



Figure 1 : Vue d'ensemble du Palais Lumière (photographie extraite du document « *Le Palais Lumière à La Ciotat expliqué à ses résidents pour leur donner la fierté d'habiter une résidence historique et le goût pour la conserver et l'embellir...* » par Franceline Dreyer-Ledoux).

– PALAIS LUMIERE, LA CIOTAT (13) –

Bilan sanitaire et caractérisation des ossatures métalliques des plafonds du grand salon et de l'entrée du chai.

RAPPORT

Destinataire : M. Guy REY - Président	Téléphone: -
ASSOCIATION POUR LA RESTAURATION DU GRAND SALON DU PALAIS LUMIERE (ARGSL)	Fax : -
Adresse : 662, avenue Emile Ripert 13600 LA CIOTAT	Mobile : 06.67.59.83.72
Copie(s) à : -	Courriel : guy-rey@wanadoo.fr

Réf. du rapport : R318	Nombre de pages hors annexe(s) : 21	Nombre d'annexe(s) : 4
Réf. du devis : D-010/13 Rev. 2	Réf. de la commande : Bon pour accord sur devis.	
Date du devis : 27/06/2013	Date de la commande : 08/07/2013	
0	28/08/2013	Première édition.
REV.	DATE	DESCRIPTION
		S. BERGEROT
		J-B. MEMET
		REDACTEUR
		RELECTEUR

A-CORROS Expertise

Adresse : 23, chemin des Moines – 13200 ARLES / Tél. : 04.90.99.47.49
SARL immatriculée au R.C.S de Tarascon - **Code APE :** 7112B
SIRET : 494 736 226 000 23 - **TVA Intracommunautaire :** FR 50494736226



SOMMAIRE

1. INTRODUCTION	1
2. PRESENTATION DE L'OUVRAGE	1
3. LA PROBLEMATIQUE DU FER PUDDLE	1
4. METHODOLOGIE.....	2
4.1. BILAN SANITAIRE ET PRELEVEMENT	2
4.1.1. DIAGNOSTIC VISUEL ET MESURE DES EPAISSEURS RESIDUELLES	2
4.1.2. PRELEVEMENT	2
4.1.3. ETUDE EN LABORATOIRE DU METAL ET DE SA SOUDABILITE	2
a. Désignation des échantillons et répartition des essais et analyses	2
b. Analyse chimique élémentaire	3
c. Essai de traction	3
d. Etude métallographique	3
5. RESULTATS	4
5.1. BILAN SANITAIRE	4
5.1.1. PLAFOND DU GRAND SALON	4
a. Description	4
b. Etat de l'ossature	4
c. Synthèse	8
5.1.2. PLAFOND DE L'ENTREE DU CHAI	8
a. Description	8
b. Etat général des éléments	9
c. Etude détaillée	9
d. Synthèse.....	13
5.2. ETUDE DU METAL ET DE SA SOUDABILITE	14
5.2.1. ANALYSES CHIMIQUES ELEMENTAIRES.....	14
5.2.2. ESSAI DE TRACTION	14
5.2.3. ETUDE METALLOGRAPHIQUE.....	15
a. Echantillon R318-1.3	15
b. Echantillon R318-1.4	17
5.2.4. SYNTHESE	18
6. CONCLUSIONS	18
6.1. ETAT DES ELEMENTS DES OSSATURES METALLIQUES.....	18
6.1.1. PLAFOND DU GRAND SALON	18
6.1.2. PLAFOND DE L'ENTREE DU CHAI	18
6.2. MATERIAU	19
6.2.1. NATURE DU MATERIAU	19
6.2.2. CARACTERISTIQUES MECANIQUES.....	19
6.2.3. SOUDABILITE	19
ANNEXES.....	21

1. INTRODUCTION

Le présent rapport concerne le bilan sanitaire et la caractérisation des ossatures métalliques des plafonds du grand salon et de l'entrée du chai (Cf. Annexe 1) du Palais Lumière à La Ciotat (13).

Cette mission s'est déroulée en trois phases :

- Une intervention sur site effectuée le 16 juillet 2013. Au cours de cette intervention, A-CORROS a réalisé un bilan sanitaire des éléments métalliques accessibles des ossatures. Ce bilan sanitaire s'est accompagné d'un reportage photographique et de mesures d'épaisseur résiduelle de métal. Un échantillon de métal nécessaire à l'étude en laboratoire a également été prélevé.
- Une étude en laboratoire destinée à caractériser le matériau constituant les éléments métalliques des ossatures (composition, caractéristiques mécaniques, soudabilité).
- L'analyse et la synthèse des résultats du bilan sanitaire et des essais et analyses réalisés en laboratoire avec rédaction du présent rapport.

2. PRESENTATION DE L'OUVRAGE

La construction de la «Villa Lumière» s'étale de 1885 à 1893 environ (certaines sources mentionnent que la villa fut construite en deux ans: 1892-1893) et coïncide avec la fortune très rapide des LUMIERE au moment où, à LYON, les plaques photographiques «Etiquette Bleue» apportent des bénéfices spectaculaires: Antoine LUMIERE s'emploie à les dépenser, car dit son fils: «il avait la maladie de la pierre». C'est dans les mémoires d'Auguste LUMIERE que l'on trouve les détails les plus précis sur la «Villa Lumière».[...]*

Le style du bâtiment est de type méditerranéen. Le bâtiment de trois étages sur un rez-de-chaussée se compose d'un corps central volumétrique et de deux corps de bâtiments symétriques. Les deux colonnes du péristyle supportent la terrasse du premier étage, les terrasses se superposent sur trois étages et le belvédère couronne le tout.

Texte extrait du document « *Le Palais Lumière à La Ciotat expliqué à ses résidents pour leur donner la fierté d'habiter une résidence historique et le goût pour la conserver et l'embellir...* » par Franceline Dreyer-Ledoux.

**«Villa Lumière», telle est l'appellation qu'Antoine a lui-même donnée à sa demeure de LA CIOTAT. Aujourd'hui, elle est baptisée et connue sous le nom de «Palais Lumière», en réalité, dans le respect du vocabulaire de l'architecture, n'étant pas une maison de ville, mais réellement situé dans une campagne, le terme «Château Lumière» aurait été plus approprié. (Note de l'auteur)*

3. LA PROBLEMATIQUE DU FER PUDDLE

Le Palais Lumière a originellement été construit autour de 1891. Il est donc fort prévisible que les éléments constituant les ossatures métalliques aient été fabriqués **en fer puddlé**.

Le fer puddlé est le matériau qui a cours dans la construction métallique monumentale au XIX^{ème}, période de transition entre la fonte et les premiers aciers. Le fer puddlé doit son nom au puddlage, procédé de fabrication qui consistait en une agitation continue du fer en fusion afin de l'affiner et d'augmenter ses caractéristiques mécaniques.

Ce processus d'affinage avait pour conséquence de faire remonter les scories chargées d'impuretés à la surface du fer fondu. Une fois en surface, les impuretés étaient en quelque sorte «écraimées» par différentes techniques pour affiner le fer et lui conférer ses bonnes caractéristiques mécaniques.

Cependant, lors de ce processus, quelques éléments restaient piégés à l'état d'inclusions, notamment le phosphore, le silicium et le soufre. Ces inclusions - dont la teneur est élevée en phosphore - ont l'avantage majeur d'être un frein à la corrosion du fer puddlé (ce qui explique que nombre des ouvrages métalliques de cette époque sont en très bon état de conservation) mais elles ont également l'inconvénient majeur d'être un frein à sa soudabilité, ce qui constitue la première des interrogations dans un projet de réhabilitation de structure.

Le fait de pouvoir souder ou non ce métal peut changer complètement le projet architectural de réhabilitation. Aussi, diagnostiquer la soudabilité d'un fer puddlé lors d'une étude préalable revient non seulement à déterminer par la chimie sa composition en carbone, manganèse, phosphore, soufre et silicium, mais également à réaliser un examen métallographique précis du métal afin d'évaluer son degré d'impuretés.

4. METHODOLOGIE

4.1. BILAN SANITAIRE ET PRELEVEMENT

4.1.1. DIAGNOSTIC VISUEL ET MESURE DES EPAISSEURS RESIDUELLES

Un diagnostic visuel général des parties visibles et accessibles des ossatures des plafonds a été réalisé afin de repérer, identifier et décrire les pathologies de corrosion.

Ce diagnostic est accompagné d'un reportage photographique et de mesures d'épaisseur résiduelle de métal. Le but de ces mesures est d'évaluer le niveau de dégradation des éléments et de déterminer si leur résistance mécanique peut-être potentiellement affectées par la corrosion.

4.1.2. PRELEVEMENT

Un échantillon de métal a été prélevé au niveau de l'entrée du chai afin de subir, en laboratoire, des essais et analyses visant à :

- confirmer que le matériau constituant les éléments des ossatures est bien du fer puddlé,
- déterminer ses caractéristiques mécaniques,
- étudier sa soudabilité.

Le prélèvement a été réalisé non pas directement sur un élément de l'ossature du plafond afin de ne pas porter atteinte à la tenue mécanique et à l'esthétique de l'ossature mais sur un élément identique encastré dans le mur Nord.

Le prélèvement a été réalisé à l'aide d'une meuleuse électrique.

L'annexe 2 présente des photographies de la zone de prélèvement de l'échantillon de métal avant et après découpe.

Un échantillon de métal devait également être prélevé sur l'ossature du plafond du grand salon au niveau de la zone détériorée. Mais, compte-tenu de la fragilité de la zone, il a été décidé de ne pas réaliser de prélèvement afin d'éviter tout risque de détérioration plus importante des décors en staff qui aurait pu être provoquée par les vibrations.

4.1.3. ETUDE EN LABORATOIRE DU METAL ET DE SA SOUDABILITE

a. Désignation des échantillons et répartition des essais et analyses

Les essais et analyses ont été réalisés sur des sous-échantillons obtenus après découpe et/ou préparation de l'échantillon source prélevé sur site (échantillon **R318-1** correspondant à l'aile d'une cornière murale).

Le tableau 1 ci-après précise l'affectation des sous-échantillons aux essais et analyses réalisés.

Tableau 1 : Affectation des échantillons aux essais et analyses réalisés.

DESIGNATION DES ECHANTILLONS		ESSAIS REALISES (INSTITUT DE SOUDURE INDUSTRIE - A-CORROS)		
ECHANTILLONS SOURCES	Sous-échantillons	ANALYSE CHIMIQUE	ESSAI DE TRACTION	METALLOGRAPHIE
R318-1 (Aile de cornière)	R318-1.1	X	-	-
	R318-1.2	-	X	-
	R318-1.3	-	-	X
	R318-1.4	-	-	X

b. Analyse chimique élémentaire

L'analyse chimique élémentaire a été réalisée par spectrométrie d'émission optique à source étincelle. Cette technique permet de mesurer avec précision les teneurs en éléments chimiques des échantillons métalliques solides.

Pour la présente étude, les éléments dosés sont le fer, le phosphore, le silicium, le soufre et le manganèse. L'analyse a été réalisée par l'Institut de Soudure.

c. Essai de traction

L'essai de traction consiste à soumettre l'échantillon testé à un effort de traction jusqu'à sa rupture en vue de déterminer ses caractéristiques mécaniques : limite élastique, résistance à la traction, allongement à la rupture et module d'Young.

La réalisation de l'essai a été confiée à l'Institut de Soudure.

d. Etude métallographique

La microstructure et le taux d'impuretés du matériau, c'est-à-dire le taux d'inclusions, sont étudiés par micrographie de manière à apprécier la soudabilité. En effet, la détermination du taux d'inclusions permet d'affiner les conclusions sur la soudabilité qui ne reposent pas uniquement sur la teneur en carbone, phosphore, silicium et soufre mais également sur la taille et le nombre des inclusions.

Pour les examens métallographiques, les échantillons sont découpés, enrobés dans une résine, polis, attaqués chimiquement puis observés au microscope électronique à balayage couplé à l'analyse élémentaire par spectrométrie X à dispersion d'énergie.

5. RESULTATS

5.1. BILAN SANITAIRE

Les photographies prises lors de l'intervention figurent sur le CD joint au présent rapport.

5.1.1. PLAFOND DU GRAND SALON

a. Description

Photos	Description
9786 à 919796 9799 à 9807	Photo en contre-plongée de la zone détériorée du plafond (vues générales et de détail)

Le décor en plâtre (staff) est monté sur un châssis en bois maintenu sur les ailes des profilés de l'ossature via des éléments de jonction en bois.

Dans la zone où le plâtre est tombé, deux poutres métalliques sont observables (Fig. 2).

Pour les besoins de l'étude, elles sont numérotées poutre 1 (à gauche en faisant face à l'entrée du salon), et poutre 2 (à droite).

Ces poutres servent d'appuis à des voutains en briques.

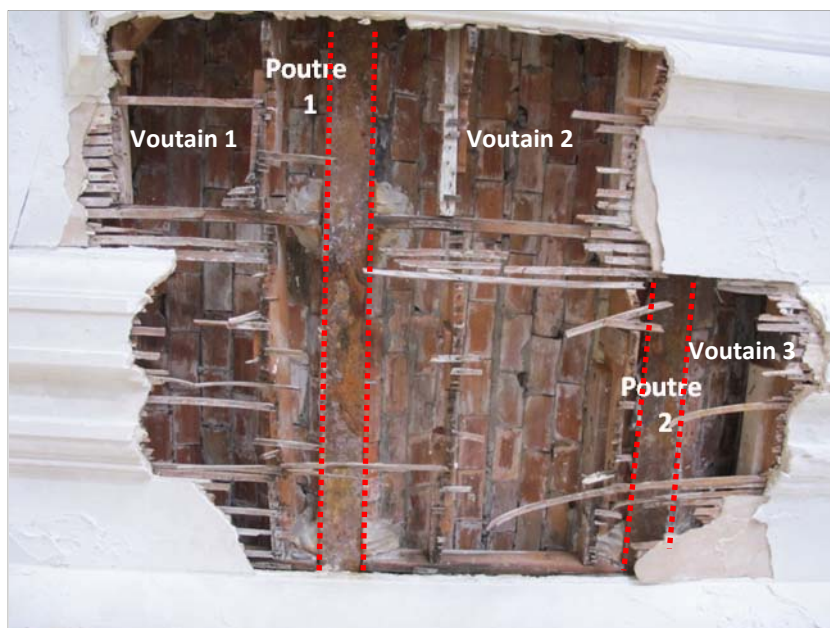


Figure 2 : Zone détériorée du plafond du grand salon.

b. Etat de l'ossature

Photos	Description
9708	Echafaudage en montage dans le grand salon
9799-9807	Vues générales du grand plafond
9725-9734	Voutains au dessus de la zone « saine » proche zone effondrée

Les deux seules poutres visibles de l'ossature présentent une corrosion feuilletante peu prononcée (Fig. 3 à 6).

Poutre 1

Photos	Description
9735 à 9739	Poutre 1
9741 à 43	Détail des produits de corrosion sur poutre 1
9744-45	Détail mesures d'épaisseurs résiduelles
9746 à 49	Profilé après élimination des produits de corrosion
9750 à 51	Photos dans l'espace entre moulure et profilé en regardant vers la fenêtre (Ouest)
9752	Voutain 1
9753	Voutain 2

Epaisseur de la semelle inférieure de la poutre 1 : 15 mm.

Largeur de la semelle inférieure : 140 mm.

Epaisseur des produits de corrosion sur semelle : environ 4 mm.

Epaisseur des produits de corrosion sur la tranche de la semelle : 7 mm.

La perte d'épaisseur est donc estimée à 1 mm en considérant que le volume des produits de corrosion est 7 fois supérieur à celui du métal sain.



Figure 3 : Vue de la semelle inférieure de la poutre 1.



Figure 4 : Etat de corrosion de la semelle inférieure de la poutre 1 après élimination partielle des produits de corrosion.

Poutre 2

Photos	Description
9756 à 60	Relevé photo de la poutre 2 en regardant vers le mur (Est)
9765 à 70	Nettoyage des produits de corrosion
9778 à 81	Détail zone nettoyée, stries du fer forgé apparentes (faciès identique à celui observée sur les cornière de la cave)
9782-83	Dégradation du plâtre
9784 - 85	A l'aplomb côté mur, sur plâtre, présence de très petites tâches de rouille

La poutre 2 a globalement une apparence moins corrodée que la poutre n°1.

Epaisseur de la semelle : 17,6 mm à gauche de l'âme / 16,1 mm à droite de l'âme.



Figure 5 : Vue de la semelle inférieure de la poutre 2.



Figure 6 : Etat de corrosion de la semelle inférieure de la poutre 1 après élimination partielle des produits de corrosion.

Décor en staff

9754-55	Pièces de bois rompue sur poutre 1, ayant causé l'effondrement du plafond
9761 à 64	Détails sur plâtre
9771 à 75	Fissure du plâtre
9776	Lion

Le décor en staff est maintenu par un châssis en bois prenant appui sur l'ossature métallique et dans les voutains.

Dans la zone effondrée, de nombreux éléments du châssis sont rompus ou arraché (Fig. 7 et 8).



Figure 7 : Vue d'ensemble de la zone effondrée mettant en évidence les dégâts présents au niveau de l'ossature du staff.



Figure 8 : Vue de détail d'un élément du châssis rompu au niveau d'une jonction avec une poutre métallique.

A chaque intersection de la structure porteuse du staff et des profilés métalliques, il existe un plâtre de scellement (Fig. 9) qui de par son caractère hygroscopique peut avoir joué un rôle dans la dégradation du bois environnant et, par conséquent, dans la chute du plafond du fait des infiltrations d'eau.



Figure 9 : Scellement en plâtre à la jonction châssis en bois et poutre métallique.

Le staff présentent de nombreuses fissures que ce soit à proximité de la zone effondrée ou plus loin (Fig. 10 à 12).



Figure 10 : Fissure dans le staff parcourant toute la longueur du plafond.



Figure 11 : Autre fissure dans le staff parcourant toute la longueur du plafond.



Figure 12 : Fissure périphérique à la jonction entre le plafond et la crinière du lion.

A proximité de la zone affectée par le dégât des eaux, le plâtre est également dégradé en de nombreux endroits du plafond et de la corniche périphérique (pulvérisation, effritement) (Fig. 13 et 14).



Figure 13 : Pulvérisation du plâtre du plafond.



Figure 14 : Effritement du plâtre au niveau de la corniche.

c. Synthèse

Le bilan sanitaire réalisé sur les deux poutres de l'ossature métallique du plafond du grand salon visibles depuis la zone détériorée a permis de mettre en évidence les points suivants :

- La semelle des poutres, seule partie qui en est observable, présente une corrosion feuilletante qui, malgré les apparences, se révèle peu prononcée. La perte d'épaisseur de métal estimée est en effet de l'ordre du millimètre avec une épaisseur résiduelle de l'ordre de 15 mm.
- La structure porteuse du staff est fortement dégradée au niveau de la zone effondrée. Des fissures longues dans le staff et des effritements sont également observables qui laissent peser un doute sur la tenue à long terme du plafond.

5.1.2. PLAFOND DE L'ENTREE DU CHAI

a. Description

Le plafond de l'entrée du chai est constitué d'un assemblage de profilés en I, de cornières et de tés (Fig. 15).

L'entrée est située côté Ouest de la villa (porte blanche, Fig. 15).

Le plafond, en haut de l'escalier, est constitué de 9 voutains en briques. Ces voutains sont soutenus aux deux extrémités de la largeur du plafond par deux poutres IPN (poutres Nord et Sud, Fig. 15), dont la largeur de la semelle inférieure a été mesurée à 300 mm pour une largeur de l'aile de 60 mm.

La semelle inférieure de ces 2 poutres est dans un très bon état de conservation.

A l'entrée de la cave, à l'ouest, une poutre de même dimension est située en avant de la porte, à environ 1 mètre (poutre Ouest, Fig. 15).

La semelle présente un état de corrosion avancé, notamment au niveau des appuis entre voutains. Les appuis entre voutains sont constitués de 6 cornières inversées (numérotées C1 à C6, Fig. 15), dont l'aile mesure 70 mm de large et 12 mm d'épaisseur nominale (mesurée en partie saine sur une cornière similaire plantée dans le mur Nord).

Ces cornières sont perforées (\varnothing 22 mm). L'espacement moyen entre cornières est de 85 mm.

Entre les cornières C3 et C4, les 3 voutains sont espacés par des tés de petite dimension (largeur semelle : 40 mm, épaisseur d'origine : 4 mm).

La distance entre poutres Ouest et Est est de 3,07 m.

La distance entre poutre Nord et Sud est de 5,57 m (mesures au pointeur laser).

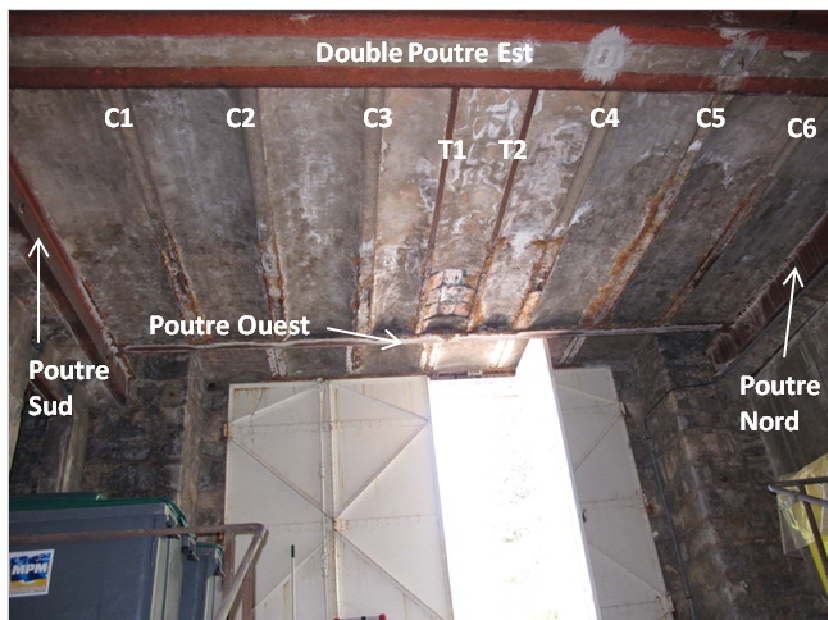


Figure 15 : Plafond de l'entrée du chai, vu depuis le grand escalier.

b. Etat général des éléments

Du point de vue des pathologies, la zone de corrosion maximale se situe globalement près de la porte d'accès à la cave, au droit de la terrasse. Cette zone de corrosion a une emprise de la largeur de la cave et une longueur allant de la porte d'entrée à une distance de 3 mètres environ de la poutre Ouest.

Les pathologies de corrosion sont les mêmes dans l'ensemble des zones : les éléments sont à la fois recouverts de produits de corrosion épais et d'une gangue de concrétions calcaires.

c. Etude détaillée

Cinq zones ont été localement nettoyées sur les éléments de l'ossature afin d'étudier plus précisément les pathologies de corrosion et d'estimer les pertes d'épaisseur de métal.

1. Zone d'appui entre poutre Ouest et poutre Nord

Photos	Description
9709-9710	Fixation de la poutre avant nettoyage
9711-12	Produits de corrosion sur boulon, aspect « mouillé » des produits de corrosion
9713-15	Même zone après nettoyage des produits de corrosion
9716	Zone de mesure des épaisseurs résiduelles : semelle supérieure corrodée et semelle inférieure bien conservée

L'assemblage de la poutre Ouest sur la poutre Nord est réalisé par un boulon. La zone d'assemblage est très corrodée (Fig. 16 et 17). Les produits de corrosion ont un aspect mouillé caractéristique de la succession de cycles humidification-séchage à la surface du métal.

Cela signifie que les défauts d'étanchéité de la terrasse située au dessus du plafond de la cave ont eu une influence active et importante sur la corrosion des poutres sous-jacentes.



Figure 16 : Assemblage entre la poutre Ouest et la poutre Nord.



Figure 17 : Idem après élimination des produits de corrosion.

Dans la zone d'appui, bien que l'épaisseur résiduelle soit réduite, l'assemblage semble visuellement fonctionnel et le boulon joue *a priori* encore son rôle mécanique. Les épaisseurs sont encore visuellement suffisantes.

L'âme de la poutre Nord est globalement dans un bon état (Fig. 18). Celle de la poutre Ouest n'est pas visible.



Figure 18 : Ame de la poutre Nord.

Les pertes d'épaisseur de métal en bord de poutre Nord, mesurées sur la semelle inférieure sont de l'ordre de 2 à 3 mm (épaisseur résiduelle de la semelle au niveau de l'appui : 10 mm / épaisseur résiduelle de la semelle en zone saine : 13 mm).

2. Cornière C3 entre les voutains 3 et 4, à environ 1 m de la poutre Ouest et zone d'appui

Photos	Description
9720	Vue générale de la corrosion dans la zone de jonction poutre Ouest (en haut), cornière C3 (au centre) et té (à gauche)
9721 à 24	Cornière en cours de dégagement
9809 à 9814	Vues de détail de la cornière C3 au niveau de l'appui après nettoyage de la gangue de concrétion : les stries de forge sont visibles sous les produits de corrosion

Il est à mentionner que, sous les concrétions calcaires de la cornière C3 (Fig. 19), apparaissent les stries de forge de la cornière (Fig. 20).

L'épaisseur de la cornière dans la zone la plus corrodée est de 7 mm, ce qui représente une perte d'épaisseur globale de 5 mm environ (12 mm épaisseur mesurée sur cornière saine dans le mur).

Des produits de corrosion ont été prélevés sur la cornière afin d'être analysés au MEB. Ces produits de corrosion ont une épaisseur moyenne de plusieurs millimètres. Ils ne contiennent pas de chlorures (Fig. 21).



Figure 19 : Cornière C3 en cours de dégagement.



Figure 20 : Vue des stries de forge sur la cornière C3 après élimination de la gangue de concrétion.

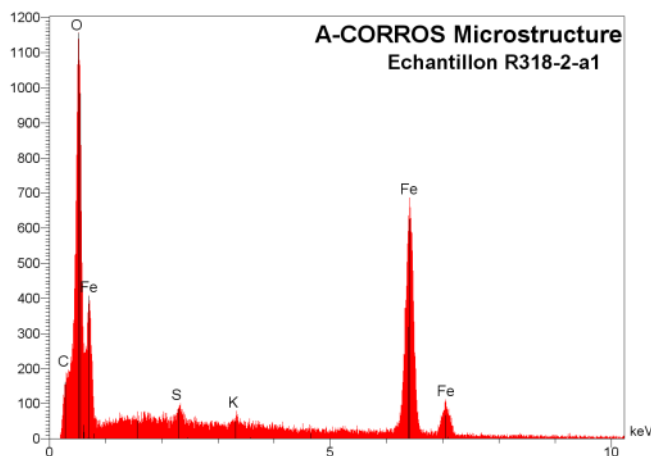


Figure 21 : Analyse des produits de corrosion prélevés sur la cornière C3.

3. Cornière C1 à environ 2 m de la poutre Ouest

Photos	Description
9815 à 9819	Vue de la surface interne de la cornière après nettoyage

La surface de la cornière est saine, relativement homogène sauf dans les parties basses, dans lesquelles des cupules identiques à celles observées sur les poutres sont présentes (Fig. 22 et 23).



Figure 22 : Vue de la surface de la cornière C3 après nettoyage.

Figure 23 : Autre vue de la surface de la cornière C3.

4. Té le plus proche de la cornière C4 (T2)

Photos	Description
9820 à 9824	Epaisseur des produits de corrosion sur une des 2 faces : 2mm



Figure 24 : Té recouvert de produits de corrosion.

Figure 25 : Etat du té après élimination des produits de corrosion.

5. Poutre Ouest, au niveau des cornières C5 et C6

Photos	Description
9717 à 9719	Vue générale de la poutre Ouest entre les cornières C5 et C6 avant nettoyage
9825 à 9828	Vue de la poutre après nettoyage des produits de corrosion

Epaisseur des produits de corrosion en bordure de la semelle inférieure : environ 8 mm.
Epaisseur de métal résiduel (semelle) : environ 5 mm.



Figure 26 : Vue d'ensemble de la poutre Ouest entre les cornières C5 et C6.



Figure 27 : Etat de la poutre après élimination des produits de corrosion.

d. Synthèse

Le bilan sanitaire réalisé sur les éléments de l'ossature métallique du plafond de l'entrée du chai a permis de mettre en évidence les points suivants :

- La zone de corrosion maximale se situe globalement près de la porte d'accès à la cave, au droit de la terrasse. Cette zone de corrosion a une emprise de la largeur de la cave et une longueur allant de la porte d'entrée à une distance de 3 mètres environ de la poutre Ouest.
- Les pathologies de corrosion sont les mêmes dans l'ensemble des zones : les éléments sont à la fois recouverts de produits de corrosion épais et d'une gangue de concrétions calcaires. L'analyse de ces produits de corrosion au MEB n'a pas mis en évidence la présence d'ions chlorures.

Le faciès de corrosion est caractéristique de celui généré par la succession de cycles humidification-séchage et est certainement la conséquence des suintements d'eau ayant résulté du défaut d'étanchéité de la terrasse désormais réglé.

- Les pertes d'épaisseur sont variables selon les éléments et sont comprises approximativement entre 1 et 3 mm.

N.B : Le mortier (ou le coulis de mortier) recouvrant la sous-face du plafond est carbonaté (test de la phénophtaléine réalisé sur un prélèvement). Par conséquent, il a un pH qui ne protège plus les éléments métalliques avec lesquels il est en contact comme c'est le cas pour un mortier sain dont le pH alcalin place les matériaux ferreux dans un domaine de passivité par rapport à la corrosion.

5.2. ETUDE DU METAL ET DE SA SOUDABILITE

5.2.1. ANALYSES CHIMIQUES ELEMENTAIRES

Les résultats des analyses chimiques élémentaires réalisées par spectrométrie d'émission optique à source d'étincelle sur l'échantillon R318-1.1 sont présentés dans le tableau 2 ci-après.

Tableau 2 : Composition chimique obtenue par spectrométrie d'émission optique à source étincelle.

ECHANTILLON	TENEUR EN L'ELEMENT INDIQUE (% EN MASSE) ET INCERTITUDE (%)					
	C	Mn	Si	S	P	Fe
R318-1.1 (Aile de cornière)	0,027 ± 0,003	<0,03 -	0,49 ± 0,03	0,050 ± 0,005	0,36 ± 0,03	BASE

COMMENTAIRES

Les résultats obtenus mettent en évidence une très faible teneur en carbone et des teneurs élevées en phosphore, soufre et silicium qui attestent que la cornière d'où provient l'échantillon a été fabriquée en fer puddlé.

Les teneurs en phosphore et silicium sont d'ailleurs assez élevées et permettent d'émettre l'hypothèse d'une fabrication de mauvaise qualité (faible temps de brassage, affinage médiocre).

La teneur en soufre est habituelle ainsi que la quasi absence de manganèse.

5.2.2. ESSAI DE TRACTION

L'essai a été conduit en accord avec la norme NF EN ISO 6892-1 rev.09-B10 B. sur une éprouvette prismatique usiné à partir de l'échantillon R318-1.2

L'essai a été réalisé dans le sens longitudinal de l'échantillon (sens parallèle au laminage).

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 3 ci-après.

Les courbes de traction sont présentées en annexe 3.

On rappelle ici que :

- L_0 est la longueur initiale (en mm),
- S_0 est la section initiale de l'éprouvette avant essai (en mm²),
- **Rp 0,2 %** (pour 0,2% de déformation) est la limite d'élasticité (en N/mm²),
- **Rm** est la résistance à la traction (en N/mm²),
- **A** est l'allongement à la rupture (en %),
- **Z** est l'allongement à la striction (en %),
- **Fm** est la charge maximale (en kN),
- **E** est le module d'Young (en GPa).

N.B : 1 N/mm² = 1 MPa.

Tableau 3 : Résultats de l'essai de traction réalisé.

N° échantillon A-CORROS	Dimensions de la section (mm)	S _o (mm ²)	L _o (mm)	Rp 0,2% (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)	A (Elong %)	Z (strict %)	Fm (kN)
R318-1.2 (Aile de cornière)	8,00 x 9,55	76,4	50,00	256	377	19,0	52	28,8

COMMENTAIRES

Les caractéristiques mécaniques obtenues sont typiques des fers puddlés. Elles se situent d'ailleurs plutôt en limite supérieure des valeurs généralement obtenues.

La forte valeur d'allongement à la rupture indique a priori que le fer puddlé en présence provient d'un site de production du sud-ouest de la France. Les fers puddlés de l'est de la France présentent généralement un allongement moins important.

Le matériau constituant les éléments de l'ossature du plafond de l'entrée du chai est donc un fer puddlé ayant de bonnes caractéristiques mécaniques.

N.B : Nous rappelons ici que ces caractéristiques ne concernent que le sens longitudinal (sens du laminage). Les fers puddlés quels qu'ils soient possèdent en effet de très mauvaises propriétés mécaniques dans le sens transverse.

5.2.3. ETUDE METALLOGRAPHIQUE

Dans les paragraphes qui suivent sont présentés les observations et analyses réalisées au microscope électronique à balayage (MEB) couplé au spectromètre à dispersion d'énergie sur deux coupes transversales de l'échantillon de cornière murale prélevée sur site.

Pour chacun des échantillons est précisé le taux d'inclusions estimé à partir des clichés réalisés au MEB (Cf. Annexe 5).

a. Echantillon R318-1.3

Figures 28 à 32

La microstructure de l'échantillon révèle une matrice ferritique avec la présence d'inclusions de formes et de dimensions variables. On observe ainsi des inclusions de grande dimension et de forme allongée et de petites inclusions globulaires.

La composition de ces deux types d'inclusions est comparable : phosphore, soufre et silicium. Elles renferment également des oxydes de fer et du calcium.

Le taux moyen d'inclusions dans la matrice est d'environ **14,6 %** (Cf. Annexe 5).

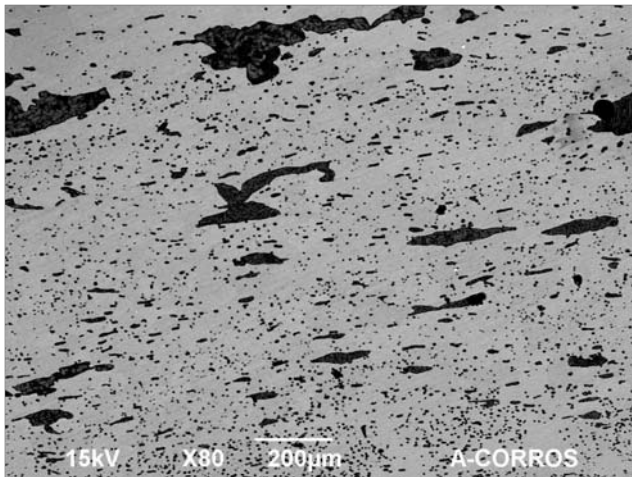


Figure 28 : Vue générale de la matrice (électrons rétrodiffusés).
(Echantillon R318-1.3, MEB, grossissement x80).

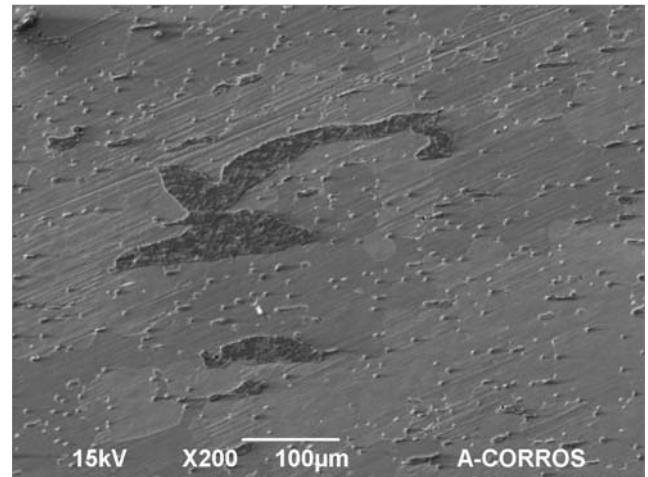


Figure 29 : Autre vue de la matrice à plus fort grossissement.
(Echantillon R318-1.3, MEB, grossissement x200).

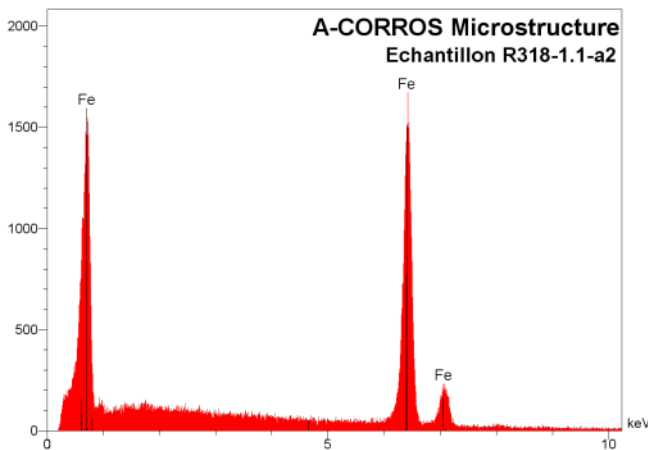


Figure 30 : Analyse élémentaire globale du matériau.
(Echantillon R318-1.3, MEB, grossissement x8000).

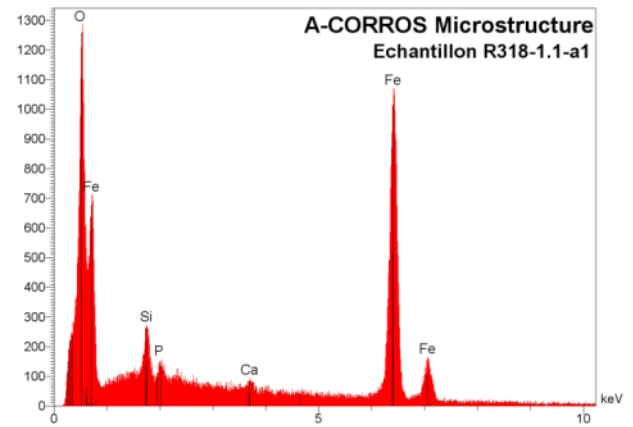


Figure 31 : Analyse élémentaire d'une inclusion allongée de grande dimension.
(Echantillon R318-1.3, MEB, grossissement x1000).

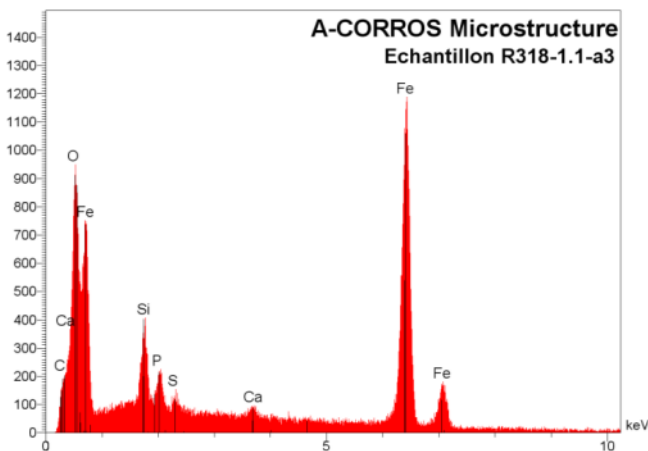


Figure 32 : Analyse élémentaire d'une petite inclusion globulaire.
(Echantillon R318-1.3, MEB, grossissement x20000).

b. Echantillon R318-1.4

Figures 33 à 38

On retrouve le même type de microstructure que sur l'échantillon précédent avec les mêmes inclusions. Le taux moyen d'inclusions dans la matrice est d'environ **16 %** (Cf. Annexe 5).

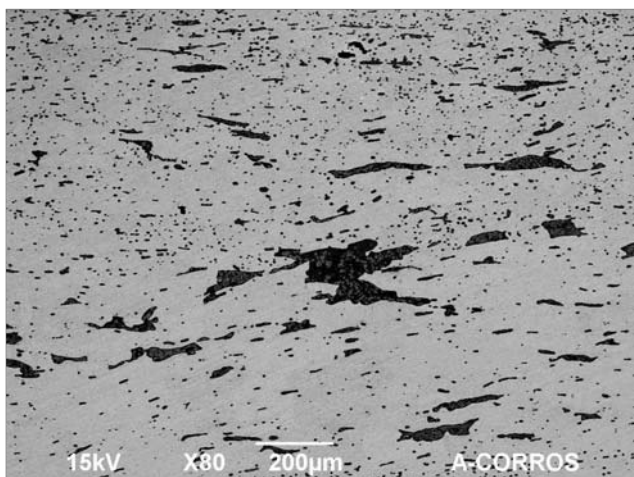


Figure 33 : Autre vue de la matrice à plus fort grossissement (électrons rétrodiffusés). (Echantillon R318-1.4, MEB, grossissement x80).

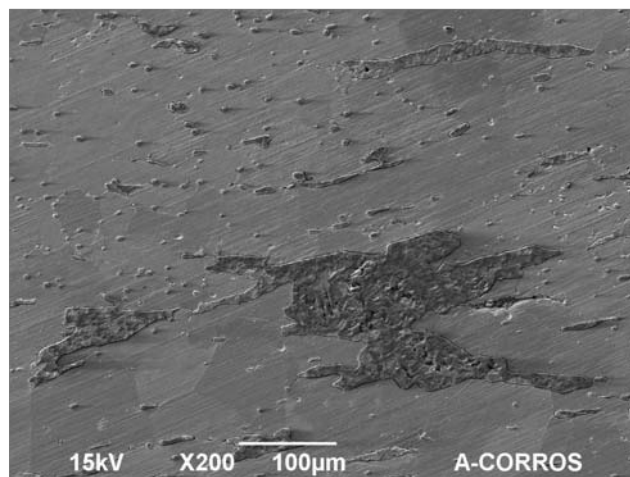


Figure 34 : Vue à plus fort grossissement. (Echantillon R318-4, MEB, grossissement x200).

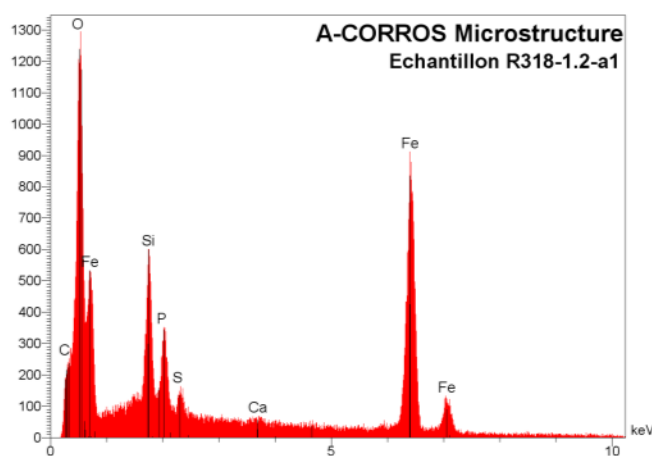


Figure 35 : Analyse élémentaire d'une inclusion allongée de grande dimension. (Echantillon R318-1.4, MEB, grossissement x2000).

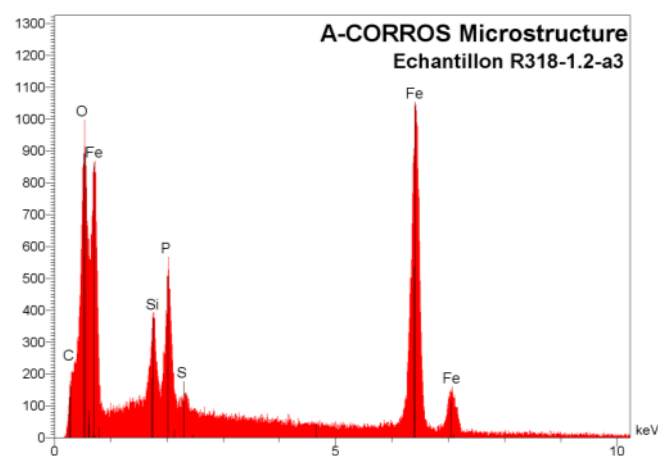


Figure 36 : Analyse élémentaire d'une petite inclusion globulaire. (Echantillon R318-1.4, MEB, grossissement x30000).

5.2.4. SYNTHÈSE

Les points clés ressortant de l'étude métallographique réalisée sont suivants :

- La microstructure du matériau est typique des fers puddlés avec une matrice ferritique comportant des inclusions composées de soufre, phosphore, silicium et d'oxydes de fer.
- Le taux d'inclusions moyen est de l'ordre de 15 % ce qui traduit une assez bonne propreté inclusionnaire.

6. CONCLUSIONS

L'étude menée par A-CORROS pour la caractérisation des ossatures métalliques des plafonds du grand salon et de l'entrée du chai du Palais Lumière a permis d'aboutir aux conclusions suivantes.

6.1. ETAT DES ELEMENTS DES OSSATURES METALLIQUES

6.1.1. PLAFOND DU GRAND SALON

De l'ossature métallique du plafond, seules deux poutres (profilés en I) sont observables depuis la zone où le décor en staff s'est effondré suite à des infiltrations d'eau.

La semelle des poutres, seule partie qui en est visible, présente une corrosion feuilletante qui, malgré les apparences, se révèle peu prononcée.

La perte d'épaisseur de métal estimée est en effet de l'ordre du millimètre avec une épaisseur résiduelle de l'ordre de 15 mm.

Par conséquent, la corrosion affectant la partie observable de l'ossature métallique du plafond du grand salon n'a a priori pas affecté sa tenue mécanique. Un calcul de structure permettrait de valider cette conclusion qui repose uniquement sur des constatations visuelles.

La structure porteuse du staff est fortement dégradée au niveau de la zone effondrée. Des fissures longues dans le staff et des effritements sont également observables qui laissent peser un doute sur la tenue à long terme du plafond.

6.1.2. PLAFOND DE L'ENTREE DU CHAI

La zone de corrosion maximale se situe globalement près de la porte d'accès à la cave, au droit de la terrasse. Cette zone de corrosion a une emprise de la largeur de la cave et une longueur allant de la porte d'entrée à une distance de 3 mètres environ de la poutre Ouest.

Les pathologies de corrosion sont les mêmes dans l'ensemble des zones : les éléments sont à la fois recouverts de produits de corrosion épais et d'une gangue de concrétions calcaires. Les produits de corrosion ne contiennent pas d'ions chlorures.

La concrétion calcaire à la surface des produits de corrosion est le fait du ruissellement de l'eau depuis la terrasse supérieure au travers des briques puis du mortier.

Les produits de corrosion sont volumineux et feuilletés : ils sont donc caractéristiques de cycles humification-séchage liés au défaut d'étanchéité de la terrasse.

Sous les produits de corrosion, le métal apparaît « strié ». Ces stries sont caractéristiques d'un métal forgé corrodé (la corrosion démarre souvent à l'interface entre les passes de forge).

Sous les produits de corrosion dégagés, le métal prend deux aspects différents :

- sous les semelles inférieures des poutres, c'est-à-dire sous les faces horizontales, le métal présente des cupules (cratères). La perte résiduelle de métal est plus importante au cœur des cupules. Ce processus de dégradation est la conséquence de la formation et de la stagnation de gouttelettes en face inférieure des poutres après les épisodes pluvieux. Ces gouttelettes ont créé localement des piles d'aération différentielle (différence d'oxygénation entre l'air environnant et l'intérieur de la gouttelette), accélérant ainsi localement la corrosion.
- sous les cornières, le métal a une surface globalement homogène. Il n'y a pas ici de phénomènes de corrosion avec un faciès de cupules. La corrosion a été « contenue » par le mortier de comblement.

Les pertes d'épaisseur de métal se situent globalement dans une fourchette de 1 à 3 mm.
Aucune corrosion perforante n'a été décelée.

Compte-tenu de ces constatations, l'ossature du plafond ne semble pas affaiblie mécaniquement.
Cependant, seul un calcul de structure permettra de confirmer cette hypothèse.

6.2. MATERIAU

6.2.1. NATURE DU MATERIAU

L'analyse chimique réalisée et la microstructure de l'échantillon de cornière murale prélevé indiquent que le matériau utilisé est un fer puddlé dont les teneurs en phosphore et silicium particulièrement élevées indiquent un affinage médiocre lors du processus d'élaboration.

6.2.2. CARACTERISTIQUES MECANIQUES

Le fer puddlé de l'échantillon de cornière prélevé présente de bonnes caractéristiques mécaniques avec une limite élastique de **256 MPa**, une résistance à la traction de **377 MPa** et un allongement moyen de **19%**.

Le fort allongement à la rupture peut indiquer que le fer puddlé analysé provient d'un site de production du sud-ouest de la France. Les fers puddlés de l'est de la France présentent généralement un allongement moins important.

6.2.3. SOUDABILITE

Malgré ses teneurs importantes en phosphore et silicium, le fer puddlé analysé, avec un taux d'inclusion moyen d'environ **15 %**, est plutôt assez propre.

Par conséquent, il peut a priori être considéré comme soudable **sous certaines conditions** telles qu'énoncées ci-dessous.

- Eviter de concentrer la soudure dans une même section (soudure oblique).
- Proscrire le soudage en angle (soudage en croix) du fait des caractéristiques mécaniques extrêmement faible.
- Souder assez « froid » (à faible énergie) pour éviter la séparation thermique des feuilletts.
- Utiliser des électrodes normalisées. Le choix des électrodes doit être réalisé de manière à donner une ductilité assez élevée au joint soudé. Les experts préconisent le type E43, les caractéristiques mécaniques du métal déposé étant supérieures à celles du fer puddlé. L'emploi d'électrode à enrobage rutile peut être avantageux.
- Procéder impérativement à un essai de convenance sur un échantillon représentatif avant toute tentative de soudure.

Pour s'assurer de la « soudabilité pratique » de ce type de fer puddlé, il est en effet recommandé de procéder, en préalable aux opérations de réhabilitation éventuels, à un essai de convenance (ou essai de soudabilité) sur un échantillon représentatif.

L'échantillon représentatif devra être sélectionné comme faisant partie des éléments les plus sollicités de l'ouvrage.

L'essai de convenance doit être mené selon les recommandations de la norme NF EN ISO 15614-1.

Il comporte deux phases :

- un Descriptif des Modes Opératoires de Soudage (DMOS),
- un essai de Qualification des Modes Opératoires de Soudage (QMOS).

L'essai de qualification consiste en la réalisation d'un assemblage témoin, représentatif des conditions de soudage mises en œuvre par la suite.

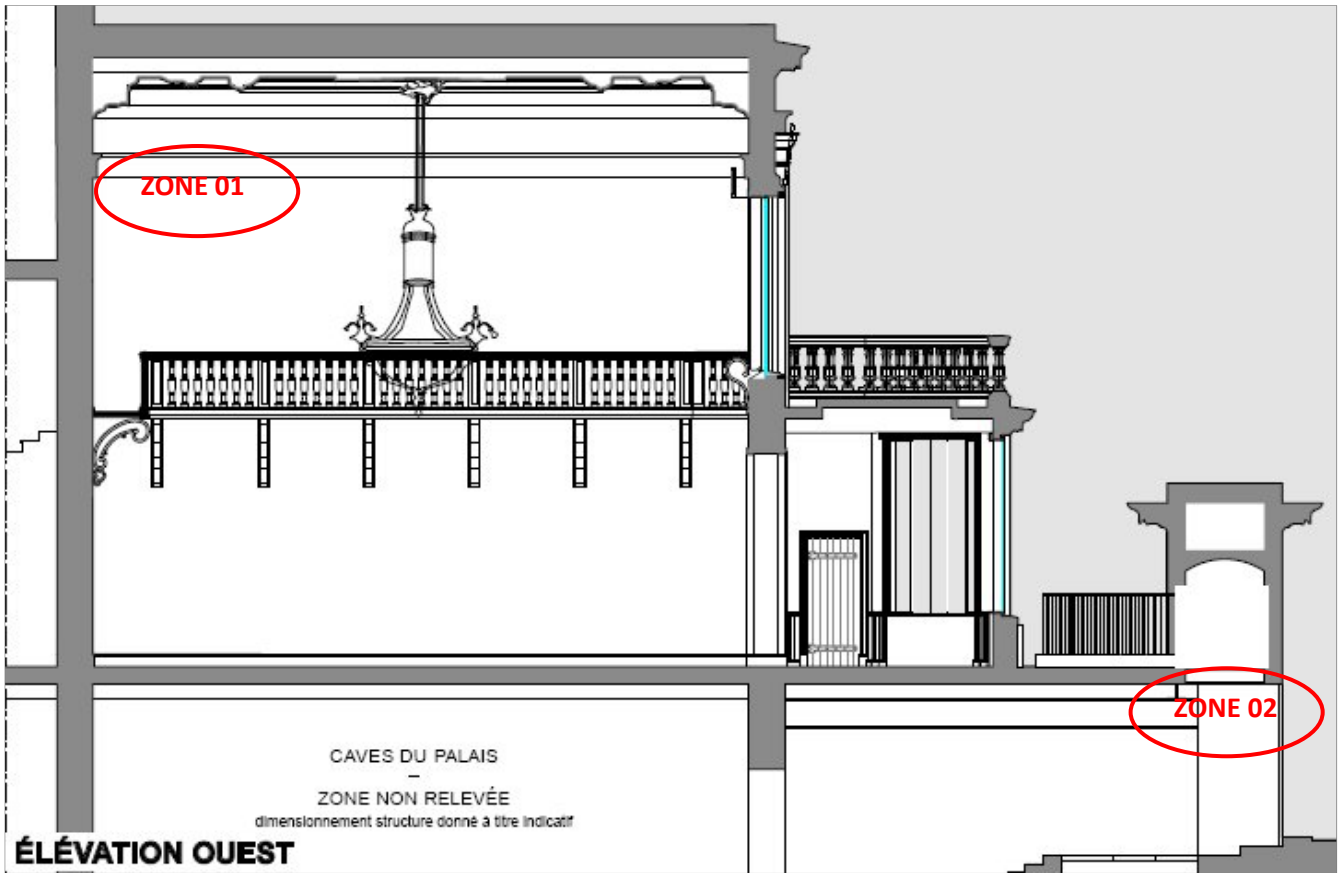
Durant cet essai, le procédé de soudage, le type d'assemblage, les épaisseurs à souder, la position de soudage, le préchauffage, l'énergie de soudage (etc.) sont définis.

L'étape finale de l'essai de qualification, consiste en la réalisation de contrôles, examens et essais destinés à juger de la soudabilité effective du matériau. Il s'agit à la fois de contrôles non destructifs (contrôle visuel, ressuage, ultrasons) et d'essais destructifs (examens métallographiques, essais de dureté, essais mécaniques (traction, flexion, pliage)).

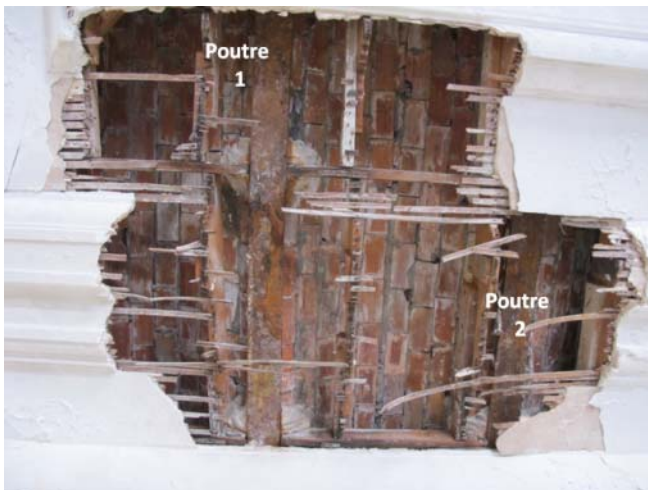
Pour plus d'informations sur le soudage, les auteurs recommandent de se reporter au guide STRRES n°1 de la famille métal, « Réparation et rénovation des structures métalliques », rédigé par J-P. PERSY et édité par le syndicat national des entrepreneurs spécialistes de travaux de réparation et renforcement de structures (STRESS) / Décembre 2008.

ANNEXES

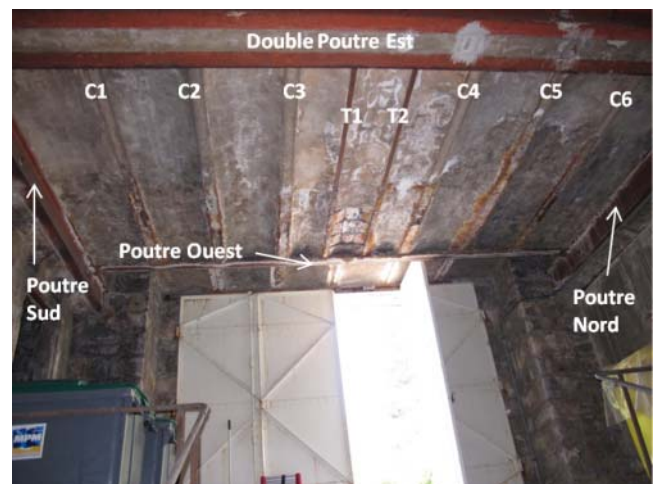
- ANNEXE 1 :** Localisation des ossatures du plafond du grand salon et de celui de l'entrée du chai. **(Page A-1)**
- ANNEXE 2 :** Photographies de la zone de prélèvement de l'échantillon source **R318-1**. **(Page A-3)**
- ANNEXE 3 :** Courbe de traction du sous-échantillon **R318-1.2**. **(Page A-5)**
- ANNEXE 4 :** Evaluation du taux d'inclusions des sous-échantillons **R318-1.4**, **R318-2.4** et **R318-3.4**. **(Page A-7)**



ZONE 01 : Zone détériorée du plafond du grand salon.



ZONE 02 : Plafond de l'entrée du chai.



ENTREE DU CHAI - AILE DE CORNIERE - ECHANTILLON R318-1



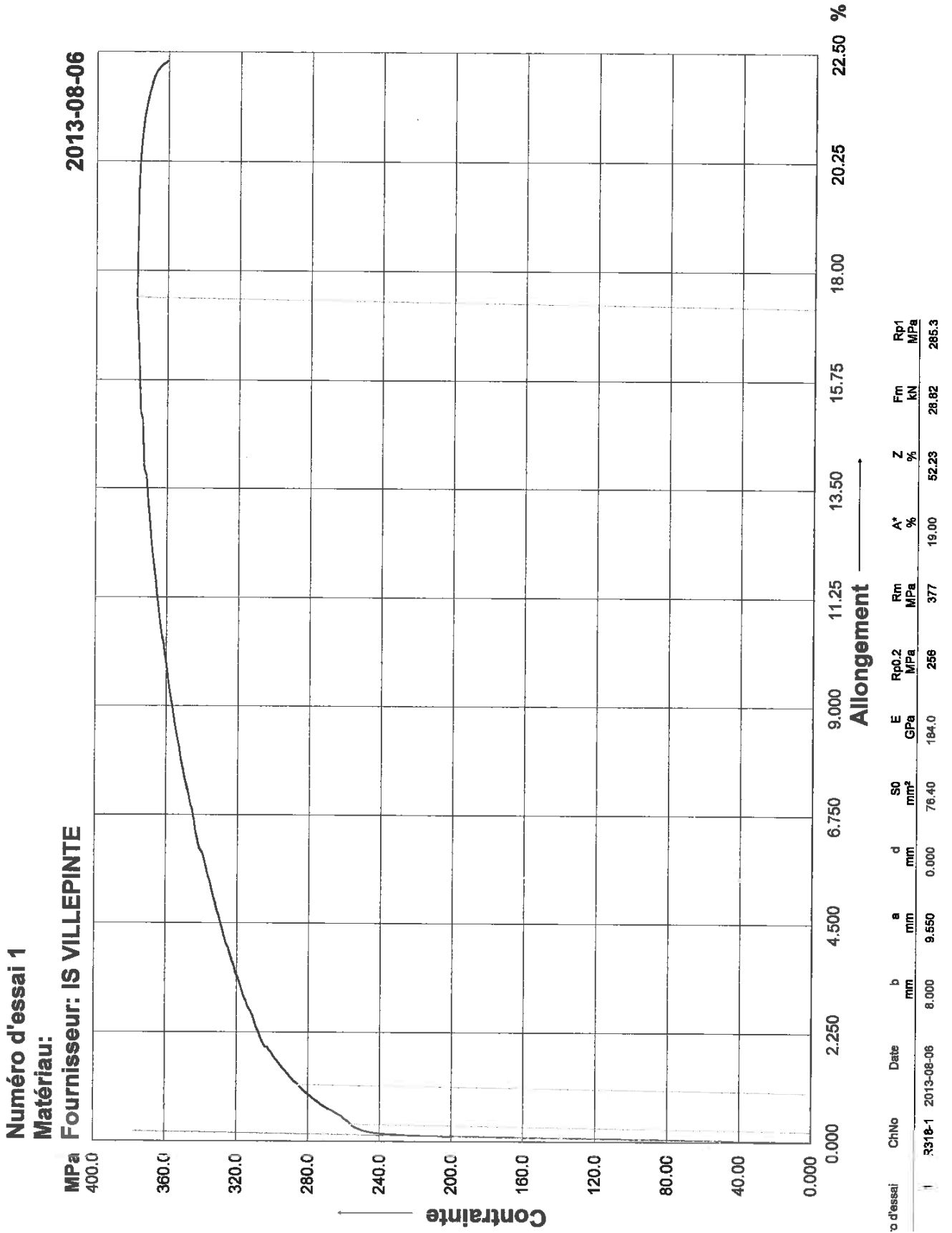
Zone de prélèvement : cornière murale.

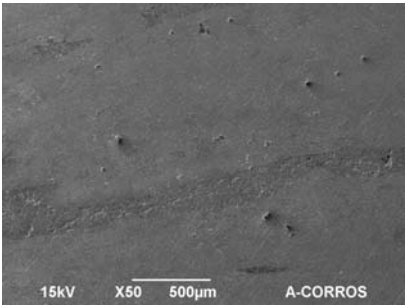
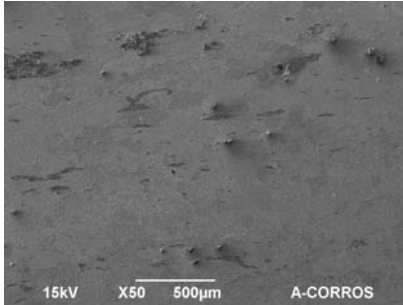
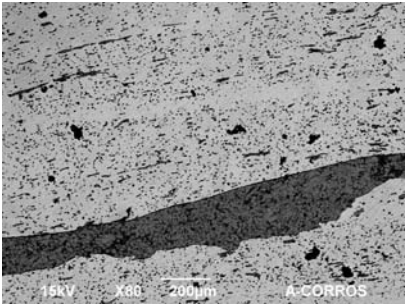
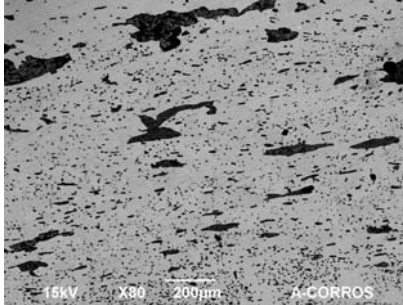
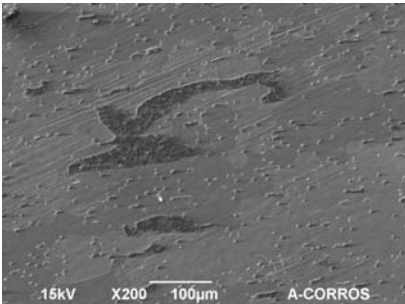
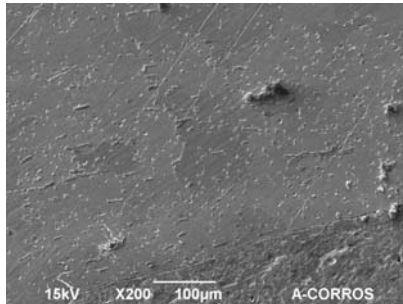
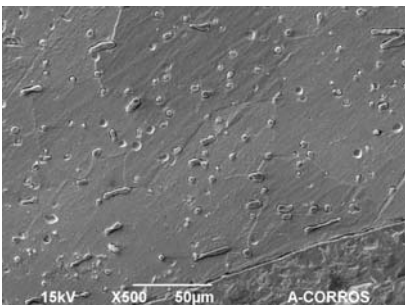
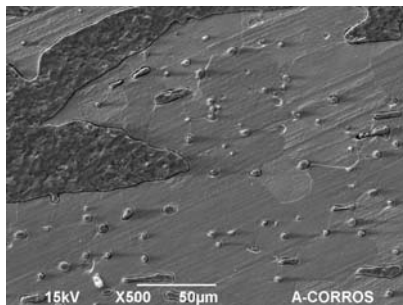


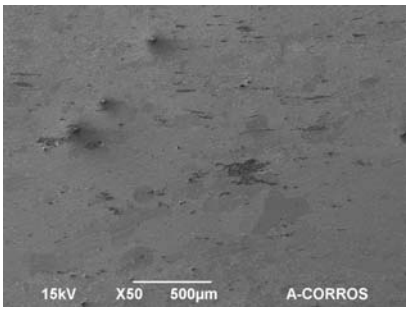
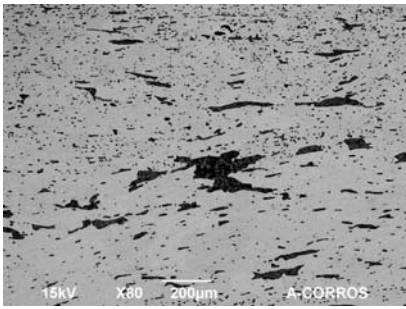
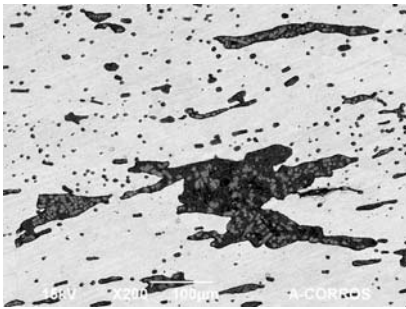
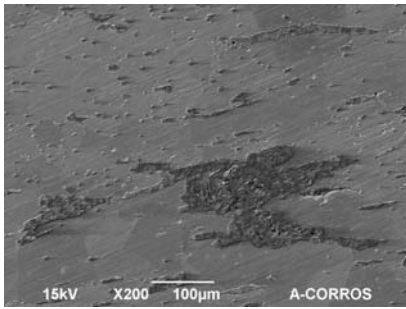
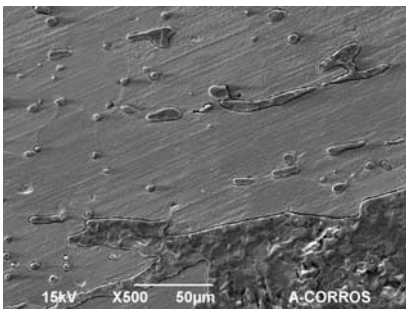
Echantillon avant prélèvement : aile de cornière.



Zone de prélèvement après découpe.



ECHANTILLON R318-1.3 (Fer puddlé – Cornière murale – Entrée du chai)		TAUX MOYEN D'INCLUSIONS : 14,6 %
MEB, Grossissement x50		Taux d'inclusions
		11 %
MEB, Grossissement x80		Taux d'inclusions
		16 %
MEB, Grossissement x200		Taux d'inclusions
		15,4 %
MEB, Grossissement x500		Taux d'inclusions
		16,1 %

ECHANTILLON R318-1.4 (Fer puddlé – Cornière murale – Entrée du chai)		TAUX MOYEN D'INCLUSIONS : 16 %
MEB, Grossissement x50		Taux d'inclusions
		4,9 %
MEB, Grossissement x80		Taux d'inclusions
		14,1 %
MEB, Grossissement x200		Taux d'inclusions
		14,3 %
MEB, Grossissement x500		Taux d'inclusions
		30,8 %

