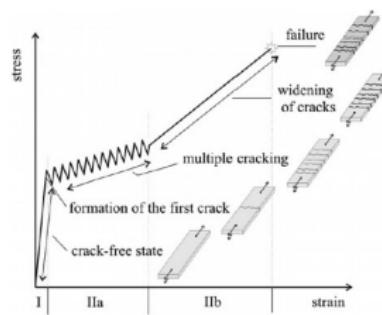
4 Conclusions et Perspectives

Introduction

- Composites à matrice cimentaire (➡ TRC)
 - Mortier à granulométrie fine + textile adapté
 - Utilisés pour le renforcement externe des maçonneries
- Un comportement multifissurant



[REBOUL et al., 2018]



[MECHTERINE, 2013]

- ➡ Objectif : analyser les potentialités de l'émission acoustique pour évaluer le niveau de sollicitation du TRC.
 - ➡ Première étude : sous un chargement de traction simple.

- Précédents travaux : [VERBRUGGEN et al., 2014], [BLOM et al., 2014], [VERSTRYNGE et al., 2016], [TSANGOURI et al., 2019]

Matériaux et spécimens

Trois éprouvettes TRC parallélépipédiques : $600 \times 50 \times 10 \text{ mm}^3$

Matrice cimentaire autoplaçante



+

Textile carbone ($17 \times 17 \text{ mm}^2$, 525 g/m^2)



Fil de section 2.97 mm^2

Caractérisation en traction directe :

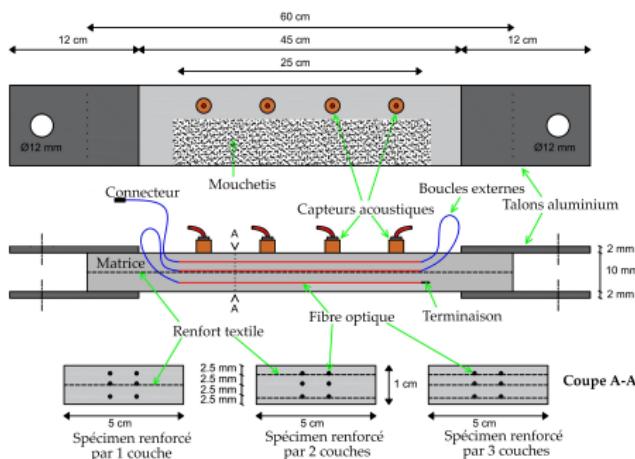
	σ_u [MPa]	ε_u [$\mu\text{m}/\text{m}$]	E [MPa]
Traction	4.5 ± 0.36	400 ± 34	14000 ± 492
Compression	40 ± 1.57	3000 ± 230	13000 ± 507

	σ_{um} [MPa]	ε_{um} [$\mu\text{m}/\text{m}$]	E_t [MPa]
	518 ± 34	6500 ± 400	105000 ± 6810

Trois taux de renforcement :

- 1 couche de textile $\rightarrow V_f = 1.62 \%$ \rightarrow TRC-1L
- 2 couches de textile $\rightarrow V_f = 3.24 \%$ \rightarrow TRC-2L
- 3 couches de textile $\rightarrow V_f = 4.86 \%$ \rightarrow TRC-3L

Instrumentation et sollicitation imposée



① Fibre optique (FO) : 2 m, soit 6×25 cm

Appareil ODI SI-B LUNA, résolution spatiale 2.6 mm

► Déformations de la matrice, du textile

② Corrélation d'images numériques(DIC)

Caméra Kramer electronics VP 211K, 5 Megapixels

GOM Correlate

► Espacements, Ouvertures des fissures

③ Emission acoustique (EA)

Carte d'acquisition 8 voies Express-8 (MISTRAS)

Capteurs μ 80 :

► 4 pour TRC-1L ; 6 pour TRC-2L et TRC-3L

Pré-amplificateurs 2/4/6 avec un gain de 40 dB

Fréquence d'échantillonnage : 2MSPS

Seuil = 35 dB

PDT = 50 μ s ; HDT = 100 μ s ; HLT = 200 μ s

► Endommagement interne

Sollicitation en traction simple



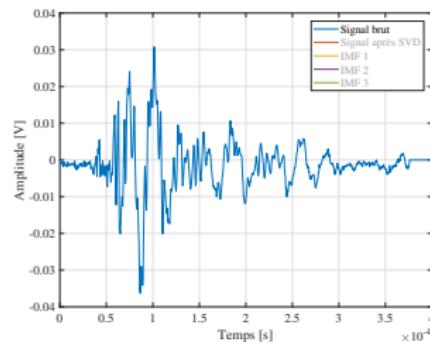
● Zwick de capacité 65 kN

● Vitesse de déplacement imposée : 0.1 mm/min

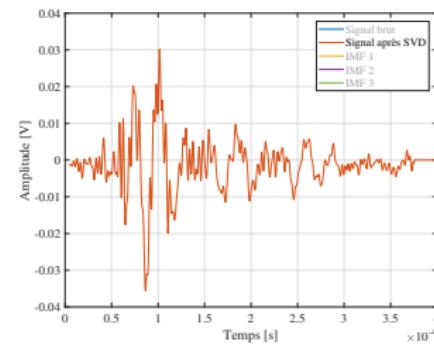
Méthodologie d'analyse des signaux EA

Traitement des signaux recueillis

① Signal brut



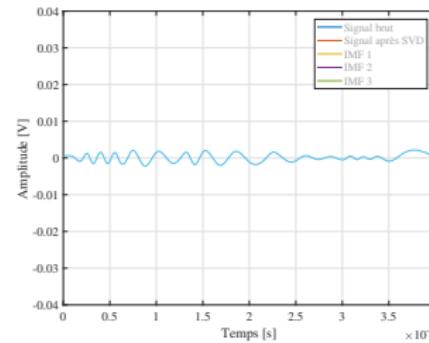
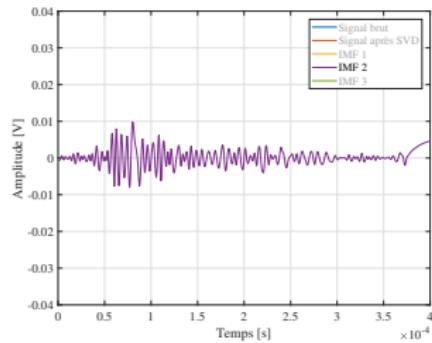
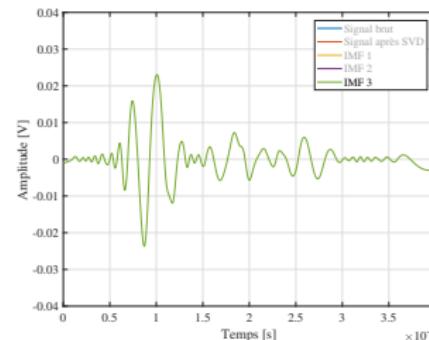
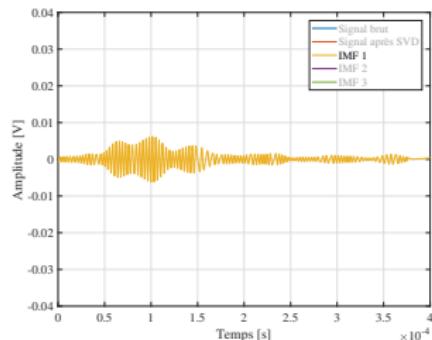
② SVD



Méthodologie d'analyse des signaux EA

Traitement des signaux recueillis

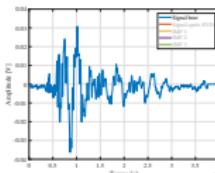
⑥ Décomposition modale empirique



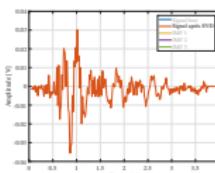
Méthodologie d'analyse des signaux EA

Traitement des signaux recueillis

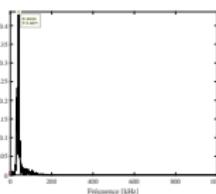
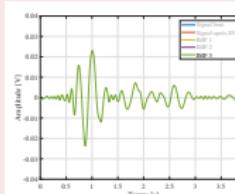
① Signal brut



② SVD



③ Calcul des descripteurs du signal



Temps de montée [μs]

Durée [s]

Nombre de coups [-]

Nombre de coups au pic [-]

Pic fréquentiel PF [kHz]

Barycentre fréquentiel FC [kHz]

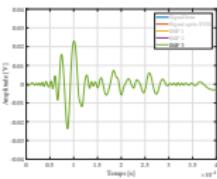
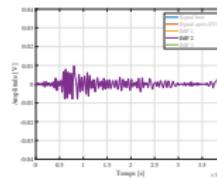
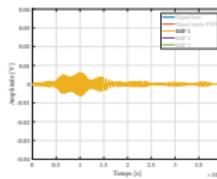
Pic fréquentiel pondéré WPF [kHz]

Puissance Partielle PP1 [%] de 0 à 200 kHz

Puissance Partielle PP2 [%] de 200 à 400 kHz

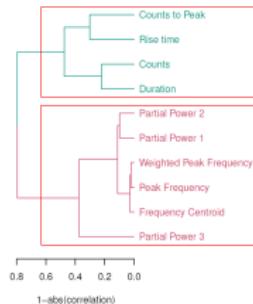
Puissance Partielle PP3 [%] au-delà de 400 kHz

④ Décomposition modale empirique



Méthodologie d'analyse des signaux EA

Classification des signaux



① Analyse en Composantes Principales (ACP)

Sur les descripteurs centrés réduits

Pour expliquer plus de 90% de la variance : **5 CPs**

► CPs = variables décorrélées

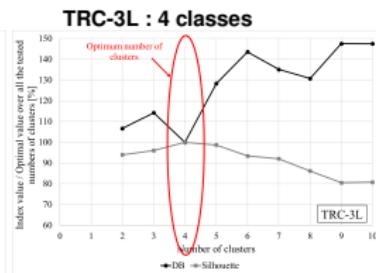
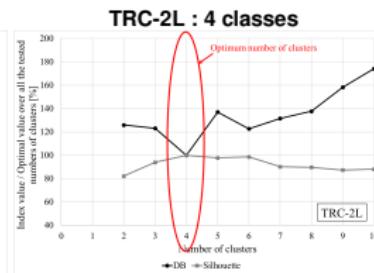
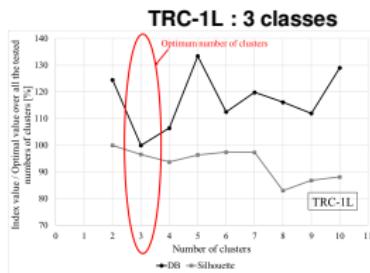
② Classification non supervisée

Méthode des k -moyennes

k = donnée *a priori*

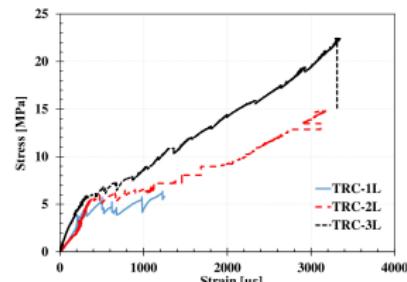
50 initialisations, 500 itérations

Choix du k optimal ► Indices de Davies-Bouldin et Silhouette

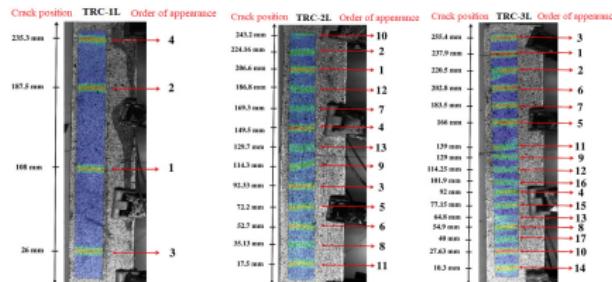


Résultats - Comportement global

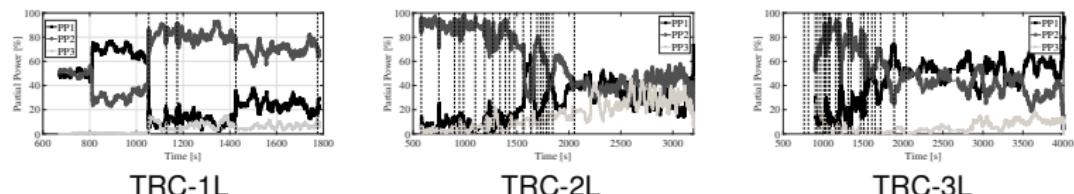
Lois de comportement



Schémas de fissuration



Lien entre les PP des signaux EA et les zones de comportement mécanique

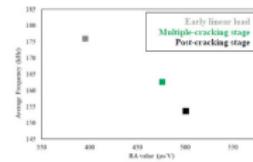


TRC-1L

TRC-2L

TRC-3L

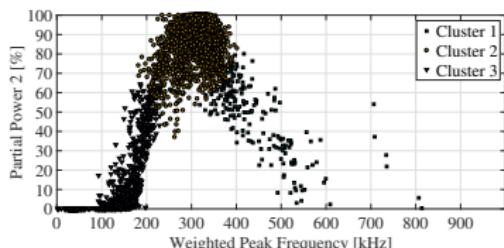
- Chute fréquentielle au moment de la fissuration et tout au long de la zone de multi-fissuration
- Relative stabilisation en zone de post-fissuration



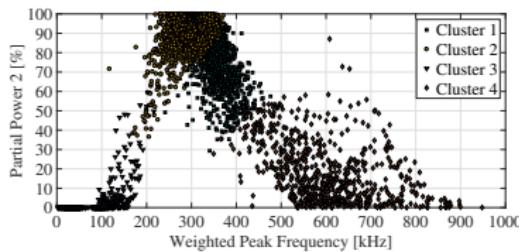
[TSANGOURI et al., 2019]

Résultats - Classification des signaux acoustiques

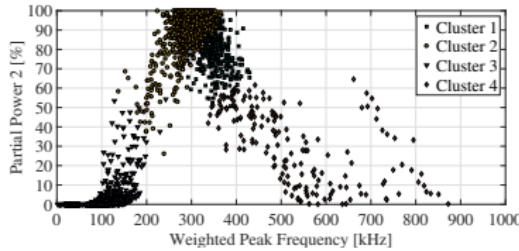
TRC-1L



TRC-2L



TRC-3L



1 Classe 1

Hautes WPF [300-400 kHz, voire au-delà]

2 Classe 2

WPF moyennes [200-350 kHz]

Hautes PP2 [60-100%]

3 Classe 3

Basses WPF [0-200 kHz]

Basses PP2 [0-60%]

4 Classe 4 (pour TRC-2L et TRC-3L)

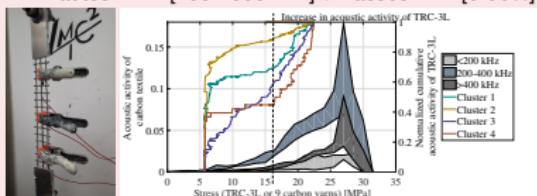
Hautes WPF [400-1000 kHz]

Basses PP2 [0-60%]

Résultats - Interprétation des classes de signaux

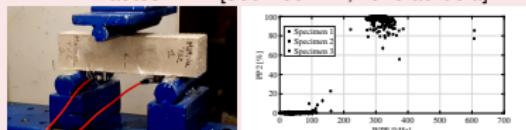
Classe 4 ➡ Déformation du textile

Hautes WPF [400-1000 kHz] + Basses PP2 [0-60%]



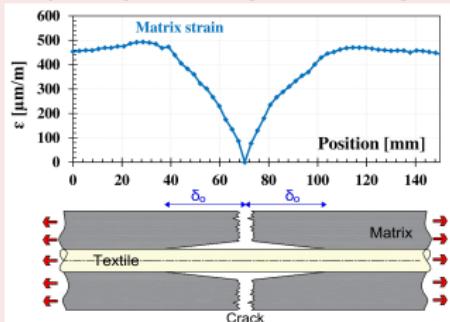
Classe 1 ➡ Fissuration de la matrice

Hautes WPF [300-400 kHz, voire au-delà]



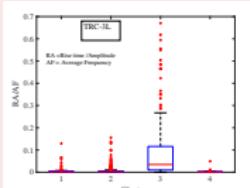
Classe 2 ➡ Interface textile/matrice

WPF moyennes [200-350 kHz] + Hautes PP2 [60-100%]



Classe 3 ➡ Frottements

Basses WPF [0-200 kHz] + Basses PP2 [0-60%]



➡ Long temps de montée et fréquences faibles

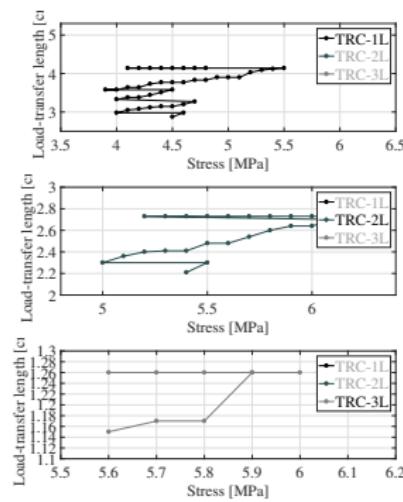
➡ Focalisation sur la classe 2

Résultats - Endommagement de l'interface textile/matrice

Longueur de transfert de charge

Fibre optique [SAIDI et GABOR, 2020]

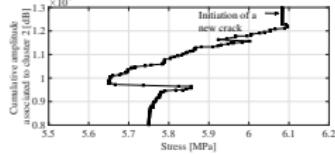
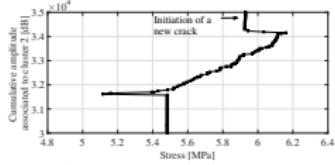
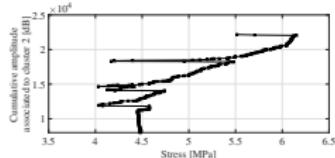
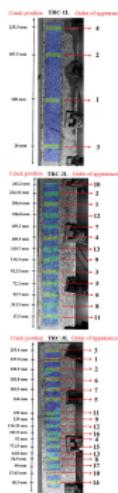
Première fissure



Amplitudes cumulées des signaux de la classe 2

Emission acoustique

Capteurs entourant la première fissure



Résultats - Endommagement de l'interface textile/matrice

① Longueur de transfert moyenne

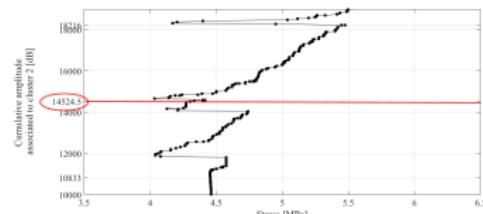
$$\delta_{0,moy} = \frac{1}{2} \left(X_{min} + \frac{X_{max}}{2} \right)$$

X_{min} et X_{max} : espacements entre fissures respectivement minimal et maximal.

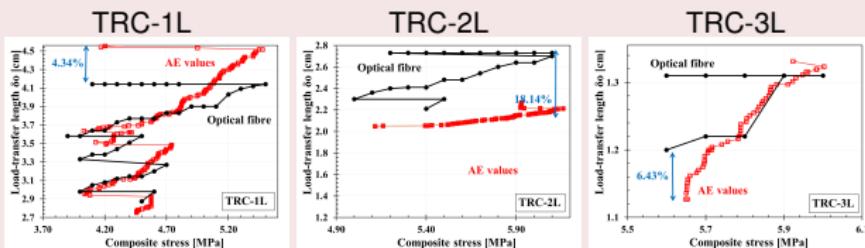
$$\delta_{0,moy}(TRC-1L) = 3.6 \text{ mm}$$

② Amplitude cumulée moyenne

$$CA_{moy} = \frac{1}{2} (CA_{min} + CA_{max})$$



③ Définition d'un facteur de correspondance : $\alpha = \frac{\delta_{0,moy}}{CA_{moy}}$ $\Rightarrow \delta_{0,EA} = \alpha \times CA$



Résultats - De la longueur de transfert à l'ouverture de fissure

$$w = 2s(\delta_0)$$

➊ Détermination du déplacement relatif matrice/textile : $s(x)$

En supposant une relation de linéarité $\tau(x) = k_{bo}s(x)$:

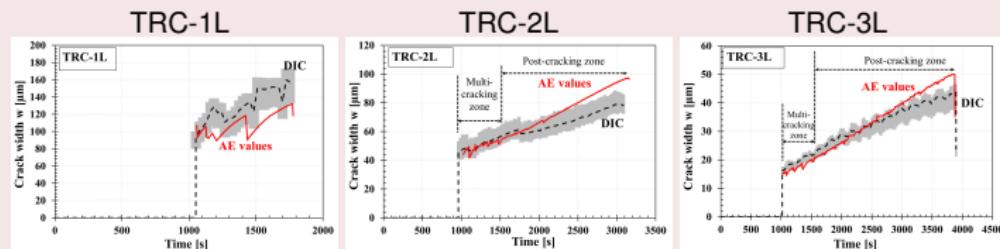
$$\frac{d^2s(x)}{dx^2} - \lambda^2 s(x) = 0 \quad \text{avec} \quad \lambda = \sqrt{\frac{2\pi r N_y (1 + \rho\alpha) k_{bo}}{A_f E_f}}$$

A_m et E_m	Section et module de la matrice	A_f et E_f	Section et module du textile
r	Rayon d'un fil	N_y	Nombre de fils
$\rho = A_f/A_m$	Rapport des sections	$\alpha = E_f/E_m$	Rapport des modules

➡ $s_{MCZ}(x)$ et $s_{PCZ}(x)$

➋ Détermination du coefficient k_{bo}

➌ Détermination de l'ouverture de fissure



Conclusions et Perspectives

- Lien entre paramètres acoustiques (RA, AF, PPs) et zones de comportement du TRC
 - **Classification des signaux acoustiques** et proposition d'une **interprétation** des classes en lien avec les **mécanismes d'endommagement** connus d'un TRC : fissuration matricielle, endommagement de l'interface, frottements, sollicitation du textile
 - L'évolution de l'**amplitude cumulée des signaux de la classe 2 (interface)** renseigne sur le développement de la **longueur de transfert** .
 - **Modèle de calcul de l'ouverture de fissure** en fonction de la longueur de transfert.
-
- Besoin de consolider ces résultats en élargissant la campagne expérimentale menée
 - Besoin de suivre par émission acoustique l'endommagement d'un TRC, utilisé en renforcement de structure.