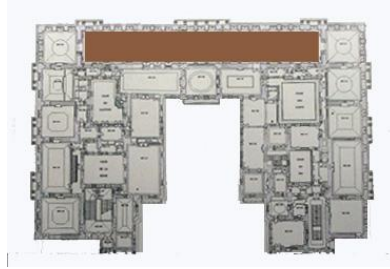




DOCUMENT ORIGINAL NON PUBLIE



Localisation des fissures par thermographie active. Étude statique des fissures.

Galerie des Glaces Château de Versailles

« Il est clair que même si l'impératif de la conservation s'applique en général à l'œuvre d'art dans sa structure complexe, elle concerne spécialement la **consistance matérielle**, siège de la manifestation de l'image. C'est pour cette consistance matérielle que devront se faire tous les **efforts et les recherches**, afin que celle-ci puisse durer le plus longtemps possible. »

Cesare Brandi :



Sommaire

Introduction

Matériaux et structure de la voûte

Propriétés mécaniques des matériaux

a) Réactivité du bois par rapport à l'humidité.

b) Caractéristiques du plâtre.

Propriétés thermiques des matériaux

Fissures

Fissures stabilisées

Fissures actives

Fissures sous-jacentes aux peintures sur toile marouflée.

Méthodes de détection des fissures sous-jacentes par thermographie IR

La source de chaleur.

Caractéristiques thermiques des matériaux.

Émissivité : Corps gris.

Coefficient de conductivité thermique.

Caméra infrarouge

Analyse des défauts

Localisation de quelques fissures sous-jacentes par thermographie IR

Étude statique des fissures

Localisation et morphologie des deux fissures instrumentées sur les tympans.

Instrumentation des fissures

Tympan sud – analyse des résultats

Tympan nord – analyse des résultats.

Études et analyse des climats de la Galerie des Glaces

Généralités

Singularités du microclimat autour de la fissure tympan sud

Incidence du climat sur la stabilité de la fissure

Analyse de l'enchaînement des mouvements.

Interprétation des résultats.

Conclusion.

Bibliographie.



Introduction.

Les plafonds sont de véritables supports de l'expression artistique. On trouve réunies dans ces superbes réalisations, des stucs, des dorures, des peintures sur enduit et des peintures sur toile marouflée. Les artistes ont su tirer le meilleur parti de chaque technique utilisée et du savoir-faire des artisans du bâtiment et des décorateurs.

La conservation de ces sites a toujours posé de problèmes. Périodiquement, ces décors ont besoin d'être consolidés et restaurés. Dans les archives de la Galerie d'Apollon et de la Galerie des Glaces, nous avons pu noter que les plafonds voûtés présentent des désordres structuraux plus prononcés que les autres éléments de l'édifice. Elles relatent de la précocité des problèmes structuraux, en décrivant des dégradations mécaniques ou les enduits commencent par se fissurer, se fragmenter pour aboutir des endommagements plus spectaculaires. Pour évaluer la dynamique de ces phénomènes, nous avons proposé dans la présentation de notre projet de restauration de la voûte et dans notre note méthodologique l'instrumentation des fissures et nous avons au cours du chantier développé une méthode de détection de fissures par thermographie infrarouge.

Matériaux et structure de la voûte.

En termes structuraux, nous allons considérer les deux éléments de la Galerie des Glaces, charpente et voûte décorée comme deux entités distinctes. La charpente constitue un ensemble de systèmes triangulés reliés entre eux. La voûte est assimilée à une coque, c'est-à-dire à un solide dont une des dimensions, l'épaisseur, est beaucoup plus petite vis-à-vis des deux autres. La liaison entre les deux structures est assurée par le lattis.

Du point de vue mécanique, la charpente, constituée principalement de bois, forme un ensemble ayant une certaine élasticité. La voûte, constituée d'un enduit de plâtre recouvert de différentes couches allant des préparations aux couches colorées, est rigide et cassante. En partant de ce modèle, on peut évoquer au moins trois causes responsables des mécanismes de fissuration :

La première de ces causes porte sur les endommagements précoces. Les bâtiments une fois terminés peuvent subir des déformations liées aux charges permanentes et au tassement du sol. Ces événements sont connus, mais leurs effets sur la conservation des décors sont quelquefois inattendus, notamment lorsqu'il a eu des modifications du bâtiment.

La seconde cause met en jeu les sollicitations externes telles que les intempéries climatiques. Le vent, la neige, exercent des charges non négligeables sur les façades et les toitures. Elles se traduisent dans la structure de l'édifice par des effets de compression – traction – flexion – torsion. Les eaux de pluie et le gel agissent par infiltration dans les matériaux poreux, bois et pierre, en provoquant lors du gonflement ou du retrait des compressions importantes.

La dernière cause serait liée aux sollicitations internes. Les variations de température et d'humidité dans les bâtiments se traduisent inévitablement par des changements de propriétés mécaniques des matériaux. Ces modifications sont responsables du développement des phénomènes d'actions réciproques des matériaux les uns sur les autres qui se traduisent par des effets de compression- flexion– traction – cisaillement - clivage.

Ce système est donc complexe en raison de l'hétérogénéité des matériaux et de la multiplicité des contraintes en jeu. Les sollicitations provoquent au niveau de chaque structure, des modifications incessantes de l'état d'équilibre des contraintes et des déformations qui peuvent se traduire à tout moment par une rupture.



La voûte est constituée de bois, d'enduit de plâtre et de plusieurs couches de peinture, fig.1. Ces trois éléments sont liés ensemble par des forces d'adhésion. Les éléments du bâtiment en bois se trouvent sollicités par des variations d'humidité. Les gonflements différentiels entre le bois, l'enduit et la peinture et sont responsables d'une redistribution des contraintes.

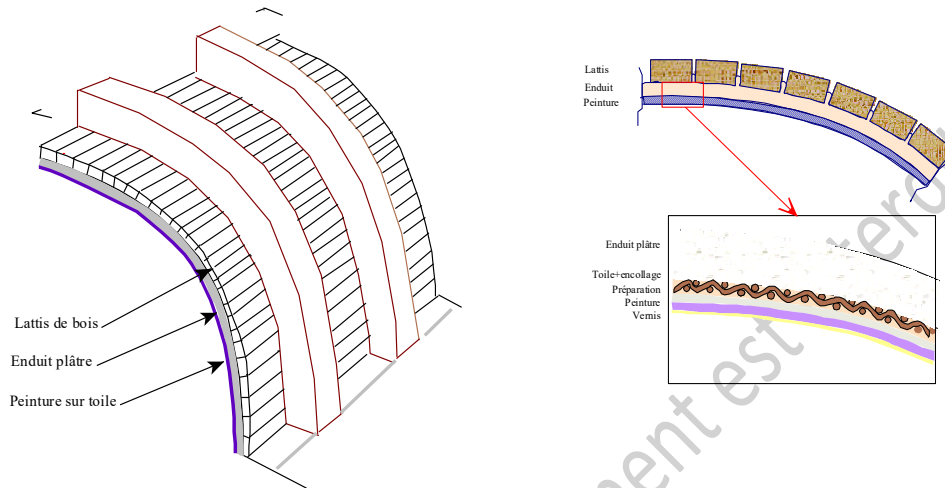


Fig.1 Structure de la voûte

Propriétés mécaniques des matériaux

a) Réactivité du bois par rapport à l'humidité.

Le bois est un matériau hygroscopique et retient une certaine quantité d'eau. Le taux d'humidité dans le bois varie avec l'humidité relative ambiante. Il s'exprime par le rapport entre la différence de masse entre le bois anhydre et humide et la masse du bois anhydre.

Le bois est un matériau anisotrope, la variation du volume n'est pas la même dans les sens radial, longitudinal et tangentiel du bois. Le volume varie davantage dans le sens tangentiel. Les bois sont donc caractérisés par un coefficient de gonflement ou de retrait volumique qui prend en compte les directions radiale, longitudinale, et tangentielle, fig.2.

La déformation du bois peut donc s'exprimer en fonction de l'humidité par la relation suivante :

$$\varepsilon(HR) = - \frac{\alpha_v \Delta HR}{1 + \alpha_v \Delta HR}$$

Sachant que α_v est le coefficient de gonflement ou de retrait volumique.



La variation dimensionnelle du bois en fonction de l'humidité est très importante dans le sens tangentiel et quasiment nul dans le sens longitudinal, fig.3.

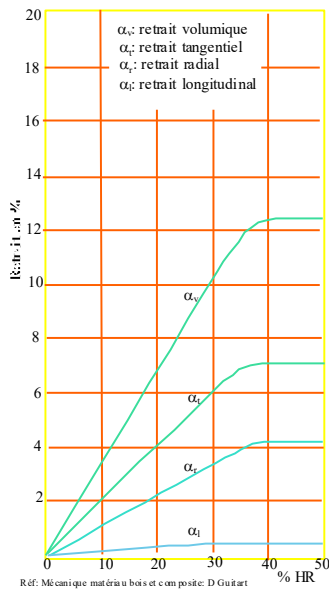


Fig.2 : coefficients de dilatation du bois

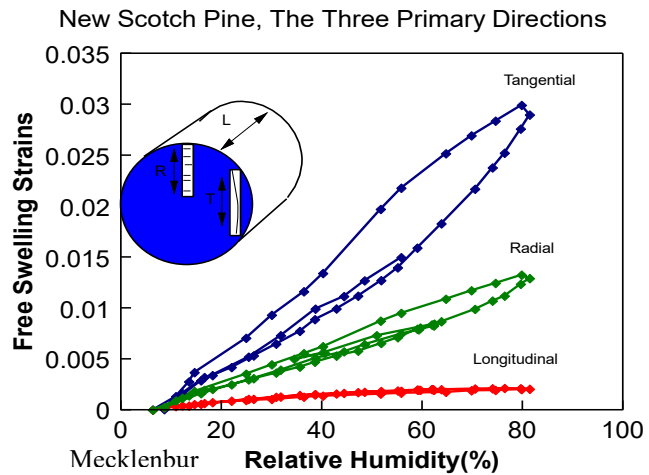


Fig.3 : Variations dimensionnelles en fonction du débit

D'un point de vue mécanique, le bois est caractérisé par des modules d'élasticité dans les trois sens. D'après Marion Meklenburg, les modules d'élasticité du bois de bouleau dans les sens tangentiel et radial sont à peu près de même amplitude alors que dans le sens longitudinal il est beaucoup plus élevé, fig.4. Le bois a un comportement orthotrope vis-à-vis des différents plans de coupe.

Quel que soit le plan de débit du bois, les modules varient avec l'humidité. Ils diminuent lorsque l'humidité augmente. Selon Mecklenburg la variation du module présente deux parties, une faible décroissance linéaire de 5% à 50% puis après cette valeur la décroissance s'accélère, fig.5.

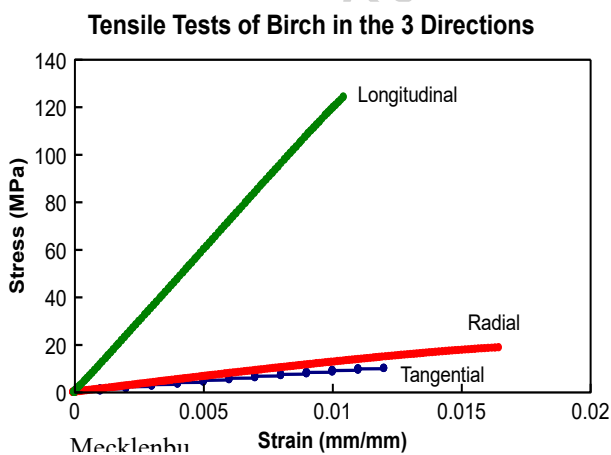


Fig.4 : Module d'élasticité en fonction du débit

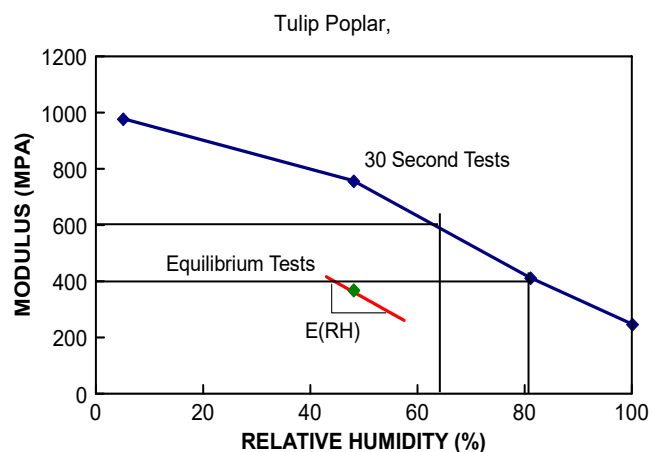


Fig.5 : Évolution du module d'élasticité du peuplier en fonction d'HR



Fissures

La Galerie des Glaces est parcourue par plusieurs types de fissures dans l'enduit. Elles se caractérisent :

1. Par leur orientation, transversale, longitudinale.
2. Par leur stabilité, fissures actives, dormantes
3. Par la régularité du tracé, rectiligne, sinueux, ramifié, branché.
4. Par la largeur de l'écartement des parois.
5. Par leur longueur, leur profondeur, leur désaffleure
6. Par leur continuité ou discontinuité.

Elles peuvent se regrouper :

1. En fissures stables.
2. En fissures actives
3. En fissures sous-jacentes aux peintures sur toile.

La plupart de ces fissures sont anciennes et elles sont réparties de façon homogène sur l'ensemble de la voûte. Elles sont le témoin de l'altération des matériaux, rupture cohésive du pâtre, dégradation du bois, décollement de l'enduit du lattis. On constate une plus forte concentration de fissure sur le côté est. L'enduit de la voûte a été consolidé en 1950 par la pose de tire-fond qui maintiennent l'enduit décollé. Les fissures ont été colmatées avec un mastic à base de mortier qui sert actuellement de marqueur sur l'état de stabilité des fissures. Les fissures sous-jacentes sont les plus difficiles à repérer et n'ont pas fait l'objet de restauration.

Les fissures stabilisées.

Les fissures mastiquées qui ne présentent pas de rupture du mastic peuvent être considérées actuellement comme stables, fig. 6, 7, 8.



Fig.6, 7, 8 : Fissures stabilisées

Elles sont réparties sur l'ensemble de la voûte.

Côté est

Sections 1 et 6; leur orientation est en majorité transversale

Sections 4 et 2 ; leur orientation est plutôt oblique.



Côté ouest

Section 4 et 6 ; leur orientation est en majorité transversale

Section 2 ; quelques fissures obliques

Les fissures longitudinales se situent plutôt dans le milieu de la voûte. La largeur moyenne des fissures est d'environ 1,8 cm. Cet état de stabilité peut évoluer dans le temps.

Fissures actives

Ces fissures se caractérisent par une ouverture de l'enduit ou un écrasement de celui-ci. Les lèvres de la fissure peuvent être affleures ou en désaffleures, fig. 9, 10. Ce sont les mouvements de l'ensemble du bâtiment qui provoquent la formation, l'évolution et les déplacements des fissures situées dans une zone de concentration de charges trop importante. Elles sont moins nombreuses que les fissures stabilisées.



Fig. 9,10 Fissures actives

Elles sont situées sur le côté est et au niveau des tympan nord et sud.

Côté nord-est : Section 1,2 et 6

Côté sud-ouest : Section 11

Fissures sous-jacentes aux peintures sur toile marouflée.

Toutes les fissures ne sont pas visibles puisqu'elles peuvent passer sous différents éléments du décor et notamment sous les peintures à l'huile marouflées sur enduit. Ces fissures se comportent comme les autres, la peinture juxtaposée ne jouant qu'un rôle secondaire du point de vue mécanique. La première étape est la reconnaissance de la présence d'une fissure sous la toile. Plusieurs cas de figure se présentent :

1. Le décollement de la toile le long de la fissure est tel que sous l'écartement de la fissure, la toile suffisamment élastique pour se déformer sans se rompre. La fissure est dissimulée par la peinture. Une légère déformation nous signale quelquefois la présence de fissure sous-jacente, fig.11.
2. L'écartement de la fissure est tel qu'il entraîne un décollement local de la toile suivi de la déchirure de la toile. Cette déchirure longe la fissure et la met en évidence, fig.12.



Fig.11 : Fissure sous-jacente fermée

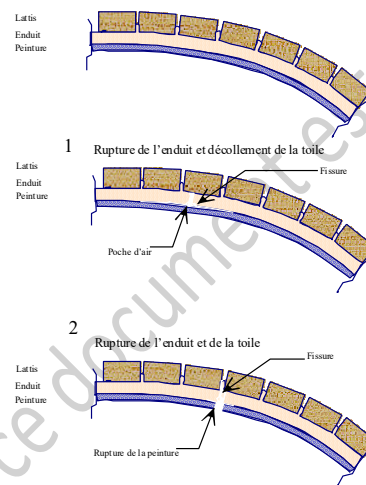
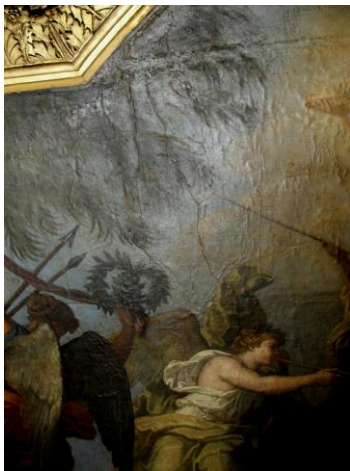


Fig.12 : Fissure sous-jacente ouverte

Méthodes de détection des fissures sous-jacentes par thermographie active

Le principe de détection des défauts d'une paroi décorée multicouche est basé sur une analyse thermique de la surface. Le dispositif de détection est composé d'un capteur appelé caméra à infrarouge et dans le cas d'une thermographie active d'une source de chaleur. Le rôle de la source de chaleur est de provoquer une sollicitation de la surface qui doit en principe révéler les défauts soupçonnés.

L'interprétation des résultats obtenus va demander un minimum de connaissance sur les propriétés thermiques des rayonnements (source de chaleur) et les propriétés thermiques des matériaux. Afin de finaliser le diagnostic il faut être également connaître les structures sur lesquelles on travaille pour pouvoir identifier les défauts mis en évidence.

La source de chaleur :

Les rampes à infrarouge où les lampes à incandescence sont génératrices d'un rayonnement infrarouge (puissance environ 800 à 1000 W), fig.13.

Les échanges thermiques par rayonnement se font par le transfert d'énergie par voie d'onde électromagnétique. Les rayonnements thermiques infrarouges se situent entre 760 nm et 100000 nm. On distingue :

- De 400 nm à 760 nm le domaine du visible,
- De 760 nm à 3000 nm le proche IR



De 3000 nm à 6000 nm le moyen IR
De 6000 nm à 15000 nm l'IR lointain.
De 15000 nm à 100000 nm, IR extrême.

C'est l'interaction de cette onde avec la matière qui est la cause de son échauffement. En émettant une longueur d'onde supérieure à 1000 nm le rayonnement infra rouge interfère avec la matière. Cette interaction crée une agitation moléculaire responsable de l'échauffement de celle-ci.



Fig.13 : Chauffage d'une surface à l'aide de lampes.

Caractéristiques thermiques des matériaux.

Quand un rayonnement monochromatique d'énergie W tombe sur l'élément dS , du matériau, fig.14.

Une partie τW de l'énergie incidente est transmise à travers le corps,
une partie αW est absorbée par lui,
une partie ρW est réfléchie .

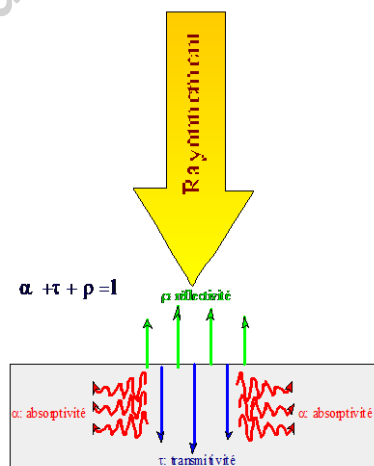


Fig.14 : Absorption d'un rayon monochromatique par corps.



Les trois coefficients : α absorptivité τ : transmittivité, et ρ réflectivité sont liés par la relation :

$$\tau + \alpha + \rho = 1$$

Ils expriment le principe de conservation de l'énergie.

Du point de vue théorique les matériaux sont classés en quatre catégories :

Les corps noirs, à la fois opaques et non réfléchissants, $\tau = 0$ et $\rho = 0$, de telle sorte que $\alpha = 1$;

Les corps blancs, $\alpha=0$ donc $\tau + \rho = 1$.

Les corps opaques, c'est-à-dire totalement absorbants, $\tau = 0$.

Les corps transparents, $\rho = 0$

Il y a deux paramètres importants qui interviennent lors du rayonnement thermique des matériaux : L'émissivité et la conductivité.

Émissivité : Corps gris

Ces quatre sortes de corps sont évidemment des modèles théoriques. L'expérience montre que les corps les plus absorbants sont aussi les plus thermiquement émissifs. C'est pour cette raison que le corps noir est pris comme élément de comparaison et de référence pour le rayonnement des corps quelconques. Donc l'émissivité est, par définition, le rapport (inférieur à 1) de leur énergie rayonnée à l'énergie rayonnée dans la même longueur d'onde par le corps noir porté à la même température.

Les corps gris ont une émissivité indépendante de la longueur d'onde et la loi de Kirchhoff pose :

$$\varepsilon = \alpha = 1 - (\tau + \rho),$$

L'émissivité de ce corps est égale à son absorptivité. Cette loi est bien vérifiée en pratique à condition que le rayonnement considéré soit purement thermique et que le corps ne soit pas investi d'un milieu ambiant, gazeux ou liquide, présentant un trop grand déséquilibre thermique avec lui. L'émissivité est généralement très influencée par l'état de la surface et des couches moléculaires situées immédiatement en dessous de celle-ci.

Conductivité thermique.

C'est le phénomène de transfert de la chaleur à l'intérieur du matériau. Le flux de chaleur correspond à un flux de phonons. La conductivité thermique exprimée par :

q : Densité du flux de chaleur (W/m^2)

T : Température absolue

λ : coefficient de conductivité.

(1)

$$\vec{\Phi} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad } T};$$



Elle dépend des matériaux et de leur capacité à laisser passer le flux de chaleur. Nous avons des matériaux conducteurs (métaux, oxyde métallique) ou isolants (air, briques, matériaux poreux et hétérogènes).

Le flux de chaleur qui traverse une paroi homogène est uniforme et s'exprime par l'expression.

$$(9) \quad \Phi = \frac{\lambda}{e} (T_2 - T_1).$$

Propriétés thermiques des matériaux :

	Conductivité thermique λ (W/mK)	Émissivité ϵ	Épaisseur e (mm)
Bois (chêne)	$\approx 0,23$	0,9	
Plâtre	0,465	0,9	20 à 30
Toile imprégnée de maroufle.	Environ 0,20	-	-
Préparation	Environ 0,20	Environ 0,95	2 à 3
Peinture	Environ 0,5	Environ 0,96/97	2 à 3
Vernis	Environ 0,15	0 transparent	0,5 à 1
Air	0,026215	0 transparent	

Caméra infrarouge.

Les appareils de thermographie emploient des détecteurs qui fournissent une carte des températures appelée thermogramme. La caméra infrarouge fonctionne quasiment comme un appareil photo numérique à la différence que les capteurs de type CCD ou CMOS sont sensibles aux rayonnements appartenant au spectre visible alors que les capteurs infra rouges réagissent aux rayonnements électromagnétiques allant de 800 nm à 10000 nm.

Un bloc détecteur de type FPA microbolomètre transforme l'énergie infrarouge incidente W en signal électrique S . Si on admet que S est proportionnel à W le rapport de S sur W définit la sensibilité du capteur. On lui associera également une variation minimale W détectable. Ensuite le signal électrique amplifié ou signal analogique est numérisé par un dispositif qui le transforme en une image en fausse couleur.

Analyse des défauts

Thermo grammes d'un matériau dit homogène : On va considérer que la structure d'une peinture sur toile marouflée sur enduit se comporte du point de vue du flux thermique comme un matériau homogène. Le flux thermique est proportionnel à la conductivité du matériau. La peinture se compose d'une superposition de matériaux en contact intime entre eux. Comme la conductivité des couches de préparation jusqu'au vernis varie de 0,15 à 0,50 W/m.K, on peut estimer que le débit du flux variera légèrement quand il passera d'un matériau à l'autre sans être arrêté. Inversement proportionnel à l'épaisseur, le flux traversera les couches minces plus rapidement. D'une manière générale le flux thermique traversera une peinture sans trop de difficulté.

Les peintures sont constituées de mélanges de couleur en plusieurs couches. Aucune de leur couleur n'est pure et ne correspond à aucune longueur d'onde déterminée. De par leur nature hétérogène, elles ne peuvent ni entrer dans la catégorie des corps totalement opaques ou

transparents. C'est pour cette raison que les peintures seront assimilées du point thermique à des « corps gris ». Dans ce cas, l'émissivité est égale à la partie absorbée par l'ensemble des matériaux en chaque point de la surface. La peinture va donc rayonner à son tour d'une température homogène. Le capteur de température ou la caméra thermographie va nous donner une image contenant qu'une seule couleur, correspondant à la température de surface, fig.15.

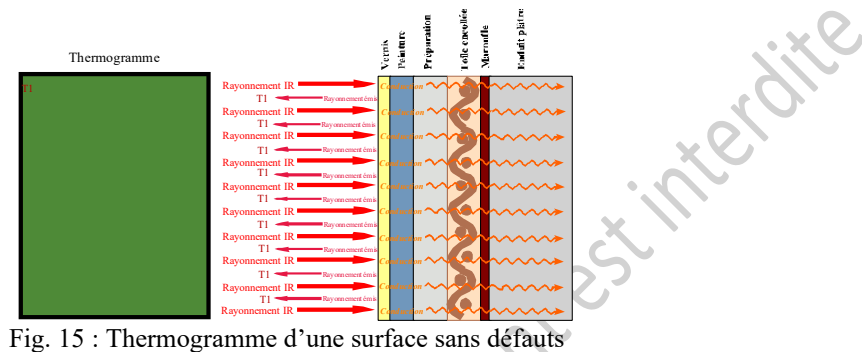


Fig. 15 : Thermogramme d'une surface sans défauts

Thermogrammes d'un matériau contenant des défauts. Dans notre peinture, l'enduit de plâtre et la toile, au niveau de la marouflage, se sont décollés ponctuellement formant une poche d'air. L'air est un isolant thermique et sa conductivité est très faible 0,026 W/m.K. Un isolant est un matériau capable de freiner ou stopper un flux thermique progressant dans les matériaux. Au niveau de la poche d'air, le flux thermique est entravé et la chaleur s'accumule dans cette zone provoquant un rayonnement plus intense. Au regard de la poche d'air, la température est plus élevée. Le capteur en mesurant les températures en chaque point de la surface va trouver une différence entre les zones situées au niveau de la poche et les autres zones. L'image restituée par la caméra thermographique fait apparaître à la poche d'air. Si le défaut a plusieurs niveaux de profondeur, le film d'air le plus épais provoque localement l'échauffement le plus important et se traduit par une zone d'une couleur différente, fig.16.

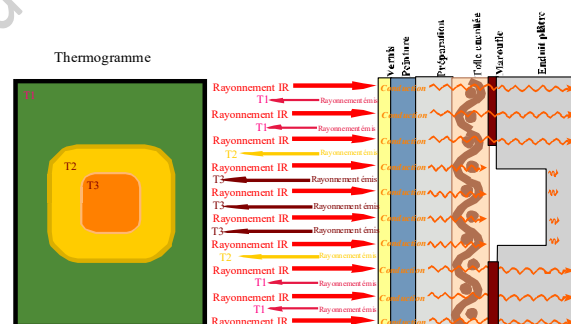


Fig. 16 : Thermogramme d'une surface avec défauts

La thermographie est un moyen de localiser les fissures qui se trouvent sous les toiles peintes. Cet technique permet non seulement de les localiser, mais aussi d'en évaluer les dimensions et la forme.



Localisation de quelques fissures sous-jacentes par thermographie IR

Tympan nord « L'alliance de l'Allemagne et de l'Espagne avec la Hollande » 1672. Dim : 4/9,6 m surface 30 m², fig.17.

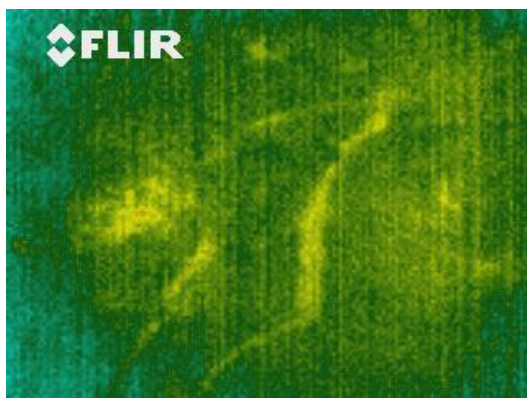
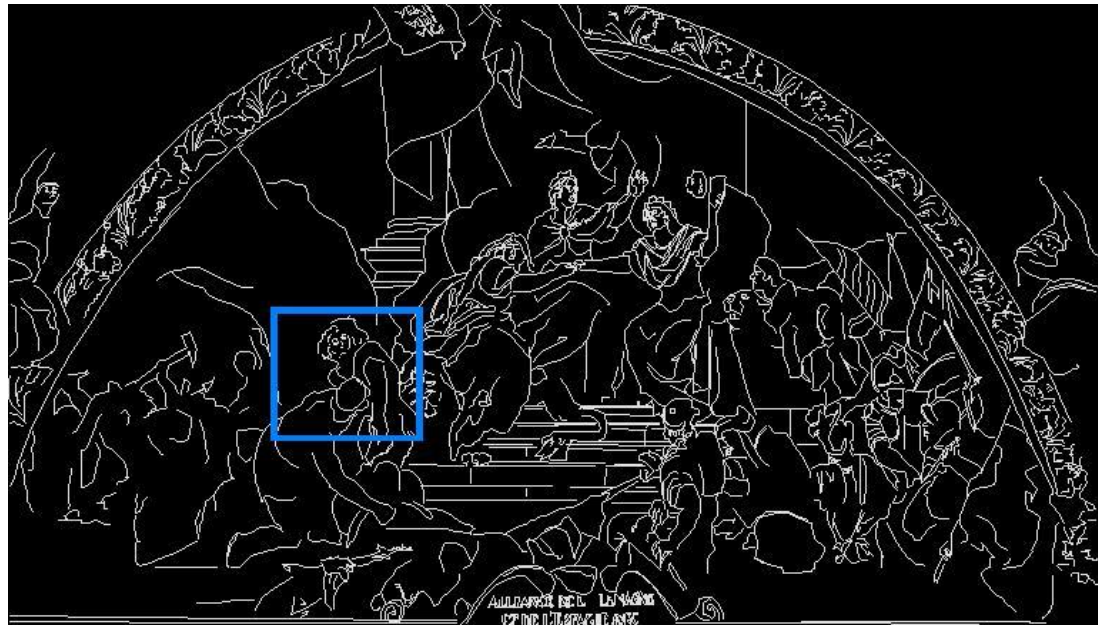


Fig.17 : Thermogramme d'une fissure fermée du tympan nord.

Tympan sud « La Hollande accepte la paix et se détache de l'Allemagne et de l'Espagne.
Dim : 4/ 9,6 m surface 30 m², fig.18.

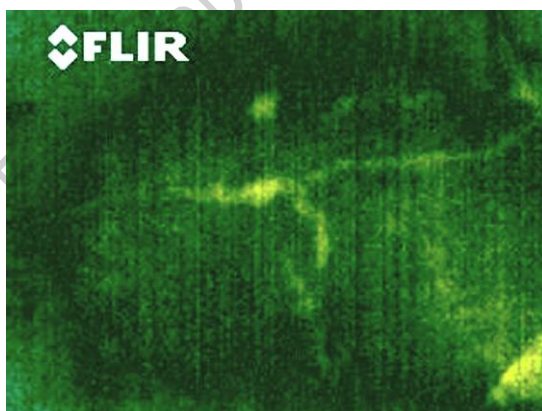
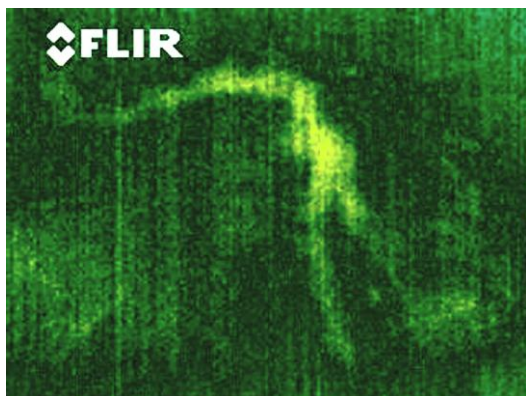
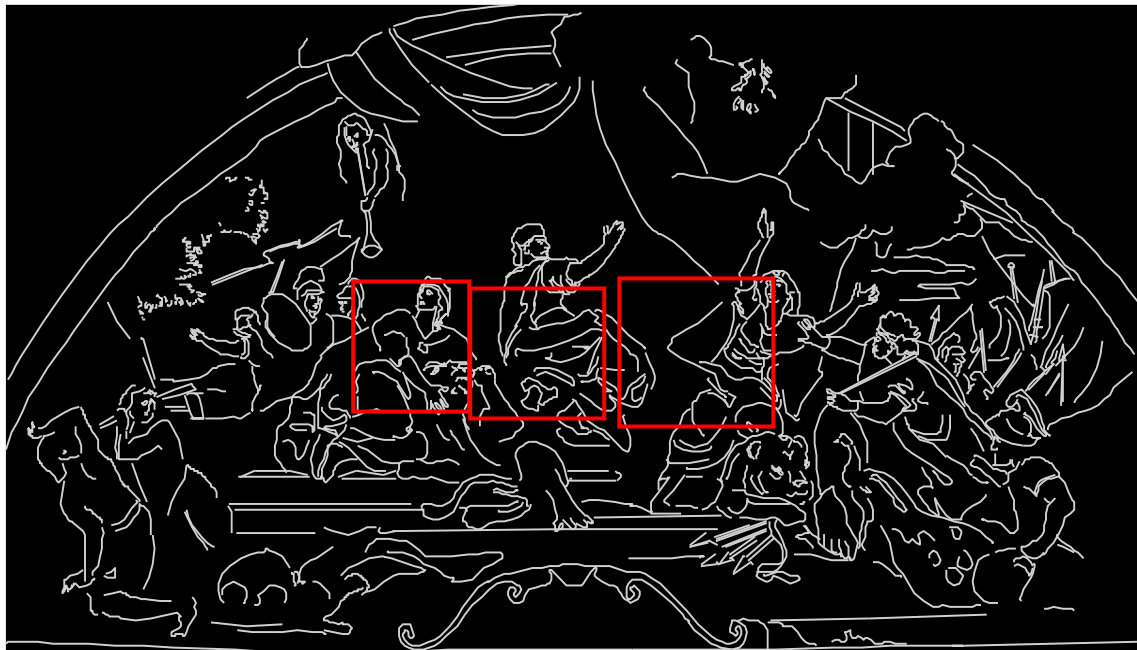


Fig.18 : Thermogrammes de trois fissures fermées du tympan sud.



Fig.18 : Thermogrammes de trois fissures fermées du tympan sud.

« Mesures des Espagnols rompues par la prise de Gand » 1678, fig.19.

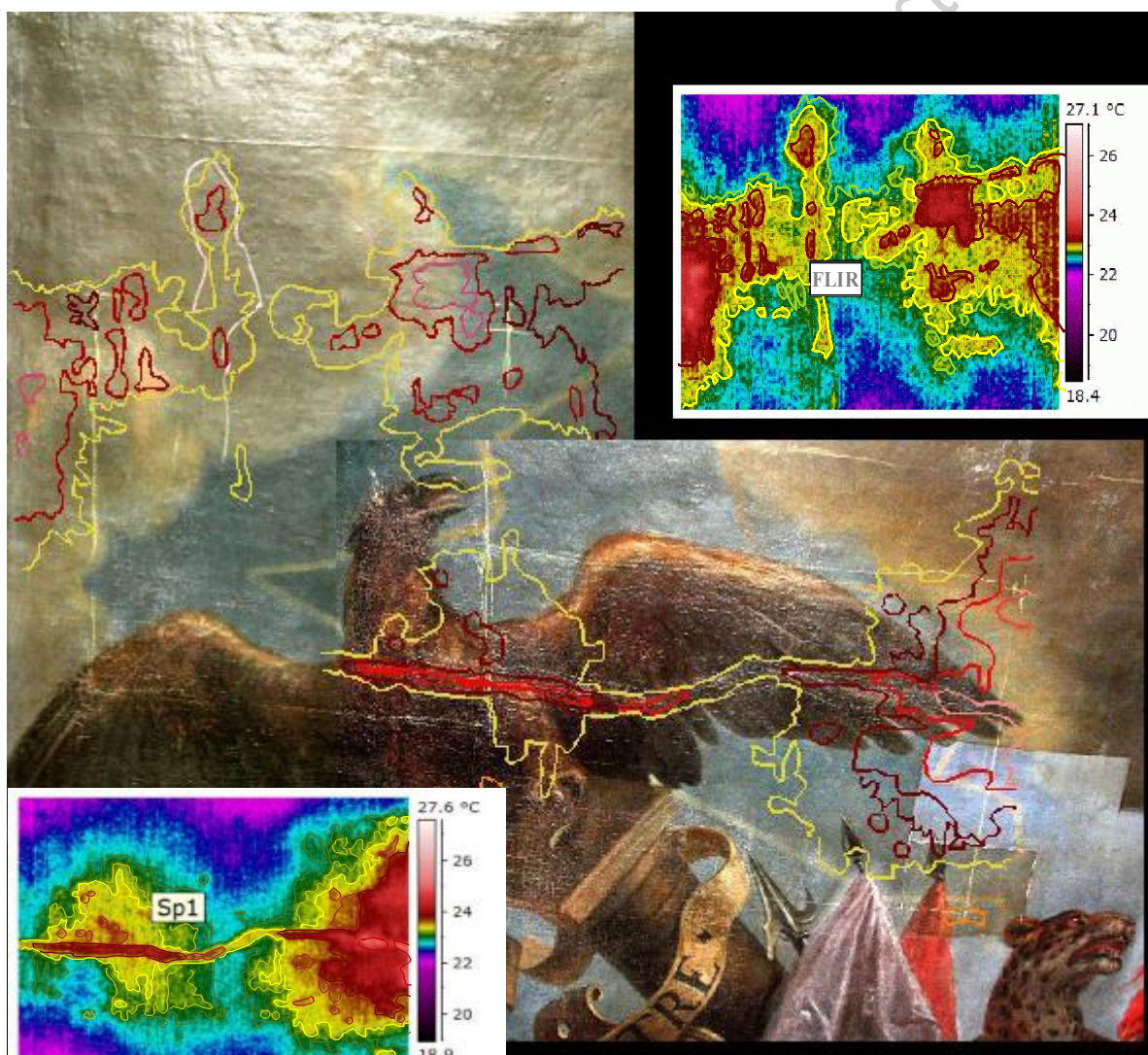


Fig.19 Thermogrammes d'un réseau de fissures fermées

Étude statique des fissures.

Localisation et morphologie des deux fissures instrumentées sur les tympans.

La présence de fissures est le témoignage d'une certaine instabilité du bâtiment actuelle ou passée. Pour établir l'état de stabilité nous avons instrumenté les fissures actives les plus représentatives. Le choix s'est porté sur deux fissures situées respectivement sur l'entablement des tympans nord (fissure 1) et sud (fissure 2), fig.20.

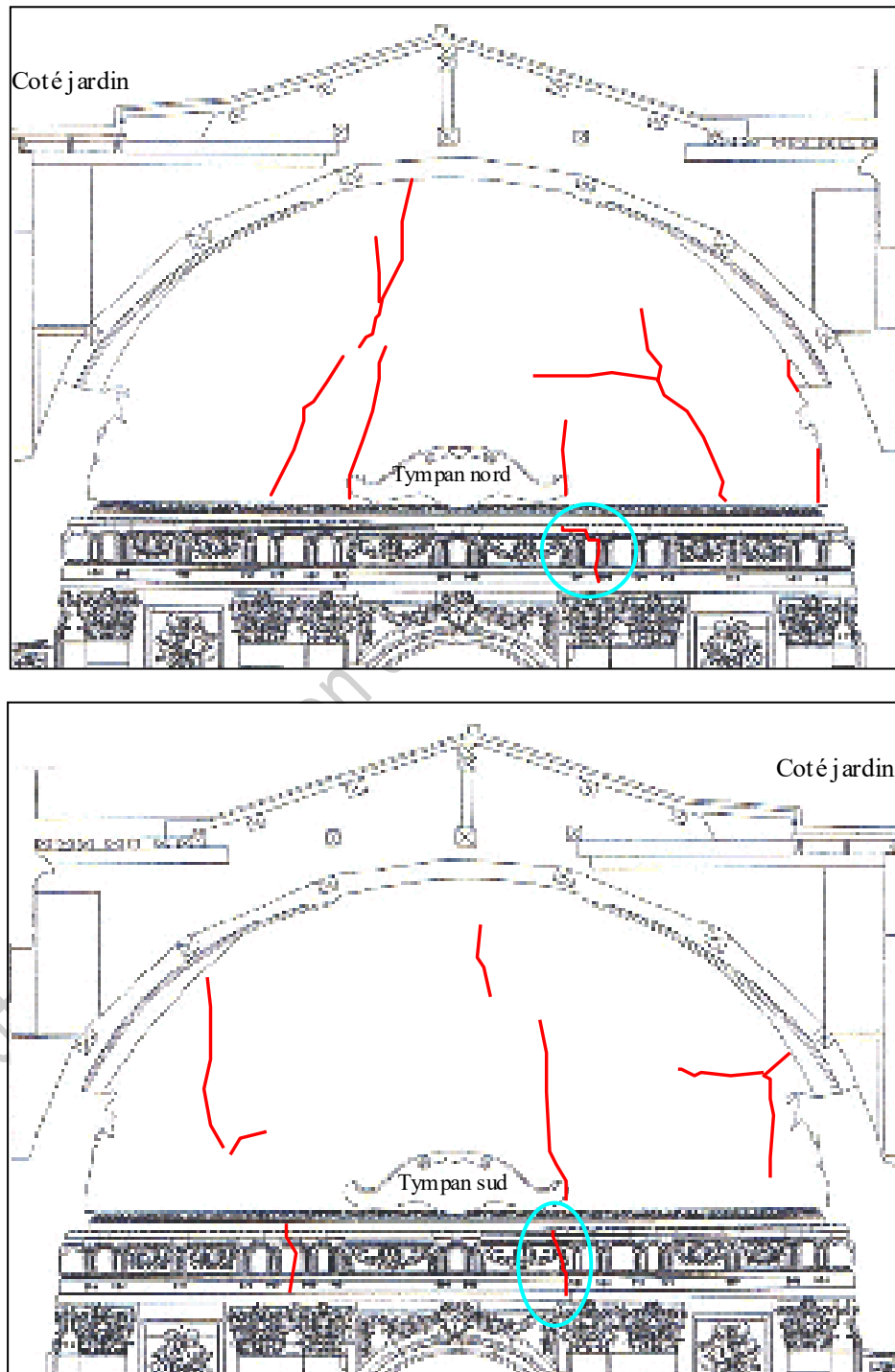


Fig.20 : Localisation des fissures

Ces deux fissures sont actives et représentatives. Elles ne sont pas directement placées sur un décor.

La fissure 1 est large, traversante. Elle part du haut du tympan nord au niveau de la peinture et elle descend jusqu'au niveau des chapiteaux en plomb doré. Cette fissure n'est pas rectiligne, elle suit un tracé successivement vertical et horizontal. La largeur de cette fissure est irrégulière, mais au point de mesure elle est d'environ 5 mm, fig.21. On remarquera qu'une partie de la fissure s'est fragmentée. Les parois de la fissure sont parfois en désaffleure. Elle longe le relief d'un élément décoratif comme pour le contourner.

La fissure 2, traverse toute la hauteur du tympan sud pour finir au niveau d'un chapiteau en plomb doré. Elle est irrégulière, sinueuse, de largeur variant constamment. La fissure se dirige vers le bas, mais elle est déviée à chaque différence de niveau. Cette fissure présente la particularité d'avoir des parois en désaffleure et de s'affaisser, fig 22. Au point de mesure l'écartement horizontal est de 2mm, vertical de 5mm et le désaffleure de 7 mm.

Fig.21 : Fissure 1 : tympan nord.

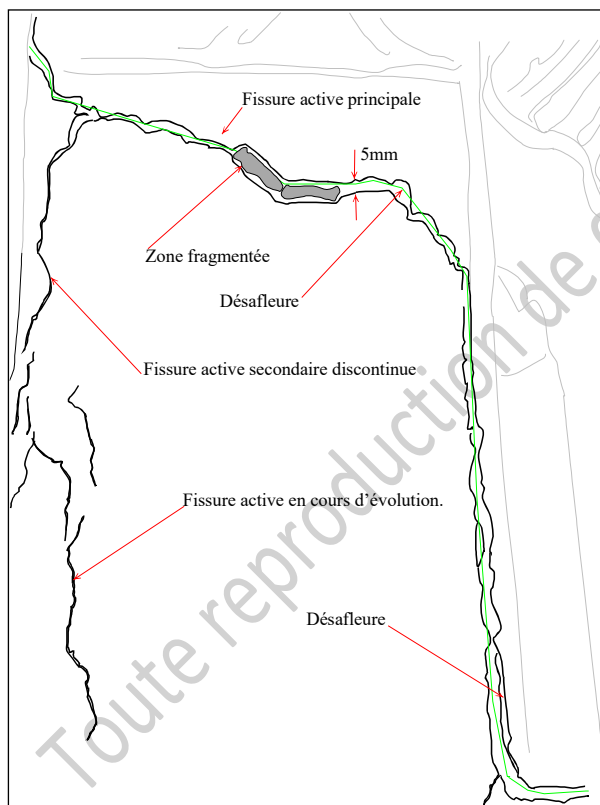
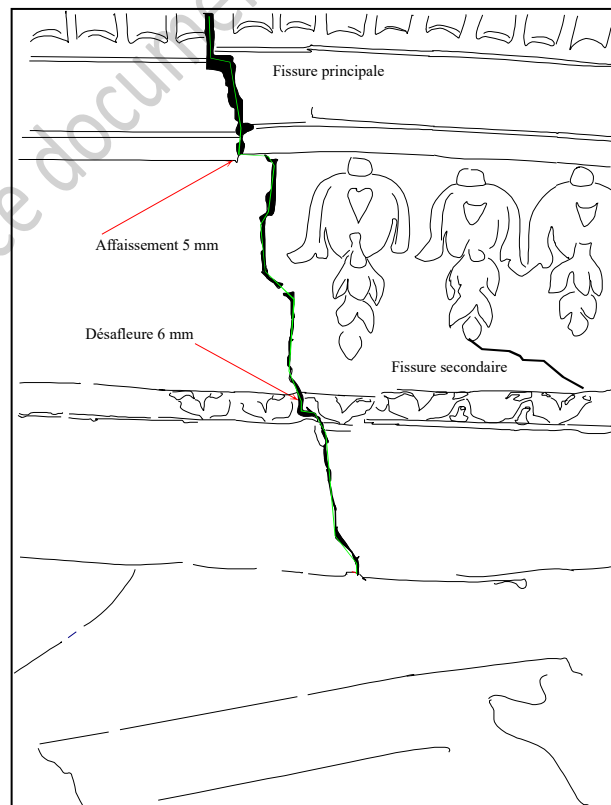


Fig.22 : Fissure 2 : tympan sud.



Ces deux fissures ont des morphologies très différentes



Instrumentation des fissures

Nous avons installé des palpeurs numériques SOLARTRON DP 5/5 et DP 10/5. Le contrôle environnemental des fissures est assuré par des capteurs de température sèche et d'humidité relative TESTO (Testotor 175-2,). L'ensemble des palpeurs et des capteurs est piloté par un ordinateur.

Les palpeurs numériques DP 5/5 et 10/5 sont déportés et reliés à leur interface par un câble de 2 m. Peu encombrant chaque palpeur peut être placé dans des endroits difficiles d'accès. Les interfaces sont reliées entre elles par un système de connexion T CON et par un module PSIM qui alimente en série ($5 \pm 0,25$ Vdc) les différents palpeurs. La résolution de ces palpeurs est $0,305 \mu\text{m}$ pour le DP 5/5 et $0,610 \mu\text{m}$ pour le DP10/5. Le réseau est ensuite connecté à un PC qui par l'intermédiaire d'un logiciel ORBIT EXEL enregistre les données. Par mesure de sécurité l'informatique est placée dans une mallette fermée qui protège le matériel.

Tympan nord.

Le capteur de déplacement a été monté sur la fissure 1. Il est fixé au mur par un système solidaire qui permet après le positionnement de le bloquer, fig.23. La pointe du palpeur s'appuie sur une butée qui est vissée dans le mur de l'autre côté de la fissure.



Fig.23 : Capteur instrumentant la fissure



Fig. 24 : Dispositif informatique d'enregistrement des données

Le palpeur ne peut qu'enregistrer les mouvements de la paroi dans son plan et dans une seule direction. Les seules informations que l'on aura se limiteront à l'écartement ou le resserrement de la fissure perpendiculairement au capteur. L'ordinateur installé près de la fissure enregistre toutes les heures un pas de mesure, fig.24.

Analyse des résultats

Tympan nord : Le déplacement dans le plan est mesuré selon un axe. La valeur de départ est calée sur zéro et ensuite les valeurs négatives correspondent à un écartement et les

valeurs positives à un resserrement de la fissure. Un enregistrement est fait toutes les heures, fig. 25. Le dispositif de mesure a été mis en service du 10 février jusqu'au 25 juillet 2005. La durée des mesures s'étend sur 166 jours répartis sur 40 jours d'hivers, 82 jours de printemps et 34 jours d'été.

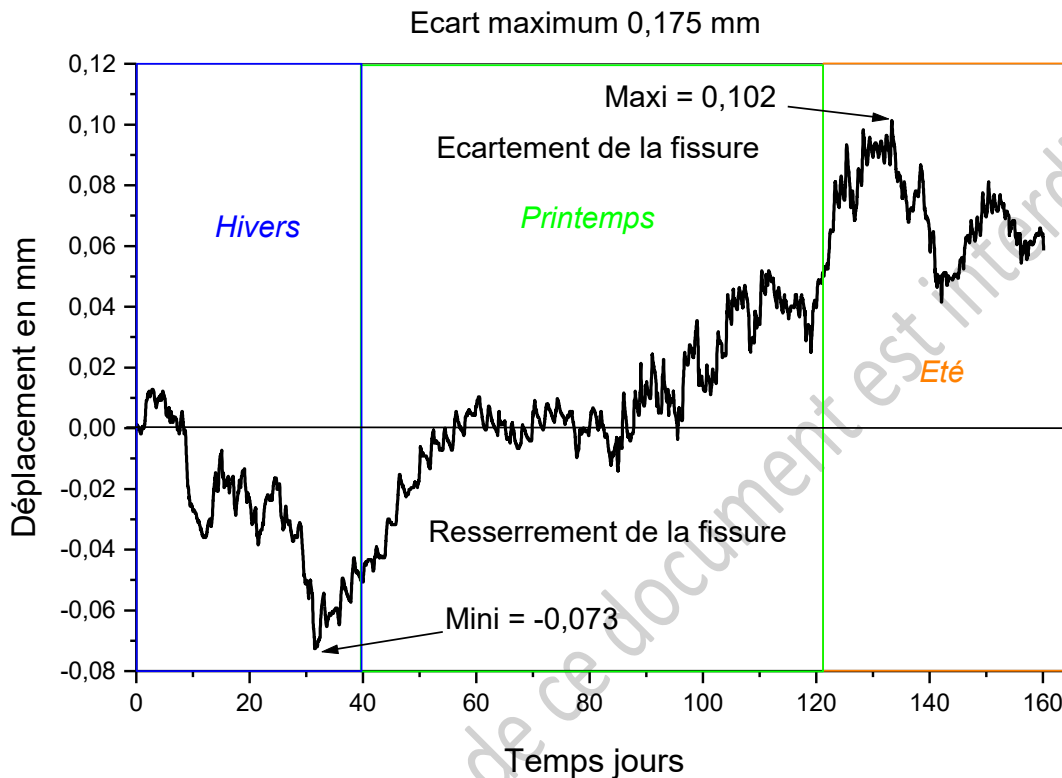


Fig.25 : Enregistrement des déplacements de la fissure

La fissure se resserre pendant les 30 premiers jours de mesures de la période hivernale d'environ soit 1,46% $[(0,073/5)*100]$ par rapport à la largeur de la fissure. Ce resserrement est très faible et ne peut pas entraîner de compression des lèvres de la fissure. Ensuite les lèvres de la fissure s'écartent pour revenir le 54^{ième} jour (début de la période printanière) au zéro du départ. Pendant 33 jours les valeurs oscillent autour du zéro avec une amplitude ne dépassant pas 0,44%. Après ce palier l'écartement de la fissure continue de s'écarter pour atteindre un maximum de 2,04% de la largeur de la fissure le 133^{ième} jour. Ensuite pendant la période estivale nous avons un resserrement de la fissure suivi d'un écartement de moindre amplitude.

Les mouvements enregistrés sont verticaux, ils se transmettent tout le long de la fissure, fig.26. Ce que nous considérons comme des mouvements de traction sur les parties horizontales se transforment en cisaillement dans les parties verticales de la fissure

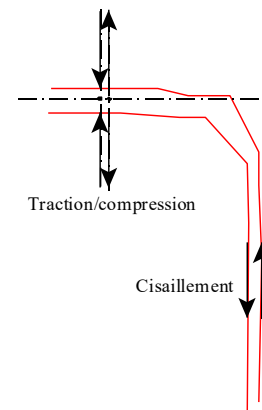


Fig.26 : Schéma du déplacement de la fissure

Tympan sud.

La fissure de ce tympan est plus complexe. Elle est en désaffleure ce qui témoigne d'un mouvement hors du plan. Elle est équipée de 3 capteurs de déplacement qui s'appuient sur une même butée métallique présentant trois facettes de référence. Les palpeurs sont positionnés selon trois axes orthogonaux X, Y, Z. Le capteur 1 est maintenu sur le mur par des pattes de fixation. Les capteurs 2 et 3 sont montés sur un support métallique parallèle et distant d'environ 2 cm de la fissure. Le support est constitué d'un tube creux en acier inoxydable d'un Ø de 6 mm, scellé à la base de la fissure. Les capteurs sont maintenus par deux noix de serrage, fig.27.



Fig.27 : Montage des capteurs

Ce dispositif a été mis en service le 31 mai jusqu'au 13 décembre 2006, soit 137 jours et a permis de suivre les mouvements de la paroi au point de mesure dans les trois dimensions. Un capteur d'humidité et de température est placé à proximité de la fissure, fig.28. L'ensemble des palpeurs est relié à un ordinateur situé en contre bas, fig.29.

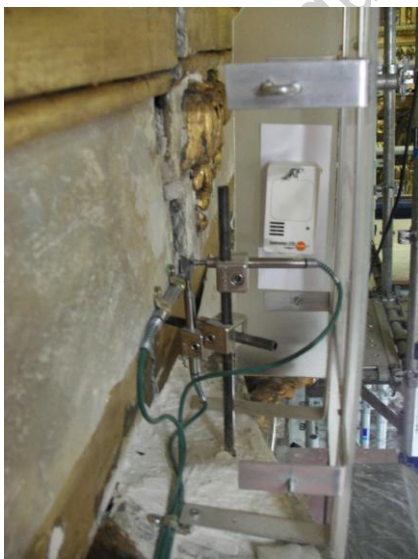


Fig.28 ; Capteurs de déplacement et d'humidité.

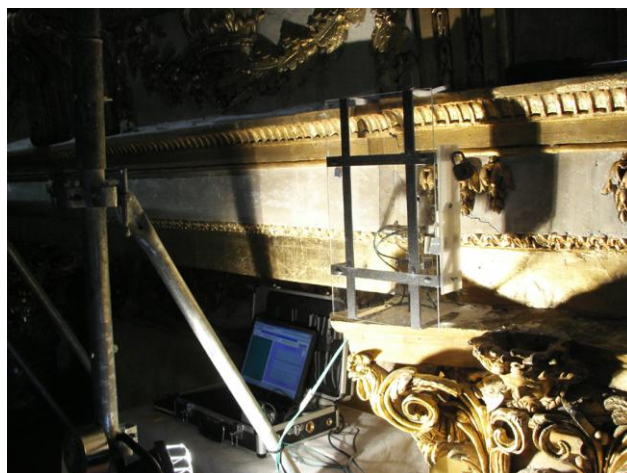


Fig.29 : Dispositif informatique de pilotage des capteurs



Analyse des résultats :

Capteur 1 : mesure des mouvements horizontaux X, fig.30.

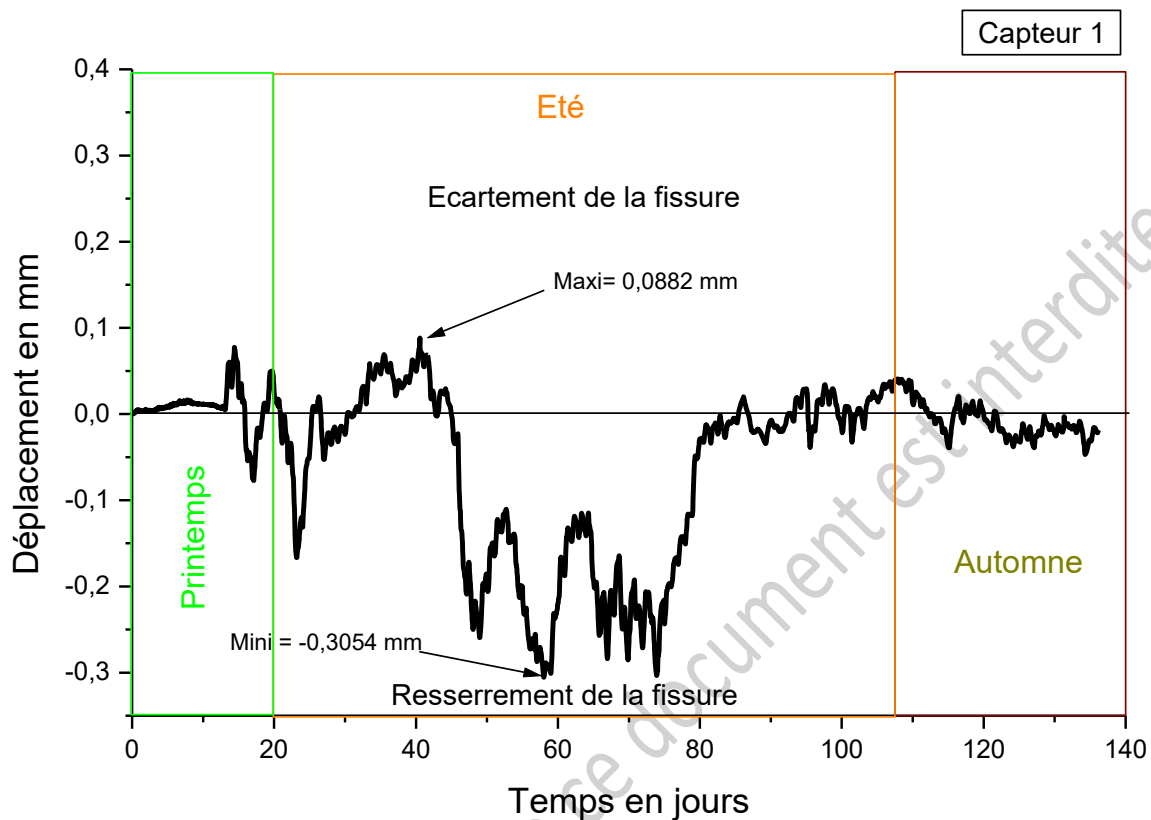


Fig.30 : Enregistrement des déplacements de la fissure capteur 1

Les déplacements horizontaux de la fissure sont caractérisés par un certain nombre de mouvements brusques de resserrement ou d'écartement de la fissure.

Un premier mouvement de resserrement se situe entre les 20 et 23^{ème} jours. Son amplitude est de 10,83% par rapport à la largeur de la fissure. Ce mouvement est suivi d'un écartement de la fissure progressif qui atteint la valeur maximale de 0,0882 mm au 41^{ème} jour.

Un deuxième mouvement de resserrement de la fissure se manifeste entre les 41 et 49^{ème} jours avec une amplitude de 17,38%.

Un troisième mouvement enchaîne un resserrement et un écartement avec une amplitude d'environ 9,5%, passant par le minimum et situé entre les 53 et 63^{ème} jours.

Enfin le quatrième grand mouvement d'écartement situé entre les 73 et 86^{ème} a une amplitude de 16,17%.

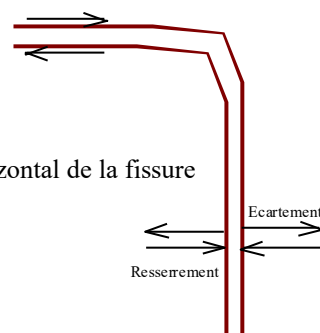


Fig.31 : Schéma du déplacement horizontal de la fissure



Capteur 2 : mesure des mouvements verticaux Y, fig.32

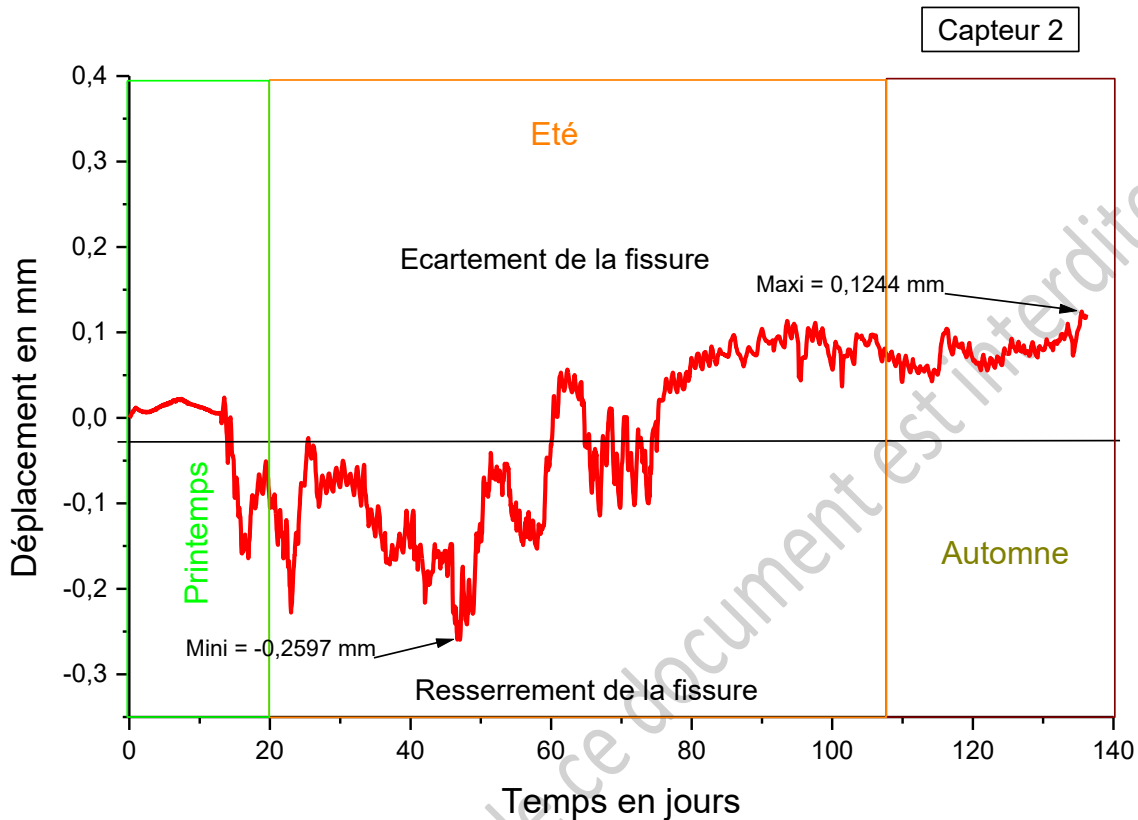


Fig.32 : Enregistrement des déplacements de la fissure capteur 2

Les déplacements verticaux de la fissure sont caractérisés par un certain nombre de mouvements brusques de resserrement ou d'écartement de la fissure.

Entre les 13 et 25^{ième} jours la fissure se trouve ébranlée par une série de mouvements de resserrement et d'écartement variant de 2,25% à 4,08% par rapport à sa largeur. Ces mouvements se produisent au passage du printemps et de l'été.

La fissure se resserre progressivement pour atteindre un minimum de 0,2597 mm au 47^{ième} jour. Ensuite elle s'écarte de nouveau par sauts d'environ 4% entre les 47 et 51^{ième} jours et entre 57 et 61^{ième} jours.

Après un certain nombre d'oscillations autour du zéro, les déplacements se stabilisent autour de 0,1mm, pour atteindre un maximum à 0,1244 mm.

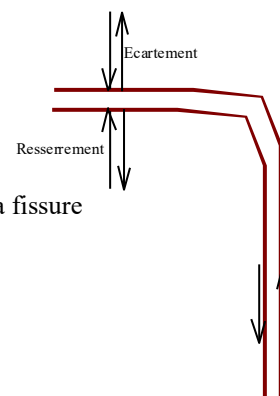


Fig.33 : Schéma du déplacement vertical de la fissure



Capteur 3 : mesure des mouvements hors du plan Z

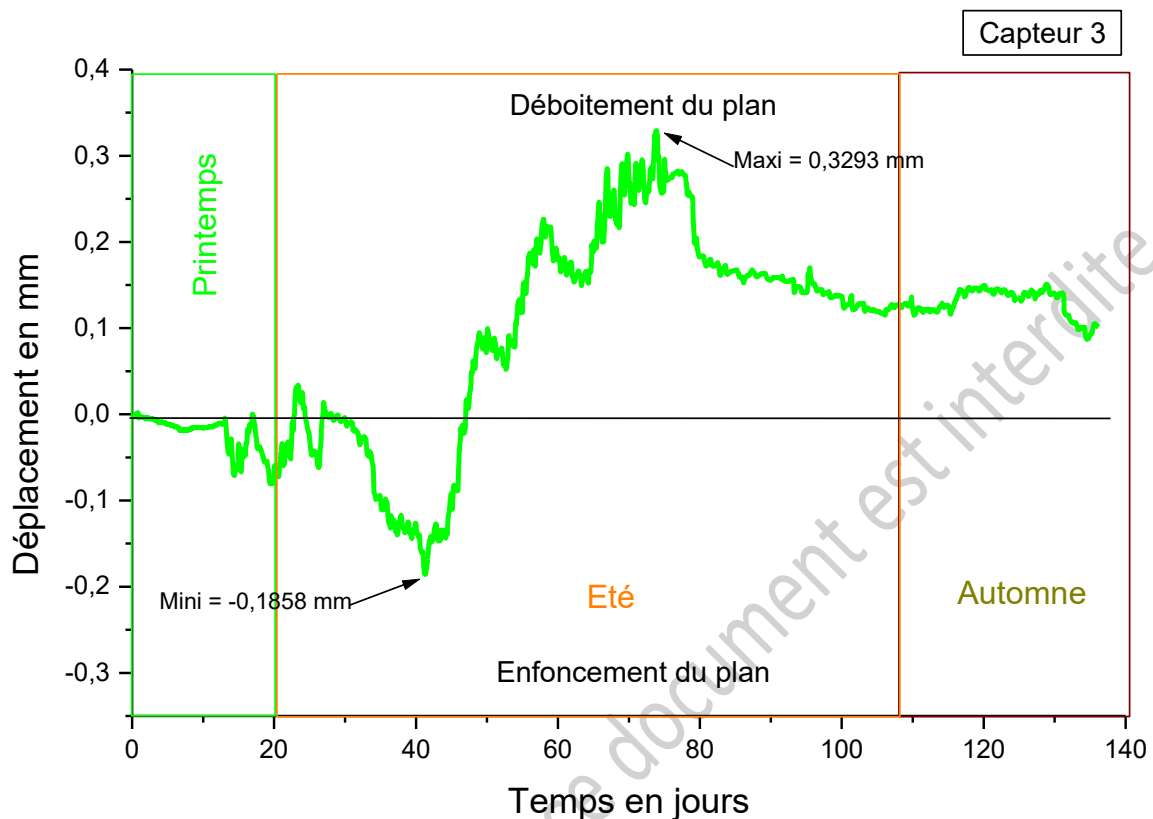


Fig.34 : Enregistrement des déplacements de la fissure capteur 2

Les déplacements hors du plan de la fissure sont caractérisés par un certain nombre de soubresauts plus ou moins importants.

Le premier déplacement important correspond à un enfoncement et se situe entre les 27 et 41^{ème} jours pour atteindre un minimum à -0,1858 mm. Son amplitude est de 2,78% par rapport au désaffleure.

Pendant la période estivale le déboîtement des plans se fait par étapes successives, du 41 au 50^{ème} jour avec une amplitude 4,07%, du 52 au 58^{ème} avec une amplitude de 2,51% et enfin du 64 au 74^{ème} jour avec au maximum (0,3293 mm) une amplitude de 2,53%.

Après un léger enfoncement du plan suivi d'un palier nous conduit à la fin des 137 jours de mesures.

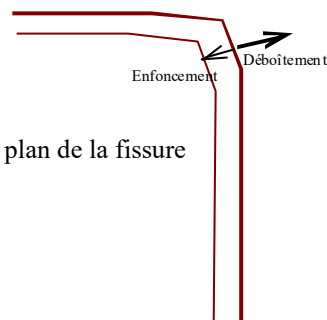


Fig.35 : Schéma du déplacement hors du plan de la fissure



Études et analyse du climat de la Galerie des Glaces.

Généralités.

L'étude climatologique menée par LARCROA dans le cadre de l'étude de la fissure correspond à la même période que l'étude menée par In Extenso. – (du 20-05-03- au 21-10-03 pour In Extenso et du 31-05-06 au 31-12-06 par LARCROA).

La position des capteurs l'un au niveau de la fissure du tympan sud, l'autre au niveau de la corniche se situe à la même hauteur, dans des zones différentes, fig.36.

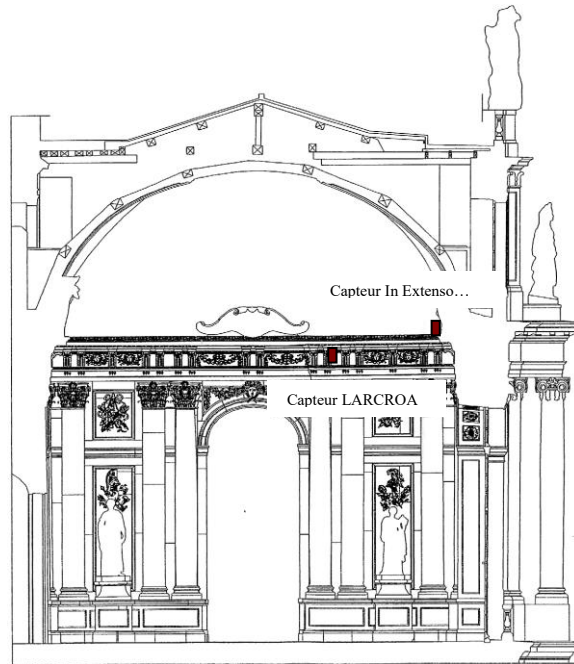


Fig.36 : Position des capteurs In extenso et LARCROA

Climat 2003 –In Extenso.....fig.37.

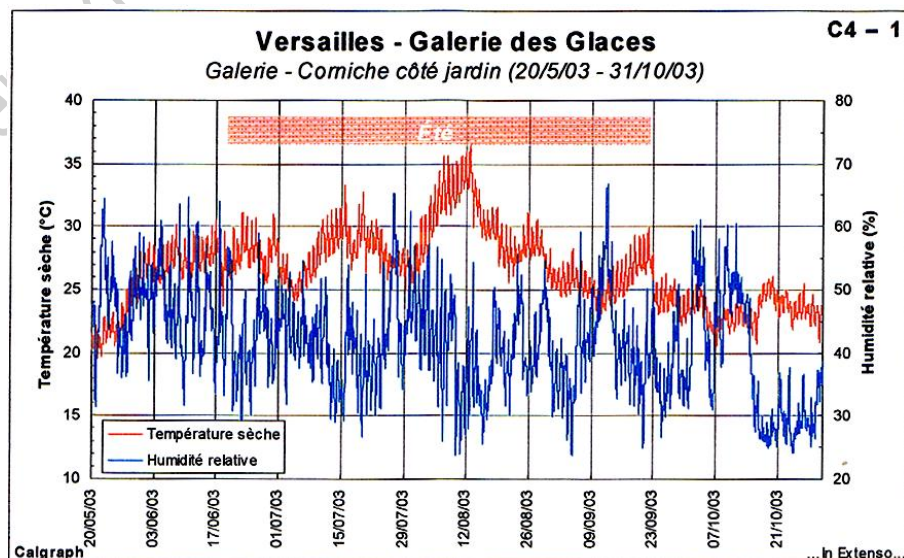


Fig. 37 : Courbes humidité et température.

Le Micro climat autour de la fissure 2006- LARCROA, fig.37.

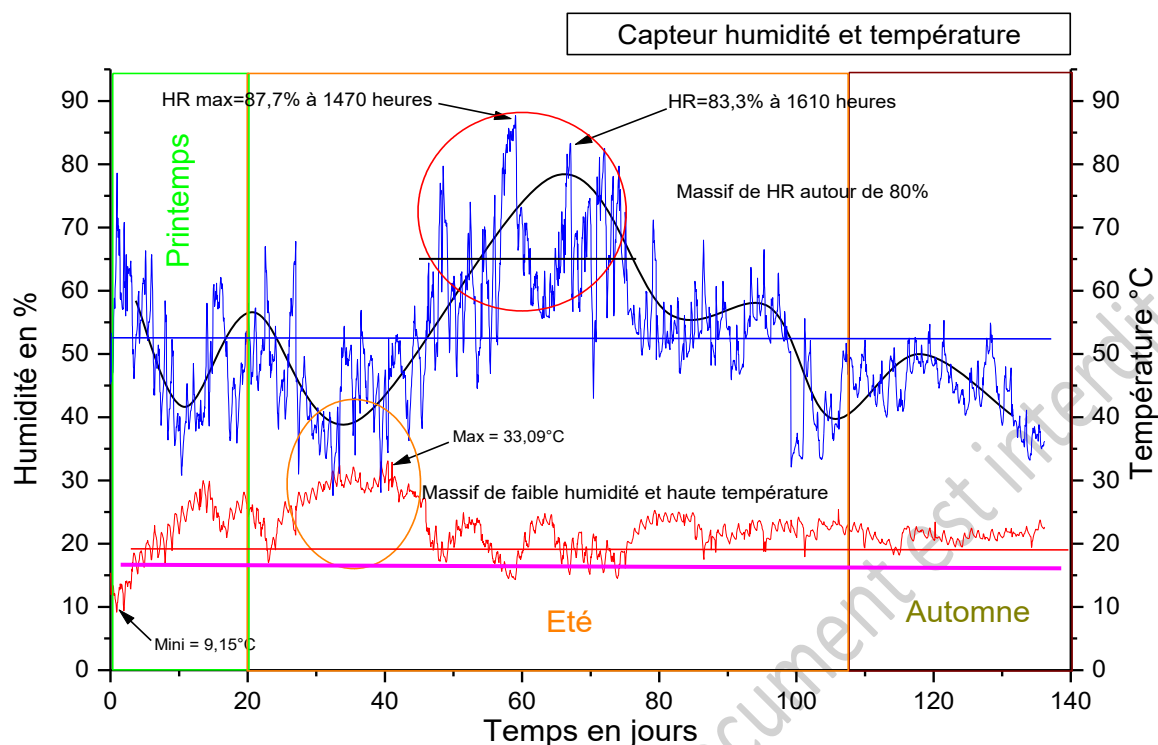


Fig.37 : Courbes humidité et température

Les profils climatiques se distinguent par des valeurs statistiques différentes : tableau 1

	In extenso C4 2003	LARCROA 2006 (chantier)
Humidité relative	%	%
Mini	23,7	27,6
Maxi	66 ,8	87,7
Moyenne	41,5	51,4
Ecart type	7,9	10,7
Maxi-Mini	43,1	60,1
Température sèche	°C	°C
Mini	19,5	9,2
Maxi	36,5	33,1
Moyenne	26,6	22,4
Ecart type	3,1	3,8
Maxi-Mini	17,0	23,9

Sur cette période de mesures, on peut conclure :

Climat + humide en 2006

Variations d'HR plus fortes en 2006

Températures + élevées en 2003

Variations de température + importantes en 2006.

Globalement le climat en 2006 a été plus rigoureux dans les zones où sont placés les capteurs c'est-à-dire sommet de la voûte et tympan.



Singularités du microclimat autour de la fissure :

Humidité :

- Les écarts quotidiens d'humidité ont de fortes amplitudes pendant les 80 premiers jours et s'atténuent les derniers mois. Les amplitudes peuvent varier de $\pm 15\%$ autour d'une valeur moyenne qui se situe vers 35% au minimum et 75% au maximum.

- Les enregistrements hydriques passent par des massifs de faible humidité autour de 35% entre les 30 et 40^{ième} jours et de fortes humidités autour de 80% entre les 55 et 80^{ième} jours.

- Les valeurs extrêmes sont : Max = 87,7% et Mini = 27,6 %

Température :

- Les écarts de température quotidiens sont de l'ordre de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ autour d'une valeur moyenne qui varie. La température minimum se situe au début de l'étude avec $9,15^{\circ}\text{C}$ et la température maximum est atteinte le 40^{ième} jour avec $33,09^{\circ}\text{C}$. Entre le 65 et 75^{ième} jours la température oscille autour de $18,5 \pm 3,5^{\circ}\text{C}$. La variation maximale enregistrée est de $23,9^{\circ}\text{C}$.

Une thermographie de la fissure faite le 25 avril 2006 nous permet de voir qu'un flux thermique la traverse, fig.38. Il est caractérisé par une variation de température. Ce décor est appliqué sur un conduit de cheminée qui pourrait être responsable de l'élévation de la température au niveau de l'intérieur de la fissure.

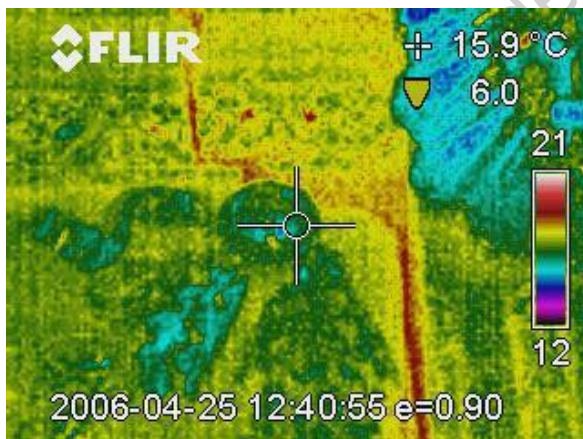


Fig.38 : Thermogramme de la fissure avec ses points chaud en rouge

Incidence du climat sur la stabilité de la fissure

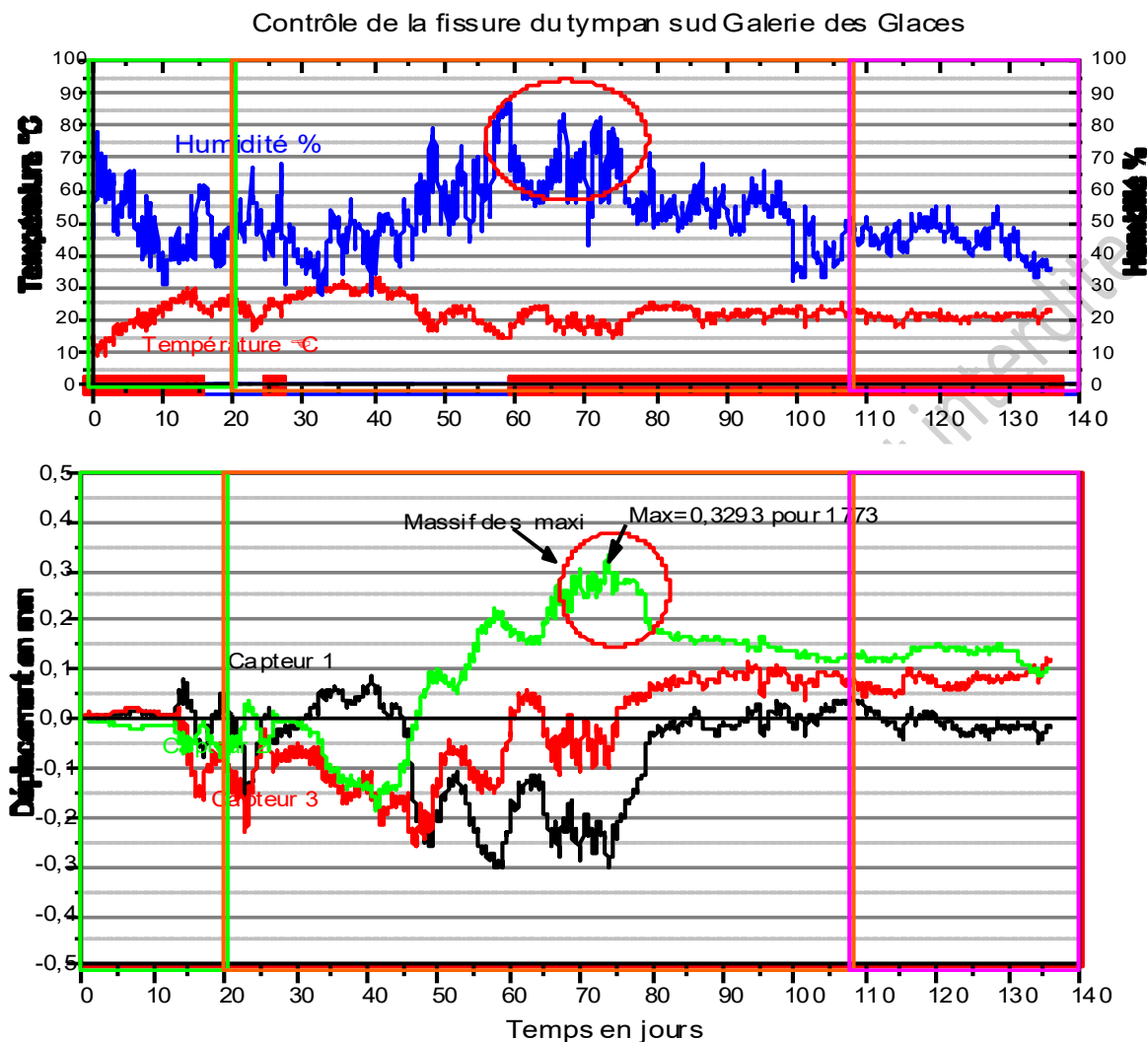


Fig.39 : Perturbations climatiques et incidence sur les écartements de la fissure

Les mouvements de la fissure du tympan sud enregistrés par les 3 capteurs de déplacements sont les plus importants entre les 60 et 80^{ième} jours en plein cœur de l'été. Cette période coïncide avec l'intervalle où les écarts d'humidité sont les plus grands et où la moyenne de 65% HR est la plus élevée, fig. 39. La correspondance de cette singularité climatique avec le comportement de la fissure pourrait nous inciter à penser qu'il existe une réelle relation entre le climat et l'équilibre structurel de la voûte. La présence d'une grande quantité de bois –Fermes- cerces, lattis....peut justifier la sensibilité de la voûte aux variations de l'humidité et de la chaleur. A priori la réactivité de la structure se manifeste au-dessus d'une humidité moyenne de 65% et une température moyenne de 19,5°C. La fissure du tympan nord présente également les mouvements les plus importants en été 2005 bien que nous n'ayons pas d'information sur les valeurs d'humidité et de température.



Analyse de l'enchaînement des mouvements

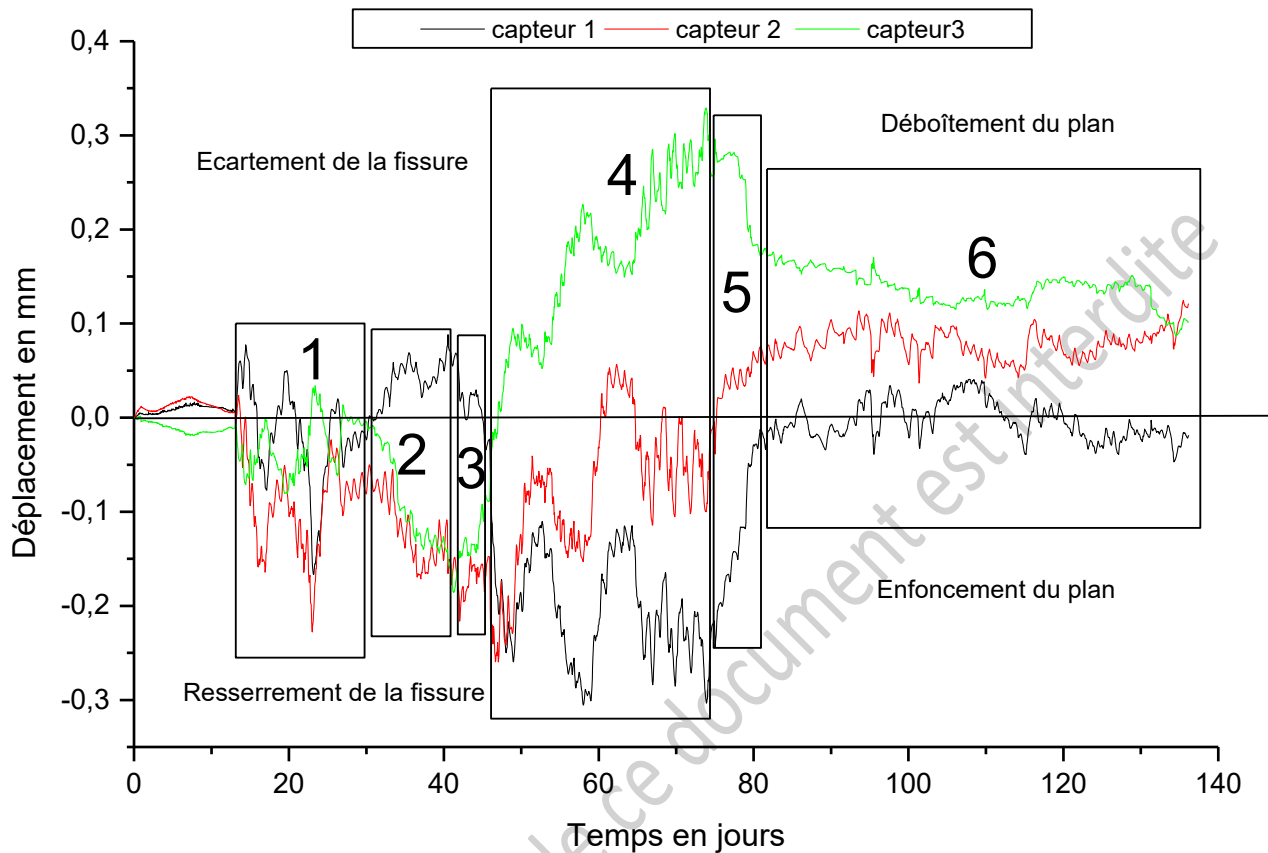


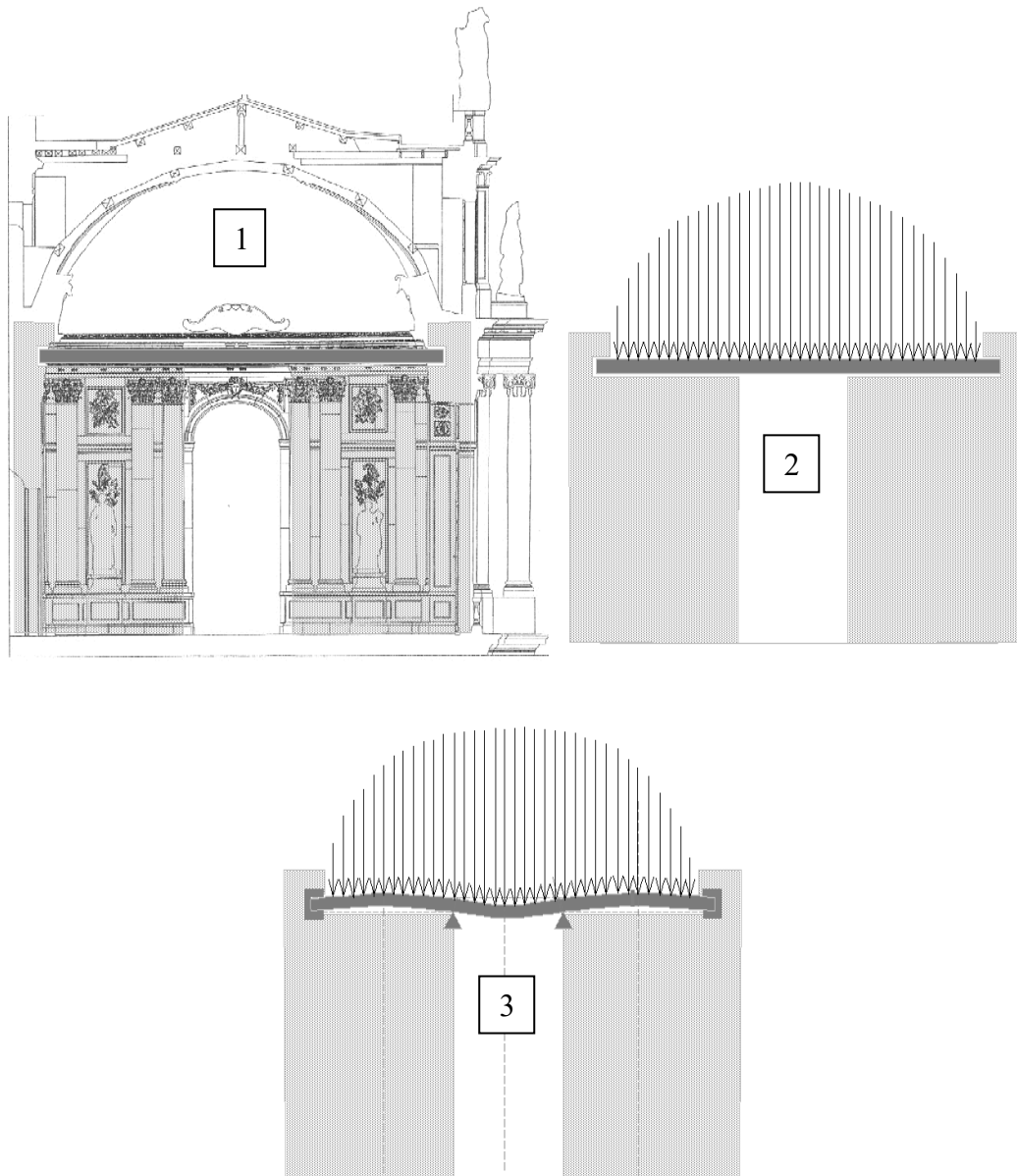
Fig.39 : Décomposition des mouvements de la fissure.

Les mouvements de la fissure se divisent en 5 étapes, fig.39 regroupées dans le tableau 2

Étape 1	Mouvements cycliques d'amplitude moyenne sans tendance particulière
Étape 2	- Écartement de la fissure selon la verticale. Capt. 1 - Resserrement de la fissure l'horizontale. Capt 2 - Enfoncement des plans. Capt 3.
Étape 3	- Resserrement de la fissure selon la verticale. Capt. 1 - Écartement de la fissure selon l'horizontale. Capt.2 - Déboîtement des plans. Capt. 3
Étape 4	- Resserrement et écartement de la fissure selon la verticale et l'horizontale. Capt.1,2. - Déboîtement du plan avec ressauts - Les mouvements de resserrement impriment un déboîtement dans le plan.
Étape 5	- Écartement de la fissure selon l'horizontale et la verticale. Capt.1, 2 - Enfoncement des plans. Capt.3. - Les mouvements d'écartement impriment un enfoncement dans le plan.
Étape 6	- Mouvements en phase de faible amplitude sans tendance particulière.

Interprétation des résultats.

Les entablements sont adossés aux poutres qui s'appuient sur les cloisons de maçonnerie qui séparent la Galerie des Salons. Les tympans qui ferment la voûte sont eux-mêmes des murs de maçonnerie qui reposent sur ces poutres (1).



Déformée de la poutre due à la masse de la maçonnerie

Fig. 40 : Représentation de la déformée de la poutre portante.

Pour aborder ce problème nous allons considérer le cas du système hyperstatique, d'une poutre encastree et reposant en partie sur les murs par l'intermédiaire de deux appuis écartés d'environ 3 m (2). Cette poutre est sollicitée par une masse linéique qui correspond à la masse de la maçonnerie du tympan. Sa forme demi-circulaire est responsable d'efforts plus

importants dans l'axe central et qui vont en diminuant aux extrémités. La poutre se déforme donc selon la déformée suivante, fig.41, avec une flèche¹ maximum au milieu de celle-ci.

Le décor de l'entablement en stuc et en plâtre, plaqué sur la poutre, n'ayant pas la même flexibilité que le bois, se rompt et sous l'effet des déformations. Il existe deux fissures qui se situent très exactement aux deux points d'appui de la poutre.

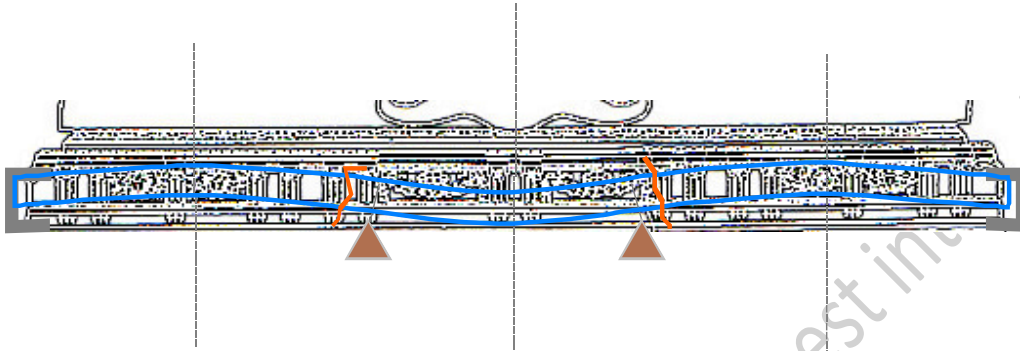


Fig.41 : Déformée de la poutre et emplacement des zones de fissuration.

Nous avons pu constater une incidence du climat sur l'activité de la fissure instrumentée. Nous pouvons donc expliciter ce phénomène de la manière suivante. La fissure devient très active quand l'humidité est supérieure à 65% HR, ce qui correspond à une importante diminution du module d'élasticité du bois. La flèche étant inversement proportionnelle à ce module, lorsque sa valeur diminue durant une élévation de l'humidité, la flèche va augmenter et la flexion s'accroître, provoquant ainsi l'ouverture ou le resserrement de la fissure au grés des fluctuations de l'humidité. Cette activité est donc liée directement aux propriétés hygroscopiques du bois et notamment à la variation de son module en fonction de l'humidité.

Ces mouvements s'accompagnent également de mouvements de désaffleure des plans.

Les écarts maximums que nous avons pu enregistrés sur ces fissures sont de l'ordre de $\pm 0,25$ mm pour le tympan sud et de $\pm 0,090$ mm pour le tympan nord. Ils sont relativement importants par rapport aux largeurs initiales des fissures et en termes de résistance mécanique puisque leur valeur devrait être nulle.

Les écartements des fissures à la fin de chaque campagne de mesures sont de l'ordre du 10^{ième} de mm. Les mouvements de flexion provoqués par l'hygrométrie ne semblent pas complètement réversibles. Ce qui se traduit par un mouvement d'affaissement de la poutre de faible amplitude, mais persistant et évolutif.

¹ Expression de la flèche : $f = \frac{q \cdot l^4}{K \cdot E \cdot j}$

q : Charge linéique.

l : longueur de la poutre entre appuis.

K : Coefficient dépendant de la forme de la poutre et de la charge

E module d'élasticité du bois

j : moment d'inertie de la poutre



Conclusion.

L'évaluation de l'état de conservation structurel des décors monumentaux est souvent sujette à une approximation. La méthode du sondage acoustique qui a servi à l'élaboration de l'étude préalable nous a donné une idée de l'état de conservation de la voûte avec une marge d'erreur qui est liée à la méthode elle-même. L'application de la thermographie dans le cadre de la Galerie a permis de préciser l'état de fissuration de l'enduit sous les peintures et l'ampleur du décollement de la toile de l'enduit. Cette méthode d'inspection nous a certes apporté de nouveaux éléments sur l'état structurel de la voûte, mais elle nous a aussi aidés à prendre des décisions sur les produits à utiliser et les traitements à appliquer.

La campagne de mesures menée sur les tympans de la voûte de la Galerie des Glaces nous a permis de mettre en évidence la sensibilité de cette voûte aux variations thermiques et hydriques et d'en évaluer l'amplitude. Ces sollicitations constantes et permanentes participent aux problèmes évolutifs tels que l'affaissement des poutres, très évident dans les salons d'Apollon, de Mercure et de Mars du château de Versailles. À l'occasion de travaux menés dans les combles de la Galerie - consolidation et renfort du lattis- nous avons pu remarquer que certaines parties des poutres ont souffert de l'humidité et ont fait l'objet d'attaques xylophages et microbiologiques, fig.42.



Fig.42 : Bois vermoulu de certaines poutres de la voûte.

Une inspection plus poussée de l'extrados pourrait être utile pour identifier les points faibles de la voûte - étanchéité de la toiture, surcharges ponctuelles provoquées par des remaniements du bâtiment, état sanitaire de la charpente. La thermographie pourrait être utilisée pour ce genre de contrôle.



Bibliographie.

Ouvrages généraux

J. Gosse « Guide technique de thermique » Dunod Paris 1981

D. Marchio, P. Reboux « Introduction aux transferts thermiques » Ecoles des mines de Paris Paris 2003

G. Asch & coll. « Les capteurs en instrumentation industrielle » Dunod Paris 1991.

G. Pissarenko, A. Yakovliev, V. Matvéev « Aide mémoire de résistance des matériaux » Edition de Moscou 1985.

Publications et présentations.

G. Szatanik, M Gerard, J.L. Bodnard, M. Stefanaggi, V. Detalle, F. Pierron et A. Brandt Grau. « Examen d'oeuvres d'art par radiométrie photothermique » -Méthodes et techniques optiques pour l'industrie- 5^{1e} colloque, Saint Etienne 2004.

G.Schirripa Spagnolo, G.Guattari, E.Grinzato, P.G. Bison, D.Paoletti, D.Ambrosini " Frescoes diagnostics by electro-optic holography and infrared thermography" -6th World Conference on NDT and Microanalysis in Diagnostics and Conservation of Cultural and

P. Diaz. Pedregal « Le comportement dynamique du bâtiment et ses effet sur les collection » Techné N°11, 2000.

P. Diaz Pedregal « Étude climatologique de la Galerie des Glaces » Rapport 2 Septembre 2002.

D. Erhard, M. Mecklenburg « Relative humidity reexamined » Preventive Conservation Practice Theory and Research. Preprint of the contribution to the Ottawa Congress Septembre 1994.

S. Michalski. "Relative humidity: A discussion of correct/incorrect values" Preprint of ICOM Committee for Conservation 10 th Triennial Meeting 1993.

M. Mecklenburg, C Tumosa, A. Pride "The Effects of the environment on the structural behavior of cultural material" Janvier 2004.