

ARA CONSTRUCTIONS

46 RN N113  
30620 BERNIS

A l'attention de Monsieur Vincent REMY

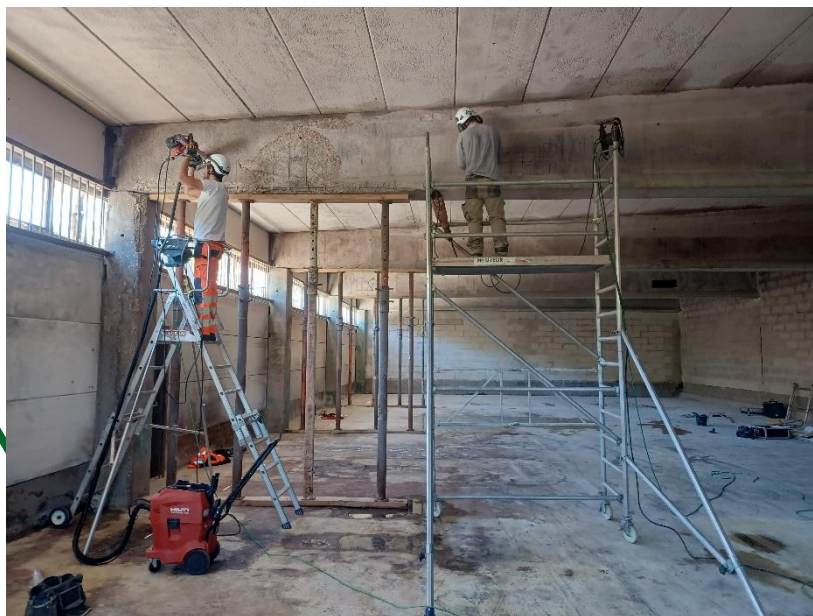
# RAPPORT D'ÉTUDE

*Secteur d'activité : Ingénierie de l'existant*

Diagnostic incendie du BSI des Douanes -  
Nîmes (30)

RAPPORT N° 56965.001.01.A

ARLES, LE 24 MAI 2024



Source : image LERM



setec  
lerm



[www.lerm.fr](http://www.lerm.fr)

**REFERENCES DE L'ETUDE**

<i>Référence du dossier</i>	56965
<i>Référence du document</i>	56965.001.01.A
<i>Nombre de pages</i>	33
<i>Nombre d'annexes</i>	0
<i>Nombre de rapports d'essais COFRAC</i>	Sans objet
<i>Référence de la proposition Lerm</i>	PE009565.2
<i>Client</i>	ARA CONSTRUCTIONS
<i>Référence commande</i>	Bon pour accord sur devis du 20/03/2024

**REALISATION**

<i>Agence Lerm</i>	Agence d'Arles 23 rue de la Madeleine 13200 Arles
<i>Votre correspondant email</i>	François MARTIN <a href="mailto:francois.martin@setec.com">francois.martin@setec.com</a>
<i>Téléphone</i>	+33 6 87 76 23 35

**REVISION DU DOCUMENT**

Indice	Date	Nature des modifications
A	24/05/2024	Création du document
B		
C		

**VALIDATION DU DOCUMENT**

Indice	Rédaction	Vérification et approbation
A	Béatrice MASSON et Sophie DECOSTER <i>Ingénieures attachées d'études</i>	François MARTIN <i>Directeur des agences</i>
B		
C		

**DIFFUSION DU DOCUMENT**

Destinataire	Format du document
<b>ARA CONSTRUCTIONS</b> Vincent REMY <a href="mailto:vremy@araconstructions.fr">vremy@araconstructions.fr</a>	pdf
<b>Lerm - Agence d'Arles</b> Béatrice MASSON et Sophie DECOSTER <a href="mailto:beatrice.masson@setec.com">beatrice.masson@setec.com</a> et <a href="mailto:sophie.decoster@setec.com">sophie.decoster@setec.com</a>	pdf
<b>Lerm - Agence d'Arles</b> François MARTIN <a href="mailto:francois.martin@setec.com">francois.martin@setec.com</a>	pdf

Ce dossier a été réalisé dans une entreprise dont le système de management de la qualité est certifié ISO 9001 par AFAQ/AFNOR Certification.

---

## SOMMAIRE

---

<b>1 -</b>	<b>OBJET</b>	<b>4</b>
<b>2 -</b>	<b>PROGRAMME DE L'ETUDE</b>	<b>4</b>
<b>3 -</b>	<b>LOCALISATION DES INVESTIGATIONS SUR SITE</b>	<b>5</b>
<b>4 -</b>	<b>RESULTATS DES INVESTIGATIONS SUR SITE</b>	<b>9</b>
	4.1 Mesures de tension par essai à l'arbalète	9
	4.2 Statistiques d'enrobage	10
	4.3 Mesure de vitesse du son	13
	4.4 Mesure de la dureté superficielle du béton	14
<b>5 -</b>	<b>IDENTIFICATION DES ECHANTILLONS</b>	<b>16</b>
<b>6 -</b>	<b>RESULTATS OBTENUS EN LABORATOIRE</b>	<b>20</b>
	6.1 Détermination du profil de vitesse du son	20
	6.2 Détermination de la résistance mécanique à la compression	22
	6.3 Examen au microscope électronique à balayage	23
<b>7 -</b>	<b>SYNTHESE</b>	<b>31</b>
<b>8 -</b>	<b>CONCLUSION</b>	<b>32</b>

## 1 - OBJET

A la demande et pour le compte de ARA CONSTRUCTIONS, le LERM a été chargé, d'avril à mai 2024, de réaliser une étude ayant pour objectif d'effectuer un diagnostic incendie de certaines des poutres du BSI des Douanes, situé au 244 rue Marcel Pélissier à Nîmes (30).

## 2 - PROGRAMME DE L'ETUDE

Conformément au programme préétabli, les essais sur site et en laboratoire ont été les suivants :

### Investigations sur site

- préparation de l'intervention sur site (matériel, véhicule),
- intervention sur site de trois personnes spécialisées du LERM intégrant les prestations suivantes :
  - observation des désordres affectant la structure,
  - réalisation de mesures de dureté superficielle du béton au scléromètre,
  - auscultation sonique par méthode directe,
  - mesures d'enrobage des armatures,
  - prélèvement de béton par carottage sur 3 zones, à proximité immédiate du foyer, en zone saine et en zone intermédiaire,
  - réalisation de 2 fenêtres (zone visuellement saine et zone dégradée) pour dégagement des unités de précontrainte,
  - essai à l'arbalète pour mesure de la tension résiduelle.

### Essais en laboratoire

- description et examen macroscopique des échantillons,
- auscultation sonique sur béton : mesure du temps de propagation des ondes selon la norme NF P 18-418,
- mesure de la résistance mécanique en compression selon la norme NF EN 12504-1,
- observation au microscope électronique à balayage (MEB), couplée à l'analyse qualitative élémentaire par spectrométrie X à dispersion d'énergie (EDS) sur fractures fraîches, estimation de la profondeur d'altération du béton,
- observation au microscope électronique à balayage (MEB), couplée à l'analyse qualitative élémentaire par spectrométrie X à dispersion d'énergie (EDS) sur fractures fraîches d'un échantillon témoin après traitement thermique en laboratoire, sur 5 franges de béton à cœur de la zone saine, puis examen comparatif et enfin estimation de la température atteinte avec :
  - échantillon témoin (sans traitement thermique),
  - échantillon à 100 °C,
  - échantillon à 200 °C,
  - échantillon à 400 °C,
  - échantillon à 500 °C.

### 3 - LOCALISATION DES INVESTIGATIONS SUR SITE

Les investigations ont été réalisées sur les 3 poutres dénommées P2, P3 et P4 dans le document « Avis structure état des poutres suite incendie dans le garage » du 9 février 2024 établi par la société BETM.

D'après les données d'entrée, l'incendie a eu lieu au niveau des véhicules stationnés entre les poutres P1 et P4 (cf. encadré bleu en Fig.1), toutefois les poutres ayant été nettoyées par sablage en amont de notre intervention nous n'avons pas pu définir visuellement la zone d'influence de l'incendie (élimination des traces de suie). Le choix des poutres a donc été fait suite aux constats des désordres observés en surface des parements des poutres, à savoir que nous avons sélectionnés la poutre P2 comme étant la poutre dégradée, P3 comme étant la poutre intermédiaire et P4 la poutre de référence (poutre visuellement saine).



Fig. 1 : Vue en plan du bâtiment

Les principaux désordres observés sur les poutres sont :

Pour P2 -> Zone dégradée :

- Faïençage et fissure de peau du béton,
- Coloration rosée de la matrice en surface,
- Ecaillage du béton de surface avec mise à nu des granulats,
- Présence d'une épaufrure en face Est et sur l'arrête inférieure, avec aciers apparents.



Fig. 2 : Principaux désordres observés sur P2



Pour P3 -> Zone intermédiaire :

- Faïençage et fissure de peau du béton,
- Coloration rosée de la matrice en surface,
- Ecaillage du béton de surface avec mise à nu des granulats.



*Fig. 3 : Principaux désordres observés sur P3*

Pour P4 -> Zone témoin :

- Quelques porosités en surface du parement



*Fig. 4 : Etat de surface du béton de P4*

La répartition de l'échantillonnage et des essais sur les poutres sont présentés dans le tableau suivant :

Zone		Carottage	Fenêtre mécanique	Statistique d'enrobage	Mesure de Vitesse du son	Mesure d'indice sclérométrique
Poutre 2 Zone incendiée	Face Est	56965-6 et -7	FM1	X	X	X
	Face Ouest	/	/	X	X	X
Poutre 3 Zone intermédiaire	Face Est	56965-4, -5 et -8	/	X	X	X
	Face Ouest	/	/	X	X	X
Poutre 4 Zone saine	Face Est	56965-1,-2 et -3	FM2	/	X	X
	Face Ouest	/	/	/	X	X

Tableau 1 : Répartition des investigations sur site sur les différentes poutres étudiées

Ces zones sont par ailleurs illustrées sur la figure 5 en page suivante.



Fig. 5 : Localisation des investigations sur site



## 4 - RESULTATS DES INVESTIGATIONS SUR SITE

### 4.1 Mesures de tension par essai à l'arbalète

Les résultats des essais à l'arbalète sont donnés dans les tableaux suivants.


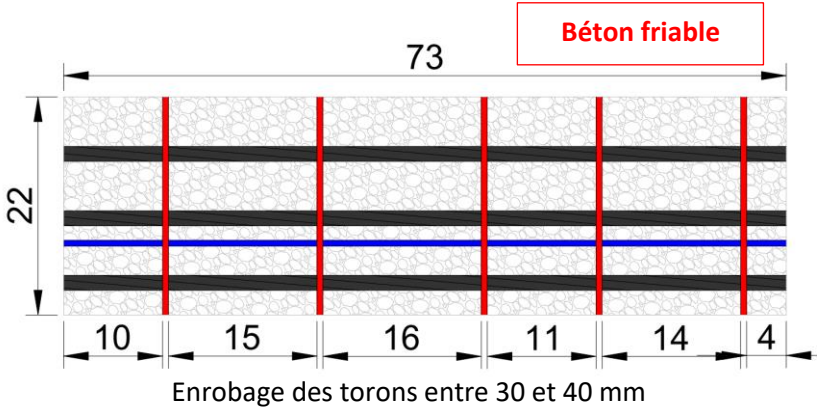
FM1 / Poutre n°2 incendiée		
		
	Enrobage des torons entre 30 et 40 mm	
Toron testés	Tension moyenne du toron (kN/toron)	Contrainte (MPa)
Unité 1 sur câble haut	136	980
Unité 1 sur câble milieu	140	1012
Unité 1 sur câble bas	133	958
<b>Moyenne sur les 3 unités</b>	<b>136</b>	<b>983</b>

Tableau 2 : Résultats des mesures de tension à l'arbalète sur les câbles fenêtre FM1 sur poutre incendiée


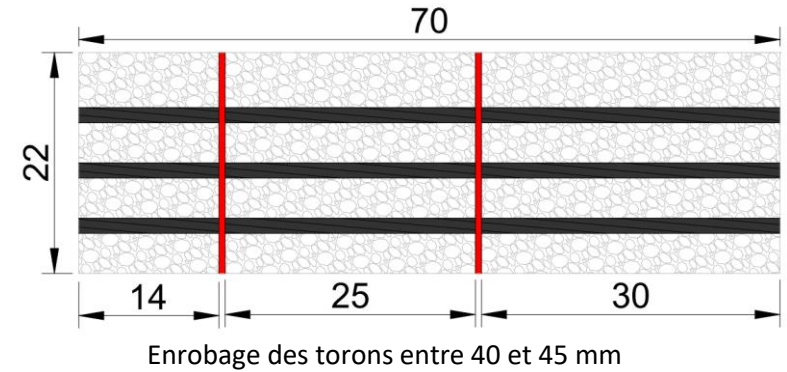
FM2 / Poutre n°4 saine		
		
	Enrobage des torons entre 40 et 45 mm	
Toron testés	Tension moyenne du toron (kN/toron)	Contrainte (MPa)
Unité 1 sur câble haut	137	991
Unité 1 sur câble milieu	150	1083
Unité 1 sur câble bas	155	1121
<b>Moyenne sur les 3 unités</b>	<b>148</b>	<b>1065</b>

Tableau 3 : Résultats des mesures de tension à l'arbalète sur les câbles fenêtre FM2 sur poutre saine

3 torons de précontrainte longitudinale ont été testés en âme de la 2<sup>ème</sup> poutre : la tension résiduelle mesurée est de l'ordre de 136 kN/toron, soit une contrainte résiduelle de 983 MPa.

3 torons de précontrainte longitudinale ont été testés en âme de la 4<sup>ème</sup> poutre : la tension résiduelle mesurée est de l'ordre de 148 kN/toron, soit une contrainte résiduelle de 1065 MPa.

#### **Interprétation globale :**

**6 torons ont été testés sur 2 poutres différentes, dans 2 fenêtres distinctes, la première au cœur du foyer et la deuxième en zone visuellement saine.**

**Les tensions résiduelles mesurées sont relativement semblables malgré les désordres observés (béton friable sur la zone dégradé et faciès de décollement). On note cependant des valeurs, et donc une moyenne, légèrement plus faibles en zone dégradée qu'en zone visuellement saine.**

#### **Incertitudes**

Les coefficients de corrélation des régressions linéaires pratiquées sur les courbes d'arbalète, sont bons ( $iQ=(1-r^2)$  de 1 à  $3,10^{-5}$ ). L'incertitude maximale sur les résultats individuels est évaluée à  $\pm 0,3$  kN, et sur la moyenne à  $\pm 0,2$  kN, soit environ  $\pm 1$  %.

La moyenne de l'échantillon des fils longitudinaux testés peut être considérée comme un estimateur de la contrainte de tous les câbles de l'ouvrage à l/2, avec une incertitude supplémentaire de  $\pm 1,0$  kN au seuil de confiance  $(1-\alpha)$  de 90 %.

Au total, l'incertitude est alors de  $\pm 1,2$  kN, soit environ  $\pm 4,7$  % de la moyenne des valeurs mesurées. **L'intervalle d'incertitude sur la moyenne des tensions mesurées est au final de [0 à 5,1] kN et en contrainte [0 à 36,8] MPa.**

## **4.2 Statistiques d'enrobage**

Les résultats des mesures d'enrobage réalisées par auscultation radar sont présentés sous forme d'histogrammes de répartition par classe d'enrobage de 5 mm sur les Figures 6 à 10 ci-après.

Ces mesures ont concerné les zones suivantes :

- les cadres des blocs d'ancrage des poutres P2, P3 et P4,
- les cadres des âmes des poutres P2 et P3.

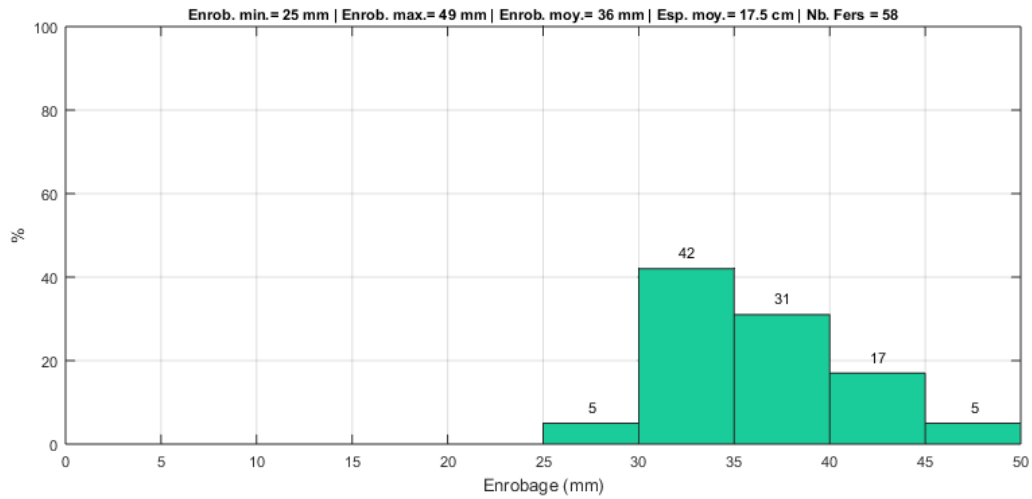


Fig. 6 : Enrobage des cadres du bloc d'about de la poutre P2 – Zone incendiée

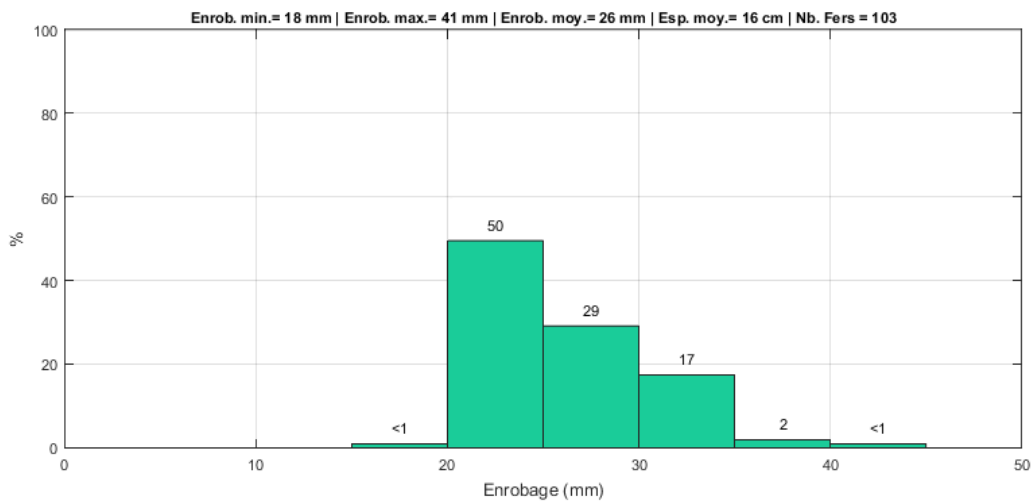


Fig. 7 : Enrobage des cadres de l'âme de poutre de P2 – Zone incendiée

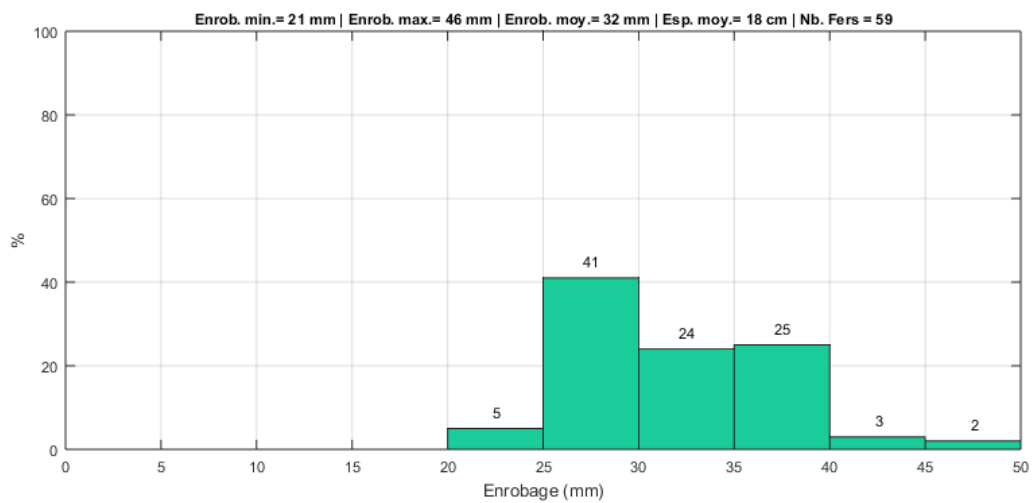


Fig. 8 : Enrobage des cadres du bloc d'about de la poutre P3 – Zone intermédiaire

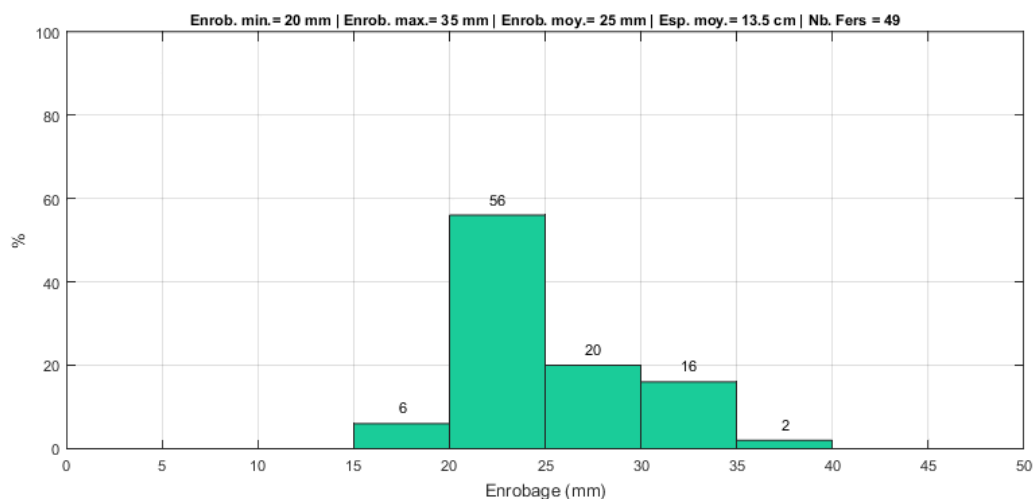


Fig. 9 : Enrobage des cadres de l'âme de poutre de P3 – Zone intermédiaire

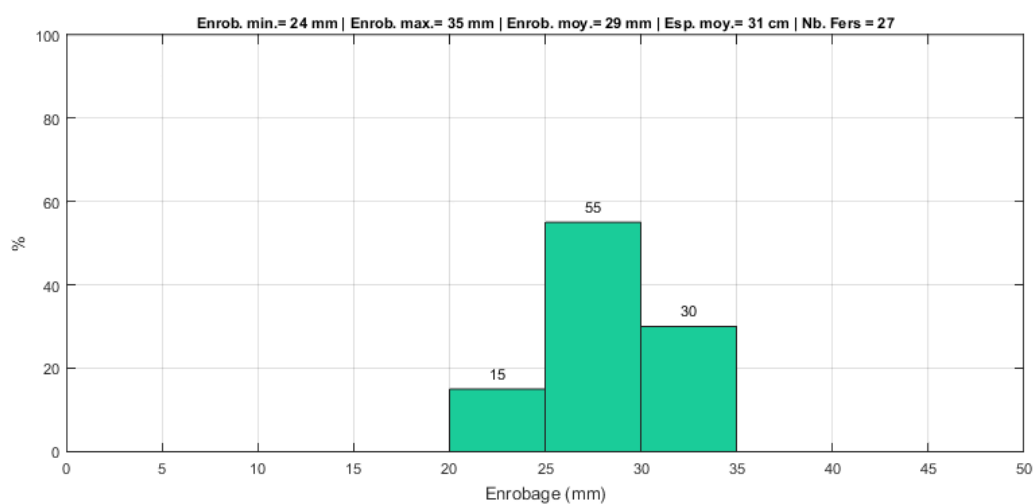


Fig. 10 : Enrobage des cadres du bloc d'about de la poutre P4 – Zone visuellement saine

Ces résultats sont synthétisés dans le tableau suivant :

Zone		Enrobage min	Enrobage max	Enrobage moyen
Poutre 2 Zone incendiée	Bloc d'ancrage	25	49	36
	Ame	18	41	26
Poutre 3 Zone intermédiaire	Bloc d'ancrage	21	46	32
	Ame	20	35	25
Poutre 4 Zone visuellement saine	Bloc d'ancrage	24	35	29

Tableau 4 : Synthèse des résultats des mesures d'enrobage des cadres des poutres



### 4.3 Mesure de vitesse du son

Le principe est basé sur la mesure du temps de propagation des ondes soniques ou ultrasoniques longitudinales, émise par une source (impact marteau) jusqu'à un récepteur. Connaissant la distance « d » entre la source et le récepteur, la vitesse de propagation (V, exprimée en mètres par seconde) peut être calculée avec l'équation  $V = d / t$ .

Une diminution relative localisée de la vitesse de propagation des ondes longitudinales, par rapport à la vitesse moyenne théorique du matériau sain (vitesse connue ou mesurée dans une zone saine), indique la présence d'un défaut, à savoir une fissuration ou une décohésion provoquée par une altération du matériau.

Dans le cas présent, il convient de comparer les ordres de grandeur des vitesses mesurées en zone visuellement saine (P4) avec celles mesurées en zone intermédiaire (P3) et dégradée (P2) afin de délimiter les zones impactées par l'incendie.

En ce qui concerne l'auscultation sonique, des zones d'environ 1 m de largeur ont été implantées en partant de l'about et jusqu'à minima la mi-travée de la poutre afin de s'éloigner du foyer de l'incendie. Les mesures ont ensuite été réalisées dans ces zones par le biais de mesures directes (par transparence) suivant un espacement d'environ 20 cm dans les deux directions (cf zonages en Figure 11).

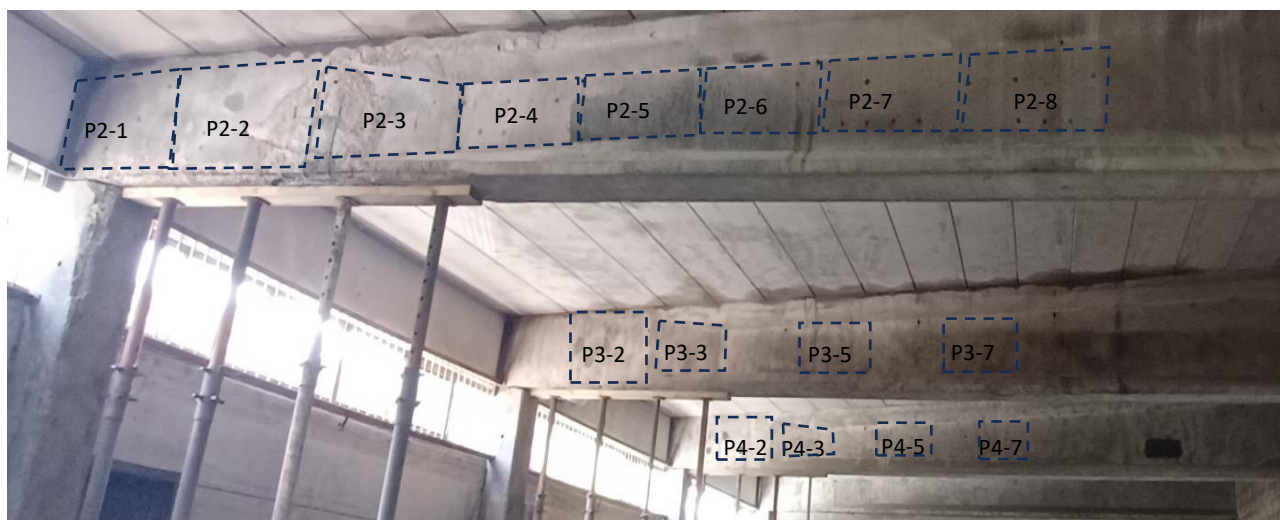


Fig. 11 : Localisation des zones de mesure de vitesse du son

Les valeurs moyennes des vitesses mesurées dans chaque zone (moyenne sur 10 à 20 mesures par zone) sont données dans le tableau suivant.

	Position/about de poutre	Bloc d'ancrage		/	Ame de poutre				
		0 - 1,1 m	1,1 - 2,2 m		3,2 - 4,2 m	4,2 - 5,2 m	5,2 - 6,2 m	6,2 - 7,2 m	7,2 - 8,2 m
	Zone	Pn-1	Pn-2	Pn-3	/	Pn-5	/	Pn-6	/
P4 Zone saine	Vson (m/s)	Nm	3595	3445	Nm	2770	Nm	2870	Nm
P3 Zone	Vson (m/s)	Nm	3285	3340	Nm	2580	Nm	2390	Nm
P2 Zone dégradée	Vson (m/s)	2220	2375	2695	2570	Nm	2360	2440	2540

Tableau 5 : Synthèse des résultats des mesures de vitesse du son des poutres P2, P3 et P4

Nm : Zones non mesurées, zones moins déterminantes pour l'étude

Ces résultats appellent les commentaires suivants :

- les valeurs de vitesse du son considérées comme celles de référence, sont celles mesurées en zone visuellement saine et sont colorées en vert,
- il apparait que les vitesses mesurées sur la poutre intermédiaire (P3) sont de l'ordre de 5 à 10% plus faibles que celle mesurées sur la poutre visuellement saine et cela sur toute la longueur de la poutre,
- il apparait que les vitesses mesurées sur la poutre dégradée (P4) sont beaucoup plus faibles que pour la poutre visuellement saine, à savoir
  - de l'ordre de 35% plus faible au niveau du bloc d'ancrage,
  - d'environ 20% plus faible au niveau de la zone d'amincissement,
  - et de 15% plus faible en âme.

#### 4.4 Mesure de la dureté superficielle du béton

Les mesures de dureté superficielle du béton ont été réalisées à l'aide d'un scléromètre dans les zones précédemment définies (Figure 11), sur les 2 faces des poutres P2, P3 et P4 en respectant un espacement de 20 cm.

Dans un premier temps, les mesures ont été réalisées sur P4, considérée comme zone saine afin d'étalonner le scléromètre et de définir une valeur de référence. Puis, dans un second temps, elles ont été réalisées sur P2 et P3 depuis l'about et jusqu'à mi-travée dans le but de définir l'étendue de la zone dégradée.

Les valeurs moyennes (moyenne sur 10 à 20 mesures par zone) des indices sclérométriques mesurés sont présentées dans le tableau suivant :

	Position/about de poutre		Bloc d'ancrage		/	Ame de poutre				
			0 - 1,1 m	1,1 -2,2 m	2,2 - 3,2 m	3,2 - 4,2 m	4,2 - 5,2 m	5,2 - 6,2 m	6,2 - 7,2 m	7,2- 8,2 m
	Zone		Pn-1	Pn-2	Pn-3	/	Pn-5	/	Pn-6	/
P4 Zone saine	Face Ouest	Indice sclérométrique (Is)	Nm	52	51	Nm	47	Nm	49	Nm
	Face Est		Nm	54	53	Nm	51	Nm	51	Nm
P3 Zone intermédiaire	Face Ouest	Indice sclérométrique (Is)	Nm	44	50	Nm	47	Nm	42	Nm
	Face Est		Nm	45	44	Nm	46	Nm	36	Nm
P2 Zone dégradée	Face Ouest	Indice sclérométrique (Is)	49	49	48	43	44	46	48	48
	Face Est		Nm	39	41	42	44	45	47	48

Tableau 6 : Synthèse des résultats des mesures d'indices sclérométriques des poutres P2, P3 et P4

Nm : Zones non mesurées, zones moins déterminantes pour l'étude

Ces résultats appellent les commentaires suivants :

- les indices sclérométriques mesurés sur la poutre de référence P4 sont homogènes sur la longueur de la poutre est sont compris entre 47 et 54, avec un indice moyen sur les 2 faces de 51,
- il apparaît que les indices sclérométriques moyens mesurés sur les poutres P2 et P3 sont du même ordre sur les 2 poutres. Ils sont respectivement de 45 et 44 (moyenne sur les 2 faces), toutefois ils ne présentent pas les mêmes profils, en effet :
  - en zone intermédiaire (P3), les indices sclérométriques les plus faibles (<42) sont mesurés entre 6,2 et 7,2m de l'about,
  - en zone dégradée (P2), les indices sclérométriques sont hétérogènes. Les plus faibles indices (<42) sont mesurés de 1,2 à 4,2m de la face Est de la poutre.

Il est à noter que :

- les mesures d'indices sclérométriques réalisés sur les bétons des zones intermédiaires et dégradées ont été réalisées après nettoyage par hydrosablage de ces poutres (retrait de la pellicule superficielle altérée), sur des bétons présentant des désordres surfaciques, alors que la poutre P2 (poutre visuellement saine) n'a pas fait l'objet de ce traitement car elle ne présentait pas ces défauts.

Par conséquent, les résultats sclérométriques sont à interpréter avec précaution pour les poutres P2 et P3 qui ont fait l'objet d'un traitement de surface susceptible de modifier les indices de rebondissement,

- Les indices sclérométriques, peuvent être ramenés à des valeurs de résistance en compression via une abaque de référence. Le tableau suivant présente la correspondance entre l'indice sclérométrique et la résistance en compression pour les valeurs moyennes mesurées sur les 3 poutres.

Zone	Indice sclérométrique moyen sur les 2 faces de la poutre	Résistance en compression en MPa
Poutre 2 Zone incendiée	45	44 ± 7,5
Poutre 3 Zone intermédiaire	44	42 ± 7,0
Poutre 4 Zone saine	51	56 ± 7,5

Tableau 7 : Equivalence indice sclérométrique / résistance en compression sur les poutres étudiées

## 5 - IDENTIFICATION DES ECHANTILLONS

Le Tableau 8 donne les références et les principales caractéristiques des échantillons réceptionnés par le LERM le 5 avril 2024.

Ces échantillons sont par ailleurs illustrés par les figures ci-dessous (Fig. 12 à Fig. 27).

Réf. LERM	Zone	Description	Dimensions
56965-1	Zone visuellement saine (Poutre 4)	Carotte de béton constituée d'une matrice de couleur gris clair enrobant des granulats mixtes (roulés et concassés) de diamètre maximal $D_{\max} = 14$ mm. Quelques vacuoles sont présentes. La surface du béton est de teinte légèrement beige rosé et présente quelques vacuoles.	m = 1,59 kg $\varnothing = 75$ mm L = 160 mm
56965-2		Carotte présentant des caractéristiques similaires à celles de l'échantillon 56965-1. La surface est de teinte gris beige.	m = 1,88 kg $\varnothing = 75$ mm L = 190 mm
56965-3		Carotte présentant des caractéristiques similaires à celles de l'échantillon 56965-1. La surface est de teinte gris beige. Rupture cohésive entre 120 et 160 mm de profondeur.	m = 1,97 kg $\varnothing = 75$ mm L = 200 mm
56965-4	Zone intermédiaire (Poutre 3)	Carotte présentant des caractéristiques similaires à celles de l'échantillon 56965-1. Toutefois, la matrice apparaît de teinte légèrement plus foncée. La surface est de teinte beige rosé sombre et des granulats affleurants sont visibles. Une frange de teinte rosée est observée jusqu'à $\approx 10$ mm de profondeur, suivie d'une frange de teinte gris beige allant jusqu'à $\approx 20-25$ mm de profondeur. Rupture cohésive entre 55 et 145 mm de profondeur.	m = 1,81 kg $\varnothing = 75$ mm L = 185 mm
56965-5		Carotte présentant des caractéristiques similaires à l'échantillon 56965-4. Aucun granulat n'affleure en surface. Le front rosé s'étend jusqu'à 10 mm de profondeur et le front beige jusqu'à $\approx 35$ mm. Une fissure en écaille s'étend jusqu'à une profondeur de 30 mm. Rupture cohésive de 95 à 145 mm de profondeur.	m = 1,89 kg $\varnothing = 75$ mm L = 190 mm
56965-6	Zone incendiée (Poutre 2)	Carotte présentant des caractéristiques similaires à l'échantillon 56965-4. Une portion de la surface est gris foncé et des granulats affleurent, l'autre est dégradée sur 4 à 8 mm d'épaisseur. Le front rosé, davantage marqué, s'étend jusqu'à 10 mm et le front beige jusqu'à $\approx 30$ mm. Rupture cohésive de 40 à 80 mm de profondeur.	m = 1,86 kg $\varnothing = 75$ mm L = 185 mm
56965-7		Carotte présentant des caractéristiques similaires à l'échantillon 56965-4. Une portion de la surface est gris clair et peu de granulats affleurent, l'autre est dégradée sur 5 mm d'épaisseur. Une fissure est visible sur surface. Le front rosé s'étend jusqu'à 10 mm de profondeur et le front beige jusqu'à 30 à 35 mm.	m = 1,88 g $\varnothing = 75$ mm L = 190 mm
56965-8	Zone intermédiaire (Poutre 3)	Carotte présentant des caractéristiques similaires à l'échantillon 56965-4. Des granulats affleurent en surface. Une fissure en écaille s'étend jusqu'à 110 mm de profondeur. Le front rosé s'étend jusqu'à 15 mm de profondeur et le front beige jusqu'à 30 à 35 mm.	m = 1,180kg $\varnothing = 75$ mm L = 180 mm

Tableau 8 : Identification des échantillons





Fig. 12 : Aspect de l'échantillon 56965-1



Fig. 13 : Aspect de l'échantillon 56965-1



Fig. 14 : Aspect de l'échantillon 56965-2



Fig. 15 : Aspect de l'échantillon 56965-2



Fig. 16 : Aspect de l'échantillon 56965-3



Fig. 17 : Aspect de l'échantillon 56965-3



Fig. 18 : Aspect de l'échantillon 56965-4



Fig. 19 : Aspect de l'échantillon 56965-4





Fig. 20 : Aspect de l'échantillon 56965-5



Fig. 21 : Aspect de l'échantillon 56965-5



Fig. 22 : Aspect de l'échantillon 56965-6



Fig. 23 : Aspect de l'échantillon 56965-6



Fig. 24 : Aspect de l'échantillon 56965-7



Fig. 25 : Aspect de l'échantillon 56965-7



Fig. 26 : Aspect de l'échantillon 56965-8



Fig. 27 : Aspect de l'échantillon 56965-8

Le Tableau 9 ci-après donne la répartition des essais pour les différents échantillons fournis.

Réf. LERM	Zone	Résistance mécanique à la compression	Microscope électronique à balayage	Profil de vitesse du son
56965-1	Zone saine	-	X	-
56965-2		X	-	X
56965-3		-	X	-
56965-4	Zone intermédiaire	-	X	-
56965-5		X	-	X
56965-6	Zone incendiée	-	X	-
56965-7		X	-	X
56965-8	Zone intermédiaire	X	-	-

Tableau 9 : Répartition des essais et des échantillons utilisés pour cette étude

## 6 - RESULTATS OBTENUS EN LABORATOIRE

### 6.1 Détermination du profil de vitesse du son

La détermination des profils de vitesse de propagation des ultrasons a été réalisée selon le principe de la norme NF P 18-418 et de la méthode d'essai LPC n° 62.6.

Les vitesses de propagation des ondes soniques longitudinales sont mesurées par transparence à différentes profondeurs depuis la surface. Comme les carottes n'avaient pas une surface perpendiculaire, les mesures ont été adaptées. Toutefois, les vitesses ont été mesurées selon deux génératrices (a et b). La vitesse est calculée à partir de la mesure du temps de propagation d'un train d'ondes longitudinales, généré par un transducteur, entre deux points séparés par une distance connue :

$$V = l/t$$

Avec : l : distance entre les transducteurs en mètres (diamètre de la carotte au niveau du point de mesure),

t : temps de propagation de la première onde en secondes,

V : vitesse exprimée en mètre par seconde.

Ces mesures ont été réalisées sur les trois zones, soit au niveau du foyer, en zone moyennement dégradée et en zone a priori saine. Les valeurs moyennes des résultats suivant les 2 axes sont présentées dans le Tableau 10 et les profils de vitesse sur la profondeur des échantillons sont illustrées par les graphiques ci-après (Fig. 28 à Fig. 30).

Réf. LERM Zone	56965-2 Saine	56965-5 Intermédiaire	56965-7 Incendiée
Profondeur de mesure par rapport à la surface réelle de la paroi (en cm)	Moyenne de la vitesse de propagation des ondes soniques (en m/s)		
0,5	4224	2343	1917
1	4200	3906	3864
2	4398	4181	4292
3	4334	4447	4371
4	4297	4141	3950
5	4338	4092	3529
6	4195	4321	3830
7	4311	4281	4003
8	4269	4233	3954
9	4277	4149	3916
10	4200	-	3995

Tableau 10 : Résultats des mesures de vitesse de propagation des ondes soniques des éprouvettes 56965-2, -5 et -7



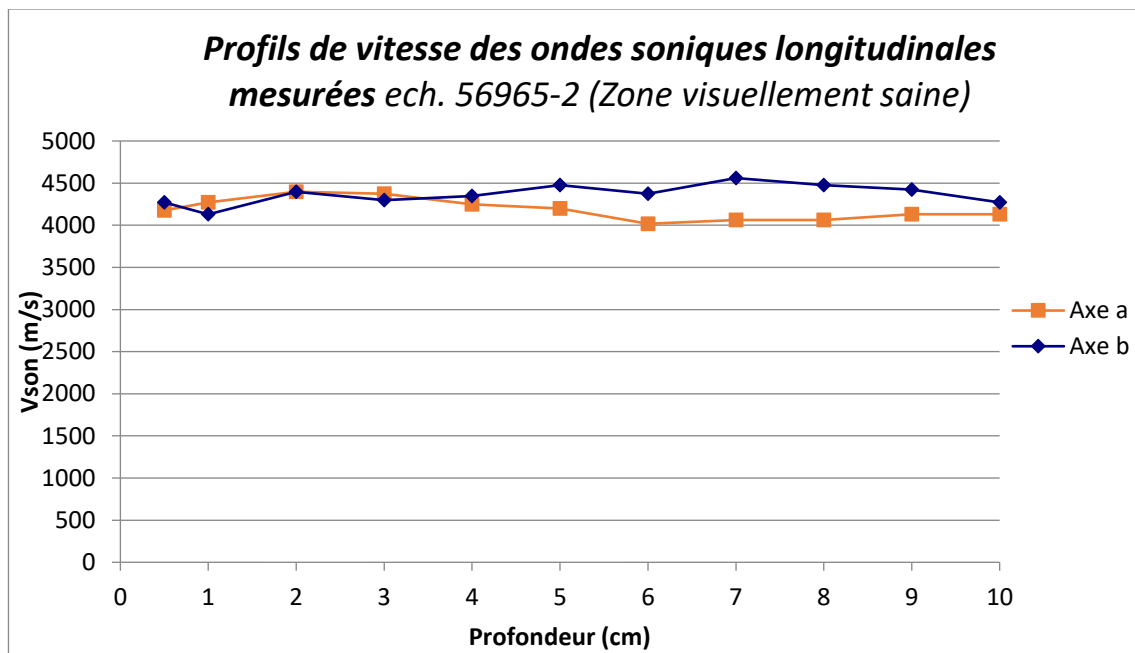


Fig. 28 : Profils de vitesse des ondes soniques longitudinales mesurées pour l'échantillon **56965-2** (Zone saine)

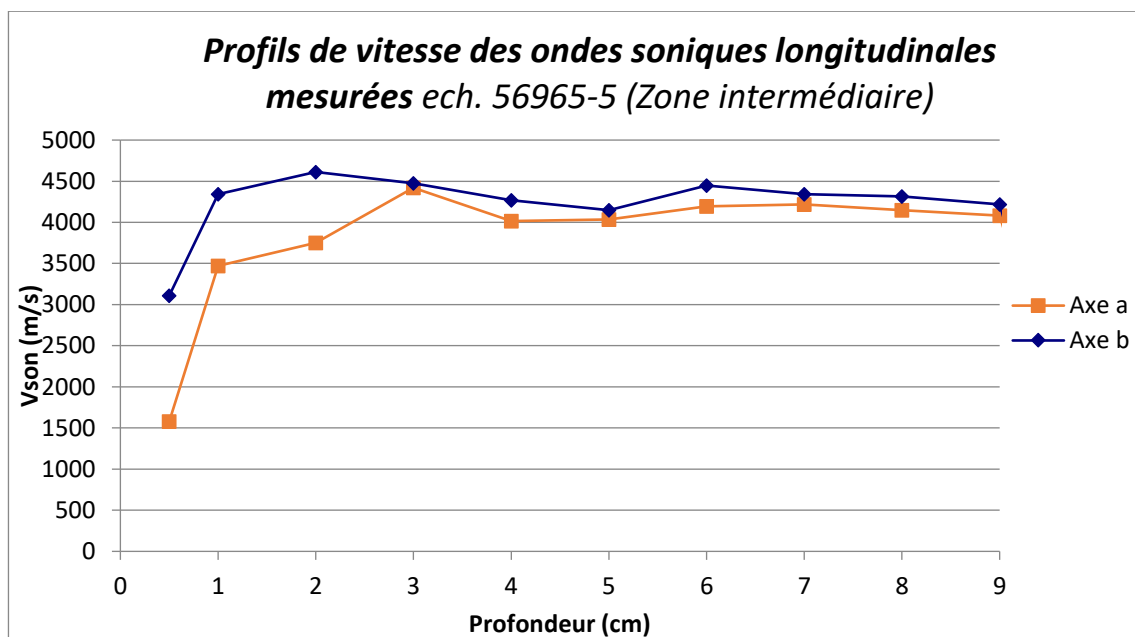


Fig. 29 : Profils de vitesse des ondes soniques longitudinales mesurées pour l'échantillon **56965-5** (Zone intermédiaire)

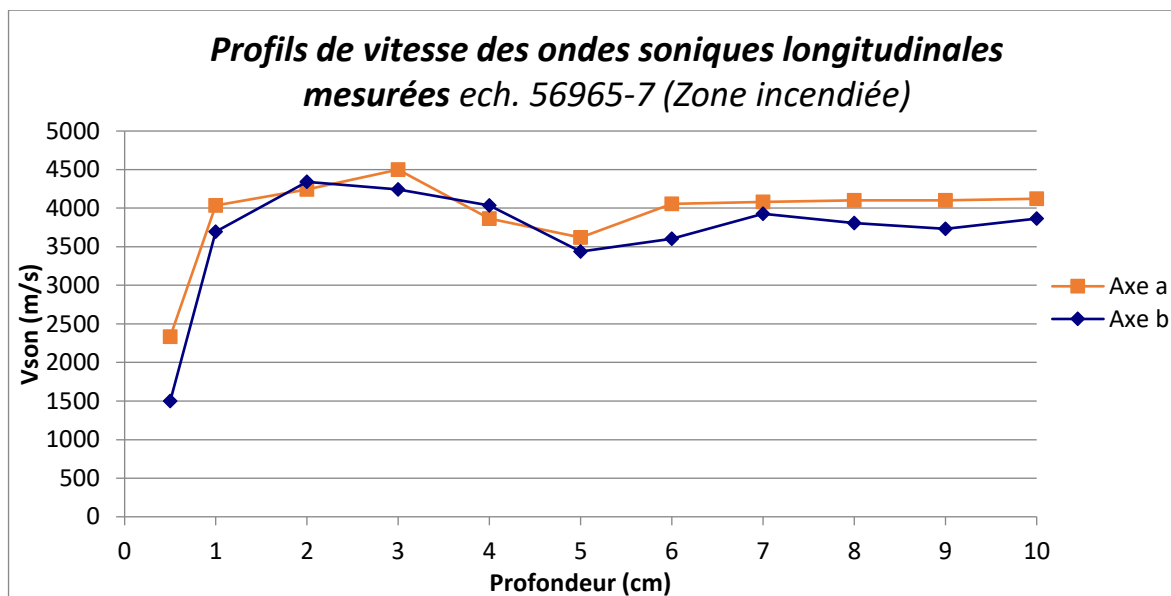


Fig. 30 : Profils de vitesse des ondes soniques longitudinales mesurées pour l'échantillon **56965-7** (Zone incendiée)

Les résultats ainsi obtenus permettent de faire les commentaires suivants :

- A partir de 2 cm de profondeur, la vitesse du son apparaît similaire dans tous les échantillons, quelle que soit la zone de prélèvement. Les valeurs sont élevées (supérieures ou proche de 4000 m/s) et correspondent à des bétons de bonne qualité,
- les échantillons 56965-2 et -7 présentent des vitesses du son plus faibles sur environ 1 à 2 cm d'épaisseur. Les vitesses moyennes mesurée, proche de la surface (à 0,5 cm), sont respectivement de 2343 m/s et 1917 m/s.
- de plus, l'échantillon 56965-7 présente un léger écart de mesure aux alentours de 5 cm qui pourrait être dû à un défaut localisé sur la carotte (fissure ou autre).

## 6.2 Détermination de la résistance mécanique à la compression

La détermination de la résistance à la compression des éprouvettes de béton a été réalisée selon la norme NF EN 12504-1. Les valeurs brutes mesurées ont été corrigées en fonction des règles de correction données par l'annexe française de la norme européenne NF EN 13791 de septembre 2007. Cette annexe française référencée NF EN 13791/CN, donne notamment des règles de correction à appliquer sur l'éclatement sur le diamètre de l'éprouvette.

Les caractéristiques mécaniques des échantillons de béton sont données dans le Tableau 11 ci-dessous.

Réf. LERM Zone	56965-2 Saine	56965-5 Intermédiaire	56965-7 Incendiée	56965-8 Intermédiaire
Elancement	2,0	1,1	2,0	2,0
Résistance à la compression mesurée (MPa)	59,5	44,3	38,4	31,7
Résistance à la compression corrigée avec la version 2021 de la norme NF EN 13791/CN (MPa)	66,1	41,6	43,8	36,4

Tableau 11 : Caractéristiques mécaniques des échantillons **56965-2, -5, -7 et -8**

### 6.3 Examen au microscope électronique à balayage

L'examen au microscope électronique à balayage, associé à la microanalyse élémentaire par spectrométrie X à dispersion d'énergie, a été réalisé sur fractures fraîches à partir des échantillons **56965-1a à 1e, 3, 4 et 6**. Il a permis de mettre en évidence les points essentiels suivants :

#### Echantillons 56965-1a à 1e (Fig. 31 à Fig. 46) :

Ces échantillons de béton confectionnés en laboratoire ont subi le traitement thermique suivant :

- une montée en température de 50°C/h,
- un palier de 5h,
- puis un refroidissement à 50°C/h,

L'échantillon **56965-1a** correspond au témoin, sans traitement thermique. Les températures atteintes pour les autres échantillons sont les suivantes :

- 100°C pour l'échantillon **56965-1b**,
- 200°C pour l'échantillon **56965-1c**,
- 400°C pour l'échantillon **56965-1d**,
- 500°C pour l'échantillon **56965-1e**.

L'échantillon témoin **56965-1a**, de teinte visuellement grise, se caractérise par une microstructure microporeuse et par une bonne cohésion générale entre la pâte de ciment et les granulats siliceux. La matrice cimentaire se compose essentiellement de silicates de calcium hydratés (C-S-H) granuleux accompagnés par de nombreux amas massifs de portlandite ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), d'aluminates et de mono-sulfo-aluminates de calcium hydratés (AFm). Quelques amas d'ettringite aciculaire sont également détectés dans certains micropores de la matrice cimentaire.

Les échantillons **56965-1b et 1c**, assez similaires à l'échantillon témoin, se composent d'un assemblage microporeux de C-S-H d'aspect granuleux à micro-granuleux intimement liés à quelques amas de portlandite massifs et d'AFm. L'ettringite aciculaire est, quant à elle, en proportion anecdotique dans certains micropores de la matrice cimentaire de l'échantillon **56965-1b** et absente dans l'échantillon **56965-1c**.

De plus, l'échantillon **56965-1c** renferme également quelques microfissures intergranulaires dans la matrice cimentaire.

Les échantillons **56965-1d et 1e** montrent une teinte visuellement rosâtre. Les hydrates apparaissent relativement transformés, amorphisés et sont associés à quelques amas de portlandite partiellement dissoute, caractérisée par des cristaux amincis plus ou moins fibreux. Dans l'échantillon **56965-1d**, ces amas sont également accompagnés par des amas de portlandite plus massifs, semblables aux cristaux rencontrés dans les échantillons **56965-1a à 1c**.

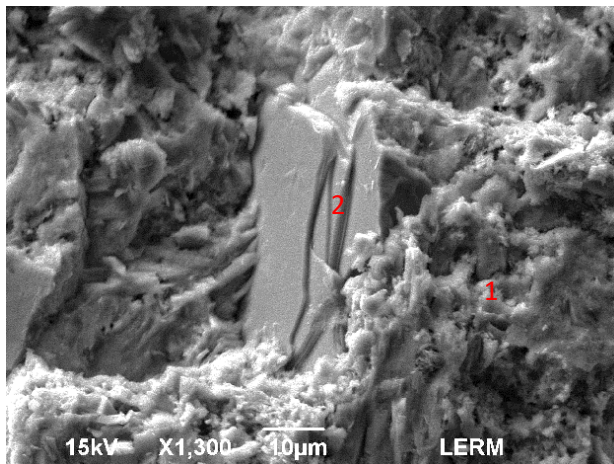


Fig. 31 : Microscopie électronique à balayage. Echantillon 56965-1a  
**Détail de la matrice cimentaire**  
 1 : C-S-H granuleux, 2 : portlandite massive

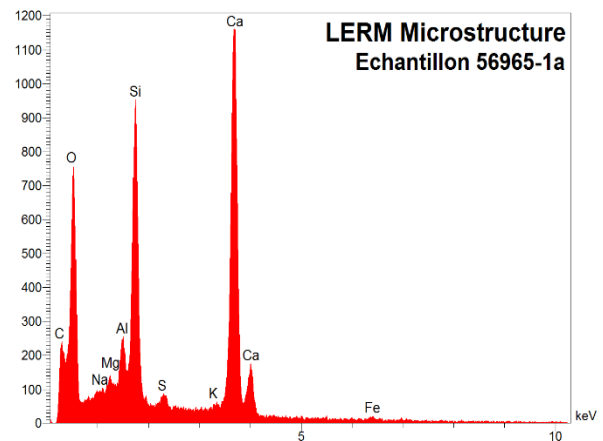


Fig. 32 : Analyse élémentaire par spectrométrie X à dispersion d'énergie au point 1 de la figure précédente

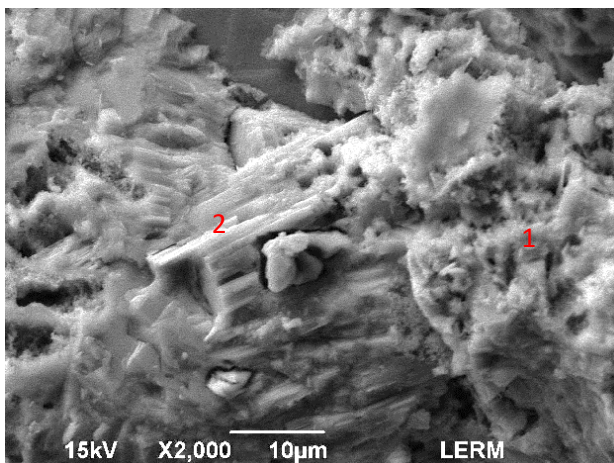


Fig. 33 : Microscopie électronique à balayage. Echantillon 56965-1a  
**Détail de la matrice cimentaire**  
 1 : C-S-H granuleux, 2 : portlandite massive

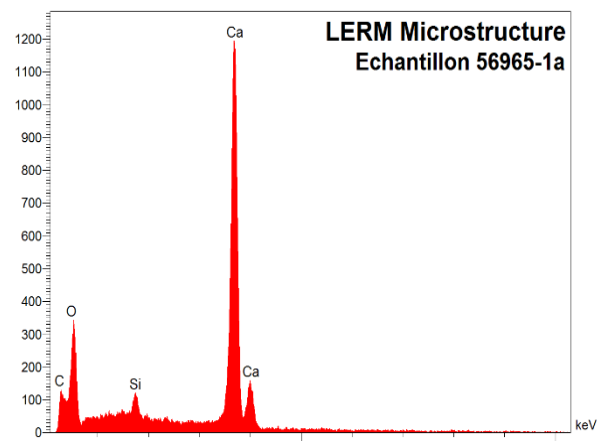


Fig. 34 : Analyse élémentaire par spectrométrie X à dispersion d'énergie au point 2 de la figure précédente

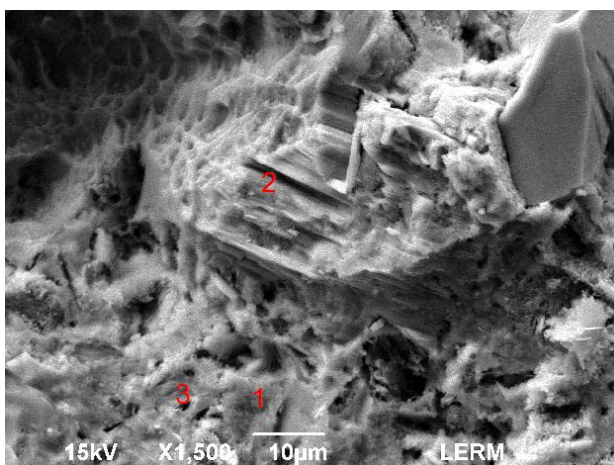


Fig. 35 : Microscopie électronique à balayage. Echantillon 56965-1b  
**Détail de la matrice cimentaire**  
 1 : C-S-H granuleux, 2 : portlandite massive, 3 : AFm

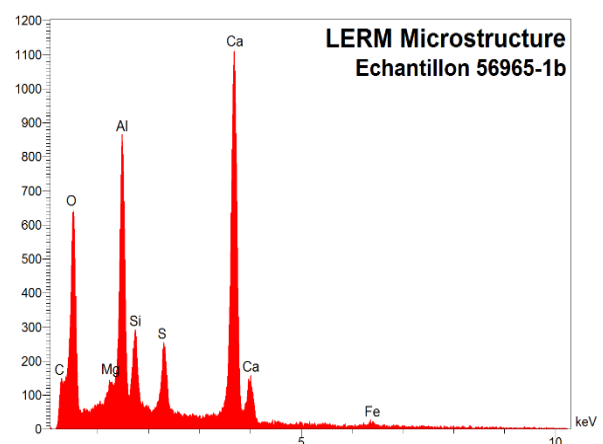


Fig. 36 : Analyse élémentaire par spectrométrie X à dispersion d'énergie au point 3 de la figure précédente



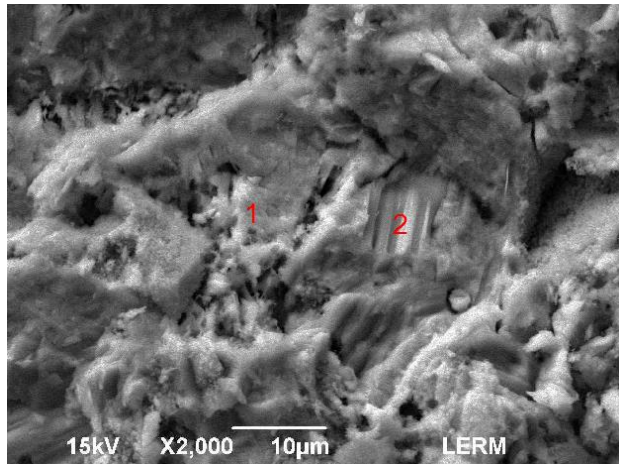


Fig. 37 : Microscopie électronique à balayage. Echantillon 56965-1b  
**Détail de la matrice cimentaire**  
 1 : C-S-H microporeux, 2 : portlandite massive

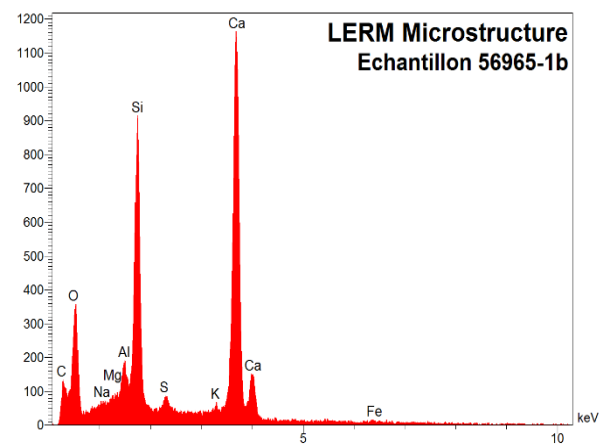


Fig. 38 : Analyse élémentaire par spectrométrie X à dispersion d'énergie au point 1 de la figure précédente

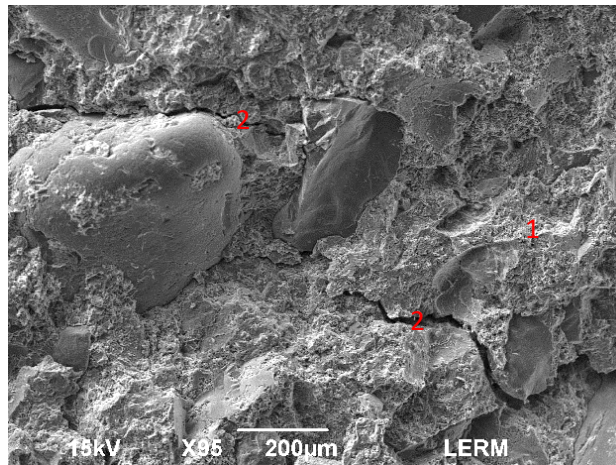


Fig. 39 : Microscopie électronique à balayage. Echantillon 56965-1c  
**Aspect de la microstructure microfissurée du béton**  
 1 : matrice cimentaire, 2 : microfissures intergranulaires

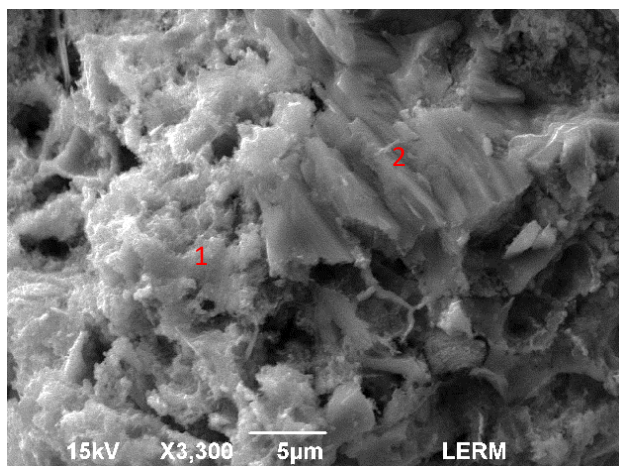


Fig. 40 : Microscopie électronique à balayage. Echantillon 56965-1c  
**Détail de la matrice cimentaire**  
 1 : C-S-H microporeux, 2 : portlandite massive

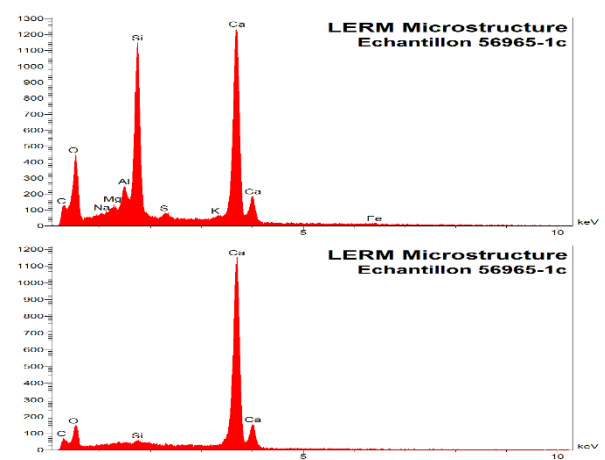


Fig. 41 : Analyse élémentaire par spectrométrie X à dispersion d'énergie aux points 1 et 2 de la figure précédente

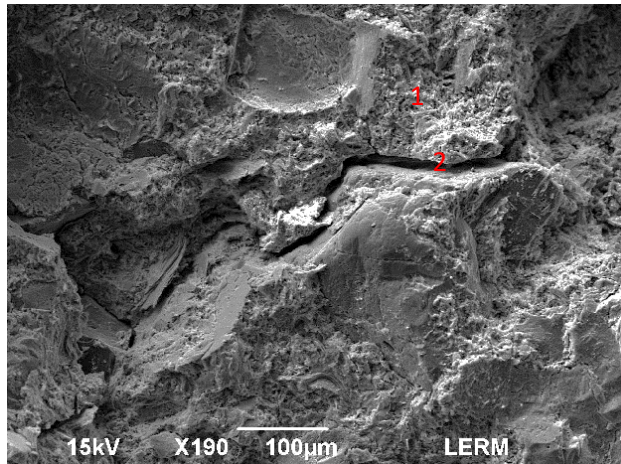


Fig. 42 : Microscopie électronique à balayage. Echantillon 56965-1d  
**Aspect de la microstructure microfissurée du béton**  
 1 : matrice cimentaire, 2 : microfissure intergranulaire

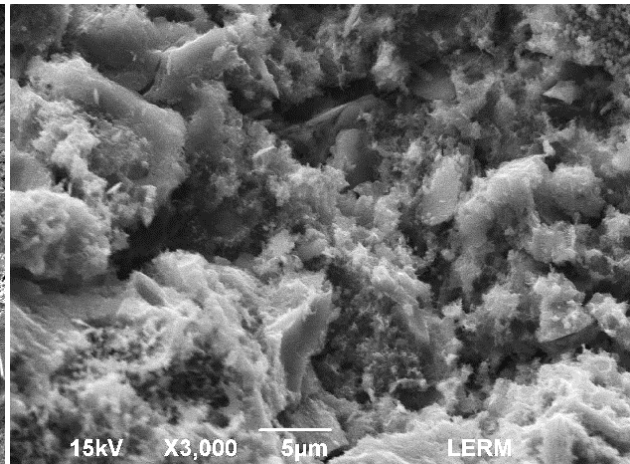


Fig. 43 : Microscopie électronique à balayage. Echantillon 56965-1d  
**Aspect amorphisé des hydrates de la matrice du béton**

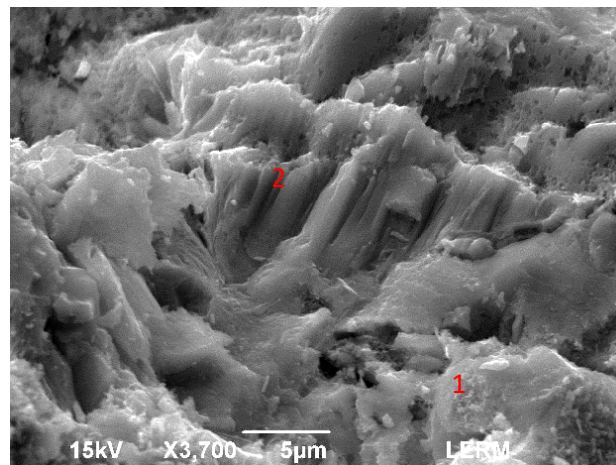


Fig. 44 : Microscopie électronique à balayage. Echantillon 56965-1d  
**Détail de la matrice cimentaire**  
 1 : C-S-H microporeux, 2 : portlandite partiellement dissoute

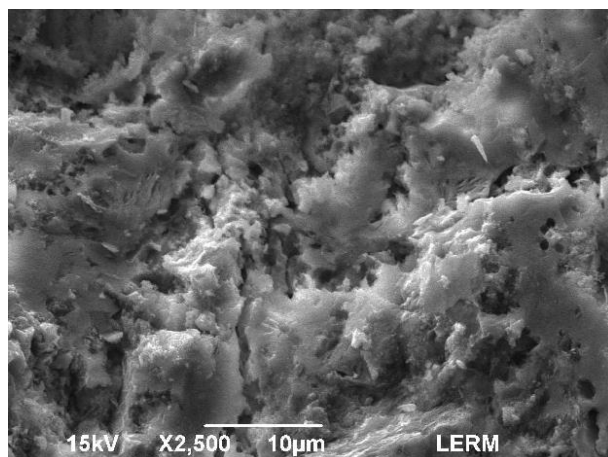


Fig. 45 : Microscopie électronique à balayage. Echantillon 56965-1e  
**Aspect amorphisé des hydrates de la matrice du béton**

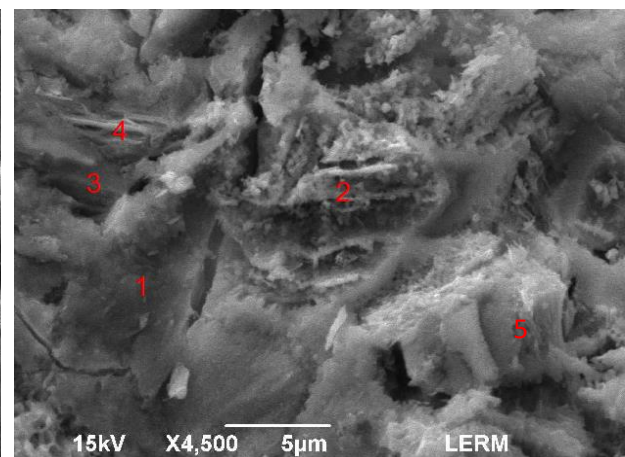


Fig. 46 : Microscopie électronique à balayage. Echantillon 56965-1e  
**Détail de la matrice cimentaire**  
 1 : C-S-H granuleux, 2 : chaux carbonatée, 3 : aluminates de calcium hydratés, 4 : AFm, 5 : portlandite transformée



### Echantillons 56965-3, 4 et 6 (Fig. 47 à Fig. 62) :

- à cœur ces bétons se caractérisent par une microstructure microporeuse et par une bonne cohésion générale entre les granulats siliceux et la pâte de ciment. Cette dernière se compose essentiellement de C-S-H granuleux associés à des amas de portlandite et à quelques cristaux de mono sulfo aluminates de calcium hydratés. Quelques cristaux d'ettringite aciculaire sont également détectés dans certains micropores de la matrice cimentaire,
- l'échantillon **56965-4** présente une frange superficielle, visuellement rosâtre, constituée de C-S-H granuleux, carbonatés et légèrement transformés sur une épaisseur de 10 à 15 mm depuis la surface. Dans cette zone, quelques cristaux de portlandite peu transformés sont observés dans la matrice cimentaire. Cet échantillon apparaît relativement similaire à l'échantillon confectionné en laboratoire **56965-1d** (traitement thermique d'environ 400°C). En frange superficielle du béton, sur une épaisseur de 200 µm environ, l'analyse élémentaire des C-S-H a permis de détecter l'élément chlore sous forme de traces diffuses. De plus, dans cet échantillon, il est aussi à noter la présence de nombreux granulats affleurant la surface du béton,
- l'échantillon **56965-6** se distingue par la présence d'une **frange de surface altérée**, marquée par la présence d'une matrice cimentaire peu cohésive, microfissurée, carbonatée et renfermant une faible proportion de chlore diffus sur une **épaisseur de 1 mm environ**. De nombreux granulats sont également observés en surface du béton, en proportion plus importante que dans l'échantillon **56965-4**. Dans cette frange altérée, les C-S-H présentent des signes d'une transformation avancée, d'aspect microporeux à amorphisé, et les autres hydrates ne sont plus observés ou de manière plus ou moins résiduelle, en particulier pour certains cristaux de portlandite. Cette frange apparaît relativement similaire aux échantillons confectionnés en laboratoire **56965-1d et 1e** (traitement thermique supérieure à 400°C).  
En dessous, une **frange intermédiaire** est identifiée jusqu'à une **profondeur de 10 mm environ** depuis la surface du béton. La portlandite y est souvent dégradée (cristaux amincis plus ou moins fibreux) mais elle coexiste, notamment en partie interne de cette zone, avec des faciès plus massifs, semblables aux cristaux rencontrés plus à cœur. Les C-S-H apparaissent également moins dégradés mais présentent toujours une microstructure assez différente de ceux rencontrés plus en profondeur. Au-delà de cette zone intermédiaire, la matrice reprend une microstructure semblable à celle décrite à cœur,
- l'échantillon **56965-3** contient une frange de surface microporeuse, carbonatée mais sans aucun signe significatif d'une transformation suite à un échauffement.

Le Tableau 12 synthétise les épaisseurs en millimètre (mm) des différentes franges observées en surface des échantillons de béton.

Réf. LERM	Zone	Frange altérée	Frange peu altérée ou frange intermédiaire	Début de zone saine	Frange carbonatée
56965-3	Saine	-	-	0	25
56965-4	Intermédiaire	-	0 – 10/15	15	10 – 15
56965-6	Altérée	0 – 1	1 – 10	10	1

Tableau 12 : Epaisseur en millimètre (mm) des franges altérées, intermédiaires et carbonatées mesurées depuis la surface des échantillons **56965-3, 4 et 6**

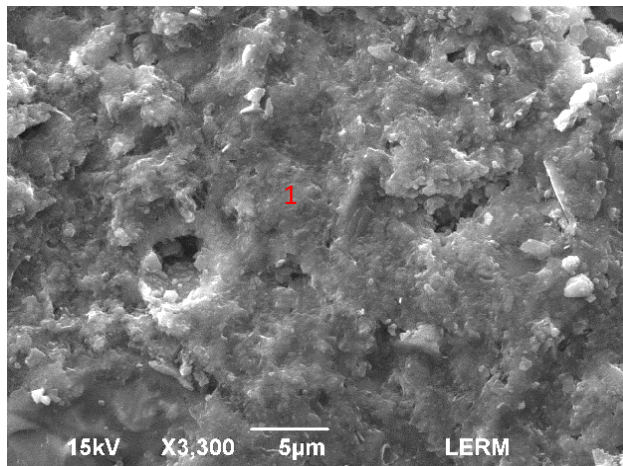


Fig. 47 : Microscopie électronique à balayage. Echantillon 56965-3  
**Détail des hydrates à environ 10 µm de la surface du béton**  
 1 : C-S-H granuleux

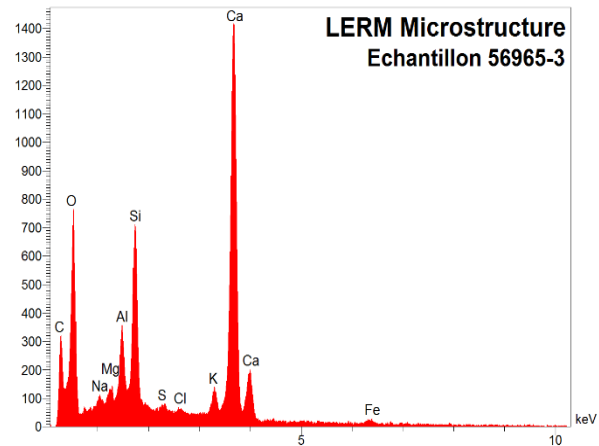


Fig. 48 : Analyse élémentaire par spectrométrie X à dispersion d'énergie au point 1 de la figure précédente

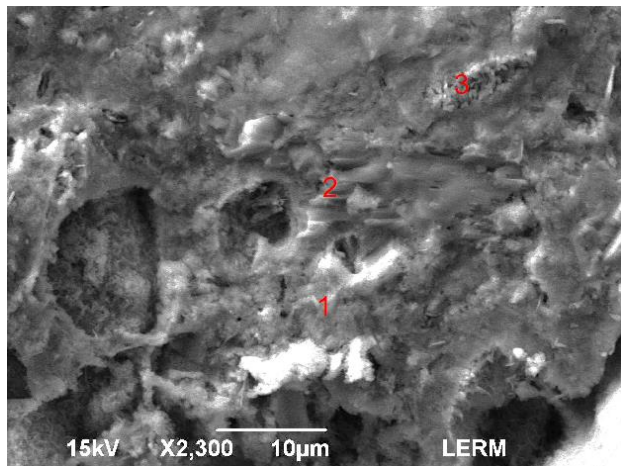


Fig. 49 : Microscopie électronique à balayage. Echantillon 56965-3  
**Détail des hydrates à environ 5 mm de la surface du béton**  
 1 : C-S-H granuleux, 2 : portlandite massive,  
 3 : ettringite aciculaire dans une microporosité

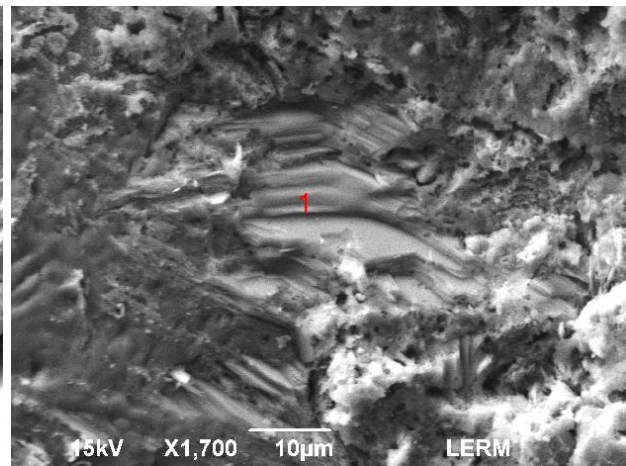


Fig. 50 : Microscopie électronique à balayage. Echantillon 56965-3  
**Détail des hydrates à environ 20 mm de la surface du béton**  
 1 : portlandite massive

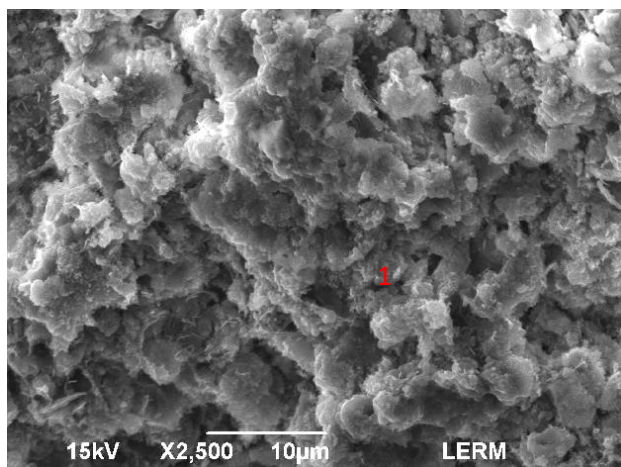


Fig. 51 : Microscopie électronique à balayage. Echantillon 56965-4  
**Détail des hydrates carbonatés, à environ 200 µm de la surface du béton**  
 1 : C-S-H micro-granuleux renfermant l'élément chlore en traces

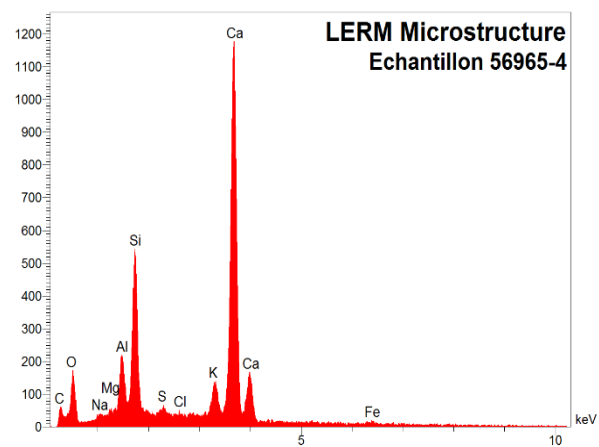
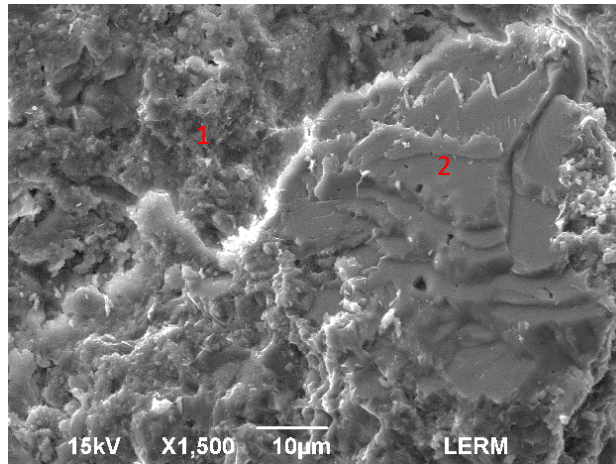
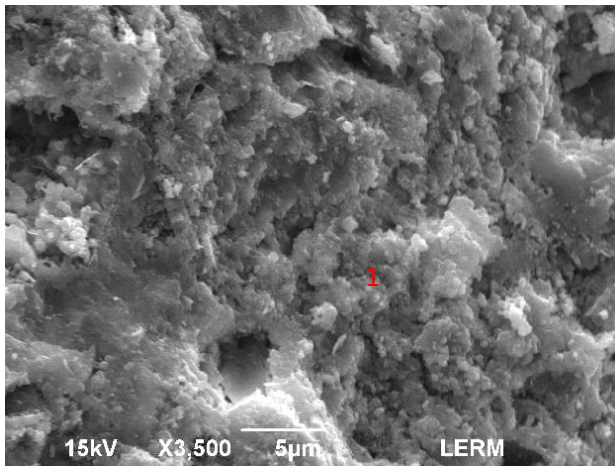


Fig. 52 : Analyse élémentaire par spectrométrie X à dispersion d'énergie au point 1 de la figure précédente

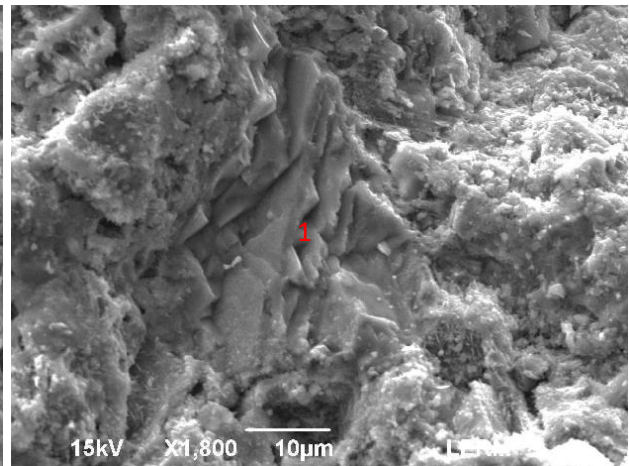




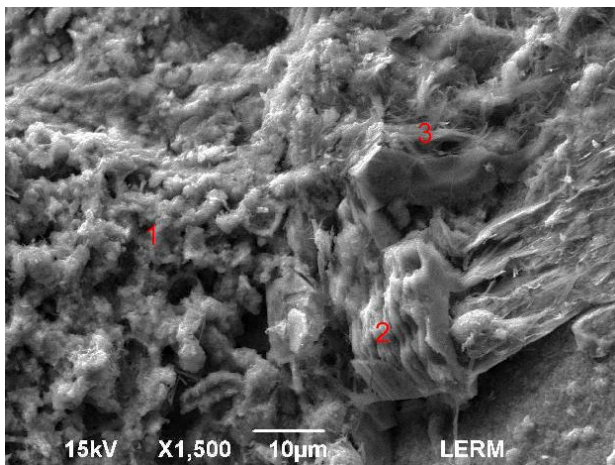
**Fig. 53 : Microscopie électronique à balayage. Echantillon 56965-4**  
**Détail des hydrates à environ 300 µm de la surface du béton**  
 1 : C-S-H granuleux, 2 : portlandite massive



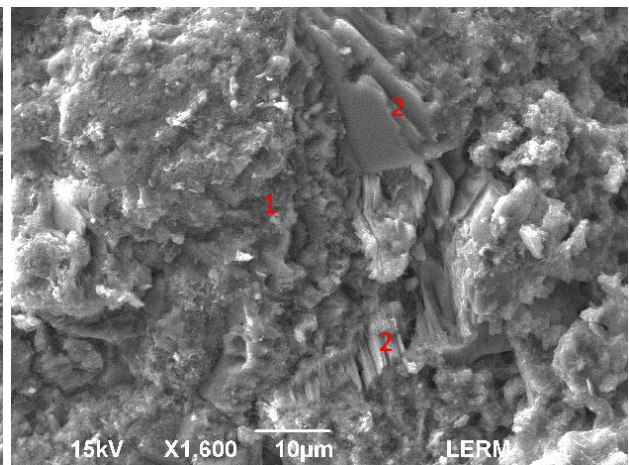
**Fig. 54 : Microscopie électronique à balayage. Echantillon 56965-4**  
**Détail des hydrates à environ 3 mm de la surface du béton**  
 1 : C-S-H carbonatés



**Fig. 55 : Microscopie électronique à balayage. Echantillon 56965-4**  
**Détail des hydrates à environ 4 mm de la surface du béton**  
 1 : portlandite massive



**Fig. 56 : Microscopie électronique à balayage. Echantillon 56965-4**  
**Détail des hydrates à environ 15 mm de la surface du béton**  
 1 : C-S-H microporeux, 2 : portlandite partiellement dissoute,  
 3 : ettringite aciculaire



**Fig. 57 : Microscopie électronique à balayage. Echantillon 56965-4**  
**Détail des hydrates à environ 30 mm de la surface du béton**  
 1 : C-S-H granuleux, 2 : portlandite massive

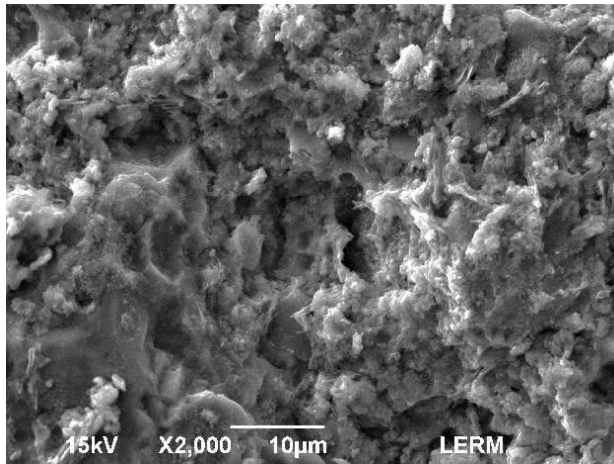


Fig. 58 : Microscopie électronique à balayage. Echantillon 56965-6  
**Détail des hydrates amorphisés,**  
**à environ 100 µm de la surface du béton**

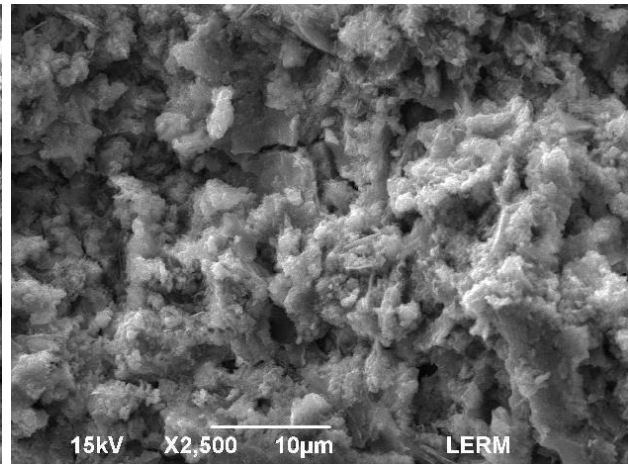


Fig. 59 : Microscopie électronique à balayage. Echantillon 56965-6  
**Détail des hydrates amorphisés,**  
**à environ 1 mm de la surface du béton**

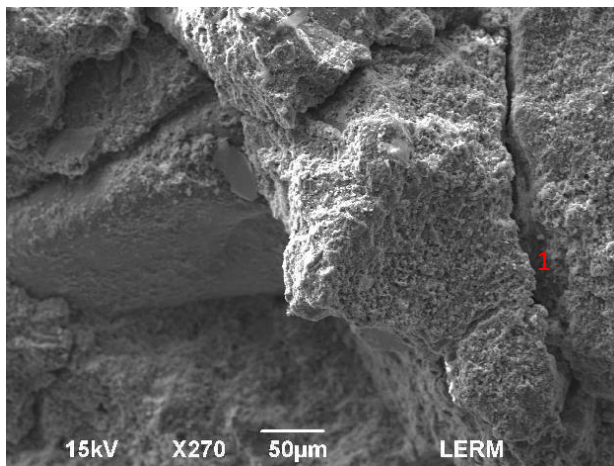


Fig. 60 : Microscopie électronique à balayage. Echantillon 56965-6  
**Aspect de microfissures à environ 1 mm de la surface du béton**  
 1 : microfissure intergranulaire

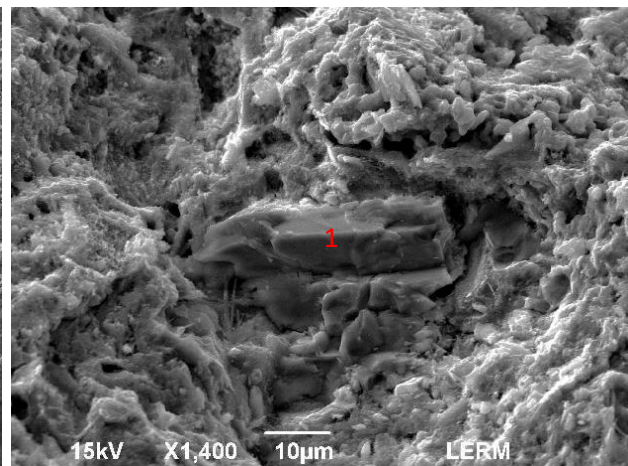


Fig. 61 : Microscopie électronique à balayage. Echantillon 56965-6  
**Détail des hydrates à environ 8 mm de la surface du béton**  
 1 : portlandite massive

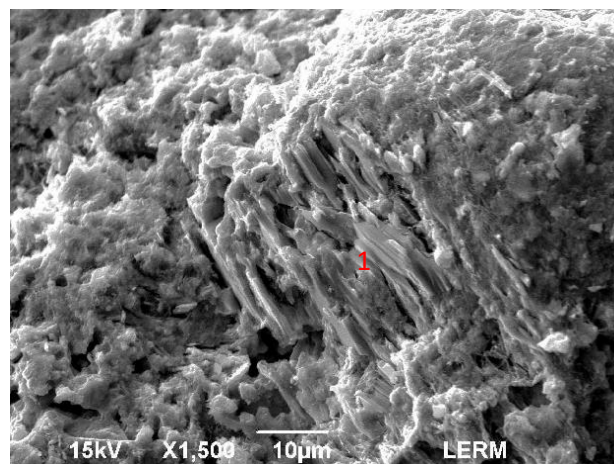


Fig. 62 : Microscopie électronique à balayage. Echantillon 56965-6  
**Détail des hydrates à environ 45 mm de la surface du béton**  
 1 : portlandite massive



## 7 - SYNTHESE

L'étude réalisée au LERM entre avril et mai 2024, dans le but d'effectuer le diagnostic incendie de certaines des poutres du BSI des Douanes localisé à Nîmes (30), a permis de dégager les points essentiels suivants :

### En ce qui concerne les investigations sur site :

- les zones d'études ont été sélectionnées de la façon suivante :
  - zone de référence : Poutre P4 ne présentant pas de désordre visuel,
  - zone intermédiaire : Poutre P3, écaillage du béton de peau et quelques fissures observées sur les 2 faces de la poutre,
  - zone dégradée : Poutre P2, écaillage du béton de peau et faïençage sur les 2 faces, épaufrures au niveau du bloc d'ancrage Est avec aciers apparents.
- les résultats de mesure d'enrobage réalisés sur les 3 poutres indiquent un enrobage moyen compris entre 25 et 35 mm et un enrobage minimum mesuré de 18 mm des aciers passifs,
- les enrobages des torons mesurés sur les 2 fenêtres sont compris entre 35 et 45 mm et les tensions résiduelles mesurées sur les câbles des 2 poutres (saine et dégradée) sont proches, de l'ordre de 140 kN/toron et sont conformes à celles attendues pour ce type de précontrainte. On note toutefois des valeurs légèrement inférieures pour les tensions mesurées en zone dégradée comparativement à celles mesurées en zone visuellement saine,
- les résultats des mesures de vitesse du son mettent en évidence un béton correct (vitesses moyennes du son comprises entre environ 2800 et 3600 m/s) pour la poutre de référence (P4) et des caractéristiques moindres pour les poutres intermédiaires et dégradées, avec des bétons correct à médiocre (vitesses du son comprises entre 2220 et 3350 m/s),
- les mesures réalisées au scléromètre ont permis d'obtenir des indices de rebondissement moyens supérieur à 50 pour la poutre saine et des indices légèrement inférieurs pour les poutres intermédiaire (44) et dégradée (45). Les résistances équivalentes obtenues sont toutefois correctes et comprises entre  $42 \pm 7,0$  Mpa (P3) et  $56 \pm 7,5$  Mpa (P4). Les résultats obtenus pour la zone dégradée et la zone intermédiaire sont toutefois à interpréter avec prudence, les parements des poutres ayant fait l'objet d'un hydrosablage.

### En ce qui concerne les essais en laboratoire :

- la résistance mécanique à la compression de l'échantillon sain (**56965-2**) apparaît relativement élevée, de l'ordre de 66 MPa. Les résistances des échantillons de la zone intermédiaire (**56965-5** et **56965-8**) et de la zone incendiée (**56965-7**) apparaissent plus faibles, de l'ordre de 40 MPa,
- le profil de vitesse du son de l'échantillon sain (**56965-2**) apparaît homogène et supérieur à 4000 m/s. Les profils des échantillons de la zone intermédiaire (**56965-5**) et de la zone incendiée (**56965-7**) présentent un amoindrissement des valeurs en surface, la variation étant plus prononcée pour l'échantillon incendié. Les vitesses mesurées sont de l'ordre de 2000 m/s sur environ 10 mm à 20 mm depuis la surface,
- les observations au microscope électronique à balayage ont été réalisées sur des échantillons issus de trois zones (saine, intermédiaire et incendiée) :
  - l'échantillon de la zone incendiée (**56965-6**) présente une frange superficielle altérée d'un millimètre, dans laquelle la température atteinte dans cette frange superficielle semble avoir été d'environ 500°C.

- l'échantillon de la zone intermédiaire (**56965-4**) présentent une frange intermédiaire allant de la surface jusqu'à une profondeur de 10 et 15 mm. Par comparaison aux échantillons traités thermiquement, la température atteinte dans ces zones pourrait être autour de 400°C.  
Des caractéristiques similaires ont été observés dans l'échantillon de la zone incendiée (**56965-6**) entre la frange superficielle et environ 10 mm de profondeur.
- l'échantillon sain (**56965-3**) ne semble pas avoir subi de dégradation thermique. Le béton présente les mêmes caractéristiques qu'à cœur des échantillons de la zone intermédiaire (**56965-4**) et de la zone incendiée (**56965-6**).
- la surface des trois échantillons apparaît carbonatée sur une épaisseur variable de 25 mm pour l'échantillon sain (**56965-3**), de 10 à 15 mm pour l'échantillon de la zone intermédiaire (**56965-4**) et de 1 mm pour l'échantillon de la zone incendiée (**56965-6**).

## 8 - CONCLUSION

Au final, il apparaît que :

### Pour P4, la poutre saine :

- La poutre de référence P4 possède de bonnes caractéristiques mécaniques, avec une résistance en compression équivalente obtenue à partir des indices sclérométrique de  $56 \pm 7,5$  Mpa, une résistance en compression mesurée en laboratoire de 66 MPa et une tension résiduelle moyenne des câbles de précontrainte de 148 kN/toron (incertitude sur la moyenne des tensions mesurées de [0 à 5,1] kN).
- Sur cette poutre, les mesures de vitesse du son mesurées in situ et en laboratoire indiquent également la présence d'un béton homogène et de bonne qualité sur la longueur étudiée.
- Enfin, l'analyse au microscope électronique a permis de mettre en évidence une carbonatation du béton jusqu'à 25 mm.

### Pour P2 et P3, les poutres dégradées et intermédiaires :

- Les caractéristiques mécaniques des bétons sont plus faibles qu'en zone saine avec des résistances en compression équivalente obtenues à partir des indices sclérométrique et des résistances en compression mesurées en laboratoire de l'ordre de 40 MPa,
- Concernant la poutre altérée P2, la tension résiduelle moyenne des câbles de précontrainte obtenue est de 136 kN/toron (incertitude sur la moyenne des tensions mesurées de [0 à 5,1] kN).
- Les faibles valeurs de vitesse du son mesurées en laboratoire en surfaces (de 0 à 10/15 mm de profondeur), viennent confirmer les vitesses du son mesurées in situ et révèlent un état de béton de moins bonne qualité qu'en zone saine,
- Les analyses microscopiques font elles aussi apparaître que ces poutres sont altérées jusqu'à 10 à 15 mm et ont subis un échauffement allant jusqu'à 400 à 500 °C sur 10 à 15 mm depuis la surface,



Au regard de l'ensemble de ces résultats, il semblerait que les poutre P2 et P3 aient été impactées de façon quasi similaire par l'incendie (profondeur d'altération et température d'échauffement).

Toutefois, cet incendie ne semble pas avoir :

- atteint les armatures les moins enrobées (enrobage de 18 mm mesuré en âme de poutre dégradée),
- atteint de manière significative la précontrainte, avec un écart des valeurs moyennes de l'ordre de 12KN/toron entre la zone dégradée et la zone saine, pour une incertitude sur la moyenne des tensions mesurées de [0 à 5,1] kN.

Même si les caractéristiques mécaniques et l'état de la précontrainte restent corrects après l'incendie, il conviendra toutefois de rester vigilant vis-à-vis de l'aspect structurel global de ces poutres, compte tenue de l'épaisseur résiduelle de béton intègre notamment en âme (section initiale de 9 cm d'épaisseur). Dans le cas présent, il pourrait être envisagé un recalcul structure des 2 poutres impactées (P2 et P3) ainsi que la purge et la reconstitution sur 15 à 20 mm du béton d'enrobage.

**Sophie DECOSTER et Béatrice MASSON**  
*Ingénieures attachées d'études - Agence d'Arles*

**Michael GOUZEL**  
*Responsable de l'agence de Lyon*

SOPHIE DECOSTER B. MASSON

MICHAËL GOUZEL

Essais physiques réalisés par S. GUILLOT  
Analyses chimiques réalisés par L. FAURE  
Examens minéralogiques réalisés par P. AMIEUX

*La reproduction intégrale de ce rapport sans modification d'aucune sorte est seule autorisée.*

*Les essais faisant l'objet du présent rapport portent sur des échantillons prélevés dans certaines conditions. Leur représentativité est liée à celle des échantillons et ne peut être étendue à une population dont ils sont issus que si l'homogénéité de cette population peut être vérifiée.*

**Siège Social et laboratoires**

23 rue de la Madeleine  
CS 60136  
13631 ARLES CEDEX  
FRANCE

Tél +33 4 86 52 65 00  
Fax +33 4 90 96 25 27  
[lerm.contact@setec.com](mailto:lerm.contact@setec.com)

**Agence de Paris**

Immeuble Central Seine  
42 - 52 quai de la Rapée  
CS 71230  
75583 PARIS CEDEX 12  
FRANCE

Tél +33 1 82 51 41 00  
Fax +33 4 90 96 25 27

**Agence de Lyon**

679, rue Le Chatelier  
Lot N° 66  
38090 VAULX-MILIEU  
FRANCE

Tél +33 4 86 52 65 00  
Fax +33 4 90 96 25 27

**Agence de Rennes**

4 avenue Charles Tillon  
35000 RENNES  
FRANCE

Tél +33 2 99 45 46 05  
Fax +33 4 90 96 25 27

**Agence de Toulouse**

Bâtiment Les Oliviers  
445, L'Occitane  
31670 LABEGE  
FRANCE

Tél +33 5 61 72 28 09  
Fax +33 4 90 96 25 27

