

# Document original

## Domaine National de Versailles Château – Grands Appartements

### FISSURES DES SALONS DE MERCURE ET DE MARS

#### *Analyse des résultats de l'instrumentation*

Toute reproduction du document est interdite



RAPPORT FINAL

Titulaire Alain ROCHE pour LARCROA MARCHÉ N° 2009-PA-DP-ST-2-043	Château de Versailles – Grands Appartements – <i>Rapport sur l'instrumentation des fissures</i>	Pierre DIAZ PEDREGAL pour ...IN EXTE...SO...
------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------

## Introduction.

La présence de fissures dans le décor de stuc du salon de Mercure et de Mars témoigne d'une instabilité actuelle ou passée du bâtiment. Des déplacements ou des modifications d'éléments de construction, des mouvements ou des aménagements au sol, peuvent avoir perturbé la répartition des charges et provoqué des zones de concentrations de contraintes susceptibles d'entraîner la fissuration des matériaux.

Une campagne de mesures sur les mouvements des fissures, associée à un contrôle d'humidité et de température, sur deux périodes respectivement de 6 mois et de 3 mois, a permis de vérifier l'amplitude des mouvements et d'en explorer les causalités sous-jacentes.

## Problématique

### RAPPEL DU CAHIER DES CHARGES DE L'ETUDE :

« Les salons de Mercure et de Mars du grand Appartement du château de Versailles présentent des fissures et des affaissements relativement importants localisés à l'articulation des murs de refend et des murs de façades ainsi qu'au droit des portes d'enfilade. Le processus de fissuration s'est accéléré de manière inquiétante depuis plusieurs années sans qu'aucune cause extérieure n'ait été identifiée avec précision. »

### DESORDRES STRUCTURAUX DU SALON DE MERCURE :

#### ▪ **Mur est :**

La corniche présente un cintrage dans le plan du mur et une déformation hors de son plan. La flèche n'est pas très accentuée mais suffisante pour être visible (Figure 1).



Figure 1 : Cintrage et déformation de la corniche

#### ▪ **Angle nord est :**

Dans cet angle des désordres importants se sont concentrés. Ils regroupent une série de fissures plus ou moins importantes reliées entre elles et formant des îlots.

Titulaire Alain ROCHE pour LARCROA MARCHÉ N° 2009-PA-DP-ST-2-043	Château de Versailles – Grands Appartements – <i>Rapport sur l'instrumentation des fissures</i>	Pierre DIAZ PEDREGAL pour ...IN EXTE...NO...
------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------



Figure 2 : Fissures au niveau de la corniche angle nordest.

Ces désordres anciens ont suscité des inquiétudes en 1996. Deux témoins de plâtre ont été alors placés à cheval sur les fissures les plus importantes, Figure 3.



Figure 3 : Témoins de plâtre.

▪ **Mur ouest :**

Au niveau du linteau de la porte qui conduit du salon de Mercure au salon de d'Apollon une longue fissure verticale traverse la corniche accompagnée de plusieurs fissures plus fines, Figure 4.



Figure 4 : Fissure transversale de la corniche.

Titulaire Alain ROCHE pour LARCROA MARCHÉ N° 2009-PA-DP-ST-2-043	Château de Versailles – Grands Appartements – <i>Rapport sur l'instrumentation des fissures</i>	Pierre DIAZ PEDREGAL pour ...IN EXTE...SO...
------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------

## DESORDRES STRUCTURAUX DU SALON DE MARS :

### ▪ **Mur ouest :**

Deux fissures, l'une située au regard du linteau de la porte et l'autre dans l'angle nord ouest, Figure 5.



Figure 5 : Angle nord-ouest du salon de Mars.

## HYPOTHESES SUR L'ORIGINE DES DESORDRES :

- Le mur de refend de la galerie inférieure sur lequel repose le mur *est* des appartements est moins épais que les autres murs de refend de la galerie inférieure. Cette différence pourrait être responsable d'un affaissement et de la déformation du mur supérieur.
- Le mur de refend est de nature différente du mur de façade, (pierres de taille et moellons).
- Les effets de cisaillement dus aux mouvements de la maçonnerie porteuse peuvent être responsables des désaffleurements au niveau de la corniche et de la fissuration des enduits.
- Pour les autres fissures, la sécheresse qui intervient depuis plusieurs années pourrait être responsable de la diminution des nappes phréatiques induisant un affaissement des sols à l'origine des nouveaux désordres.

Des sondages dans les combles n'ont pas permis d'identifier les raisons du décollement de l'enduit décoré.

## Localisation des zones d'intervention

*Nom : Château de Versailles Grands appartements  
Localisation : Salon de Mercure, Salon de Mars, Figure 6.*

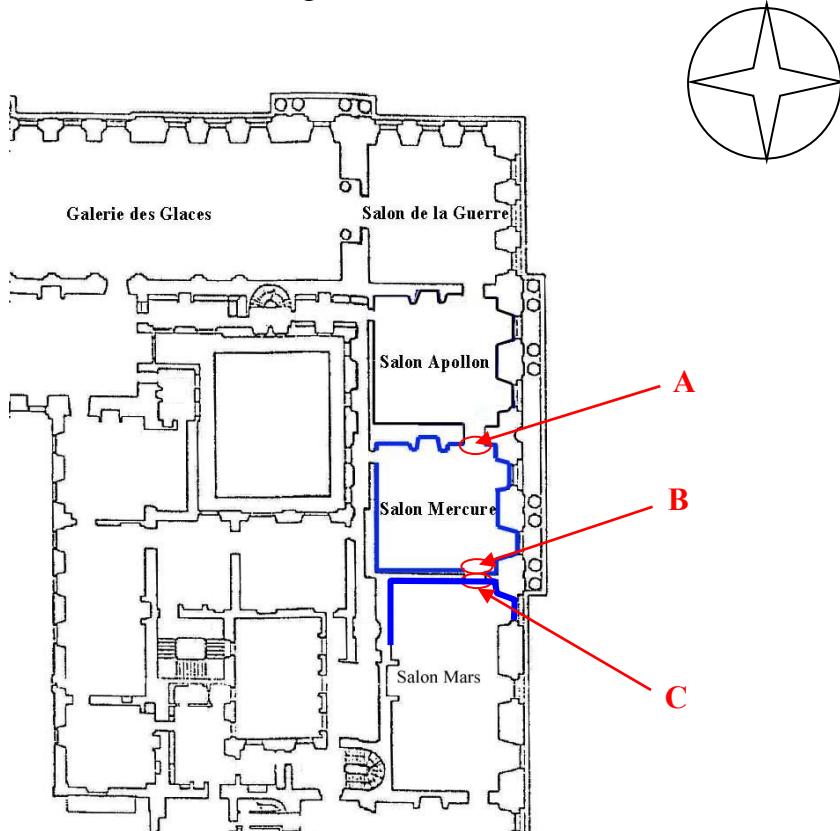


Figure 6 : Plan de l'aile nord du château

**A** : Fissures 1 et 2.

**B** : Fissure 3.

**C** : Fissures 4 et 5.

La localisation précise de l'instrumentation est indiquée sur la page suivante (**Figure 7**).

## Localisation des capteurs et enregistreurs

### Localisation de l'instrumentation

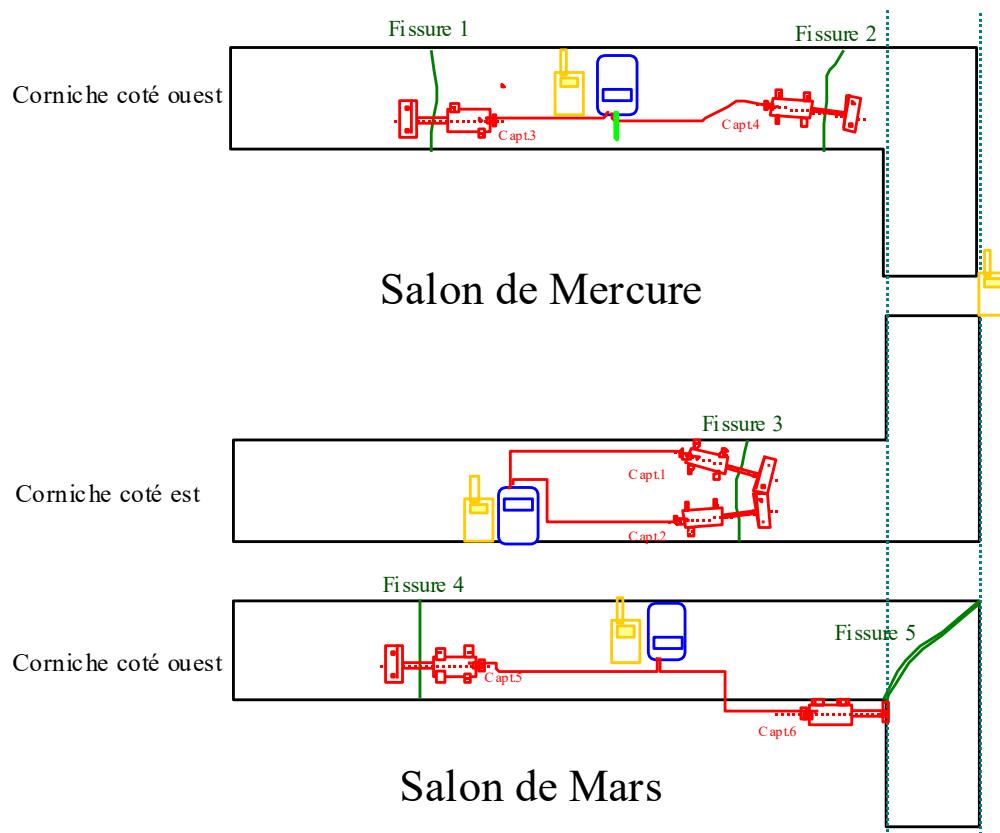


Figure 7 : Instrumentation des fissures.

## Instrumentation des fissures

Les systèmes de mesures sont composés d'un ou de deux capteurs de déplacement positionnés perpendiculairement aux fissures. Les capteurs potentiométriques (réf. Annexe, page 25) sont fixés sur une rive de la fissure et le curseur s'appuie sur une butée vissée sur l'autre rive. Ils sont reliés à une centrale d'acquisition chargée de les piloter et d'enregistrer les données. Chaque mouvement de la fissure est ainsi transmis au capteur via la butée. Au point de mesure, le curseur du capteur est parfaitement perpendiculaire à la fissure. Dans tous les cas, la valeur de départ est ramenée à zéro afin d'obtenir un point de référence. Les valeurs négatives correspondent à un écartement de la fissure inférieur à la référence de départ, les valeurs positives, corrélativement, à un écartement supérieur. Lorsque les valeurs mesurées ont tendance à décroître, cela traduit un resserrement de la fissure instrumentée. Inversement, une série de valeurs croissantes indiquent un élargissement.

Avec ce système nous n'enregistrons que des déplacements dans le plan de la fissure. Le pas d'échantillonnage a été fixé à quatre heures. Le système proposé à une autonomie de plus de 6 mois, grâce à la possibilité de mise en veille de la centrale d'acquisition entre chaque mesure et la possibilité de programmer le pas de mesure.

Des thermohygromètres enregistreurs TESTO 175 H1 et 177 H1 ont été placés à proximité des capteurs pour évaluer les variations climatiques dans leur environnement proche. Un enregistreur TESTO 177 H1 a été placé à l'extérieur. Le pas de temps de mesure a été fixé cette fois-ci à 15 mn afin d'obtenir une résolution temporelle suffisante pour la mesure de phénomènes physiques « rapides ». Les mesures ont été ensuite rapportées au pas de temps de quatre heures par réduction à la moyenne afin d'être cohérentes avec les mesures de déplacement.

### SALON DE MERCURE, CORNICHE OUEST : FISSURES 1, 2

Chacune de ces fissures est instrumentées par un capteur.

Figure 8. La campagne de mesure a débuté le 14 décembre 2009 et a pris fin le 29 mars 2010. Sa durée est de 3 mois et demi.



Figure 8: Fissures 1 et 2 instrumentées

## SALON DE MERCURE, CORNICHE EST : FISSURE 3

La fissure 3 a été choisie pour sa situation singulière sur la corniche fléchie. Elle a été instrumentée avec deux capteurs, Figure 9. La durée d'instrumentation a été de 6 mois du 20 avril 2009 au 26 octobre 2009.



Figure 9: Fissure 3 instrumentée.

La fissure 3 n'est pas rectiligne. Elle présente un angle de  $120^\circ$ . Sa configuration a rendu nécessaire l'utilisation de deux capteurs afin de mettre en évidence les déplacements perpendiculaires et tangentiels. Géométriquement la fissure se déplace obliquement selon la composante des deux déplacements et l'angle formé par la fissure, Figure 10.

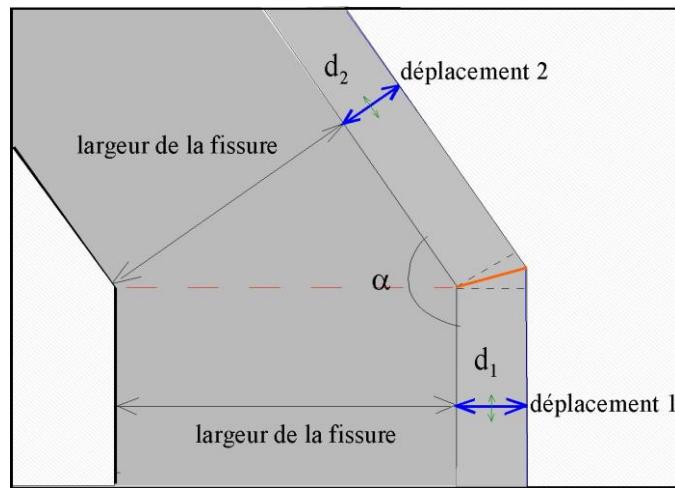


Figure 10.: Configuration des mesures.

## SALON DE MARS, CORNICHE OUEST : FISSURE 4, 5.

Les fissures 4 et 5 ont été instrumentées chacune par un capteur, Figure 11. La butée métallique de la fissure d'angle 5 a été fixée sur la corniche perpendiculaire permettant au curseur du capteur de s'y appuyer.

Titulaire Alain ROCHE pour LARCROA MARCHÉ N° 2009-PA-DP-ST-2-043	Château de Versailles – Grands Appartements – <i>Rapport sur l'instrumentation des fissures</i>	Pierre DIAZ PEDREGAL pour ...IN EXTE...SO...
------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------



Figure 11 : Fissures 4 et 5 instrumentées.

## PERIODE DE MESURES

Pour des raisons techniques, les fissures n'ont pas été instrumentées aux mêmes périodes. La Figure 12 illustre le planning d'instrumentation.

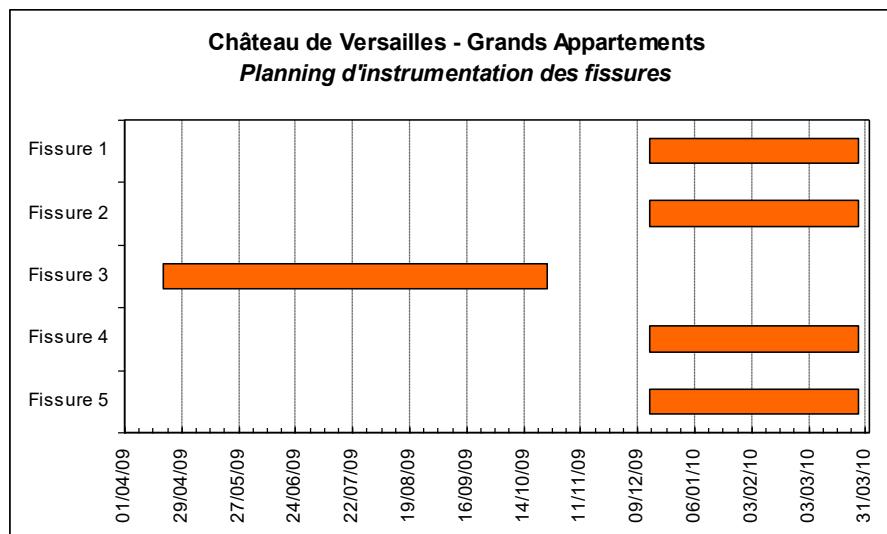


Figure 12 : Planning d'instrumentation des fissures.

On notera d'ores et déjà que bien que les périodes d'instrumentation diffèrent, les résultats obtenus (*cf. infra*) sont tout à fait comparables.

## Salon de Mercure : corniche ouest : fissures 1 et 2

### RELEVE DES TEMPERATURES ET HUMIDITES

L'étude du climat proche de la fissure est basée sur.

Titulaire Alain ROCHE pour LARCROA MARCHÉ N° 2009-PA-DP-ST-2-043	Château de Versailles – Grands Appartements – <i>Rapport sur l'instrumentation des fissures</i>	Pierre DIAZ PEDREGAL pour ...IN EXTE...SO...
------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------

- Les minima de températures et d'humidité.
- Les maxima de températures et d'humidité.
- Les variations quotidiennes des écarts d'humidité et températures.

### Températures, Figure 13.

Minima des températures : la température la plus basse enregistrée est de 16,6 °C. Elle apparaît le 1<sup>er</sup> janvier 2010.

Maxima des températures : la température la plus élevée est de 25,4 °C. Elle se produit le 25 mars 2010. Écart maximum :  $\Delta T = 8,8^\circ\text{C}$ . La température moyenne est de 22,04 °C.

Les écarts les plus importants se situent en janvier 2010 Ils s'étendent sur une durée de 15 à 20 heures et ils sont quotidiens. Un écart de 5°C s'est produit en moins de 12 heures entre le 7 et 8. Ces écarts sont sans aucun doute liés à la présence du public.

### Humidités relatives, Figure 13.

Pendant les mois d'enregistrement, l'humidité moyenne oscille entre 30,8% et 27,7%

L'humidité maximum est de 49,8% (fin décembre 2009) et minimum de 16,5% (début mars). Écart maximum :  $\Delta HR = 33,3\%$ . L'humidité relative moyenne est de 30,9 %.

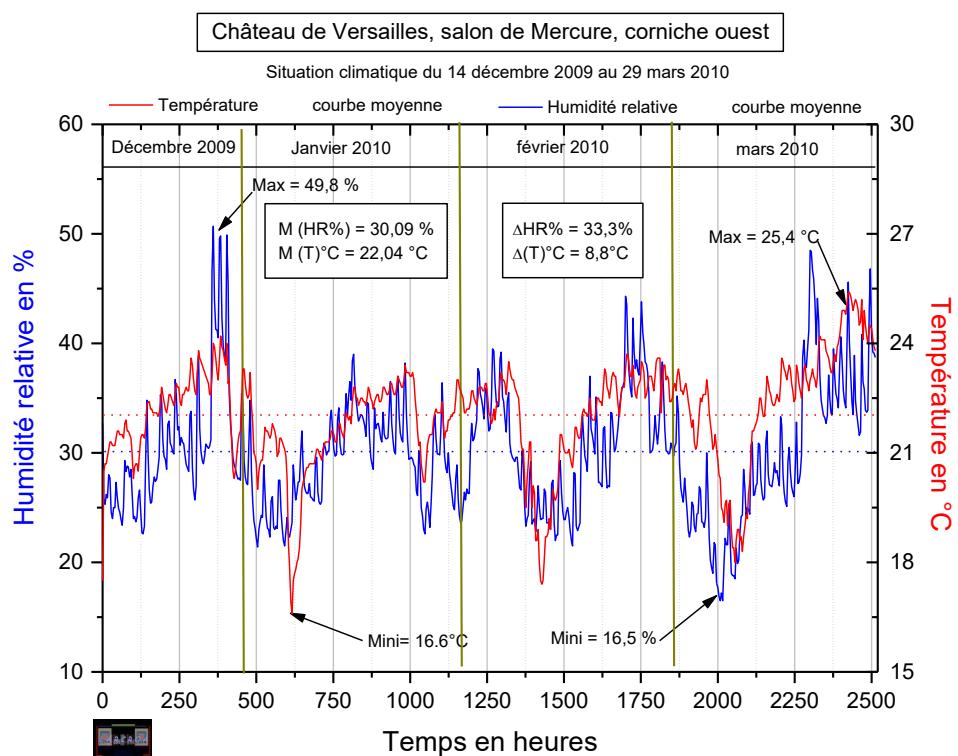


Figure 13 : Situation climatique de la zone proche des fissures 1 et 2

La variabilité de la température et de l'humidité est importante. Elle est liée à la présence du public et aux caractéristiques du bâtiment.

## ANALYSE DES MOUVEMENTS DE LA FISSURE

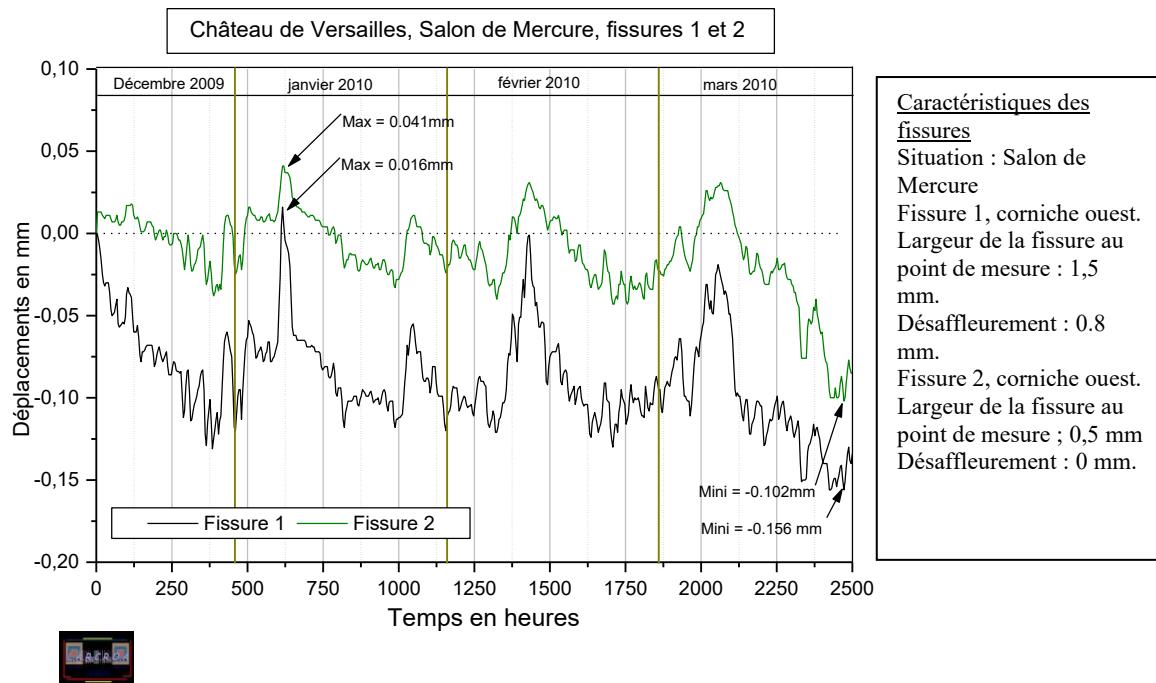


Figure 14 : Enregistrement des mouvements des fissures 1 et 2

## INTERPRETATION DES RESULTATS

Les fissures 1, 2 présentent deux types de variations. De petites variations s'exercent tout le long de la durée des mesures. L'écart moyen entre deux mesures est de l'ordre de 0.002 mm. Ce bruit de fond maximum ne peut s'expliquer que par la limite de résolution des capteurs qui est inhérente à leur fabrication.

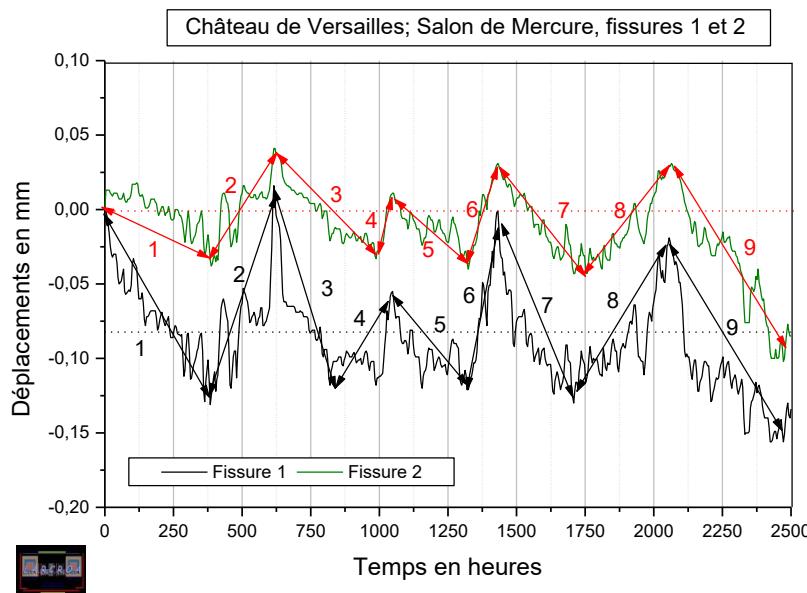


Figure 15 : Identification des mouvements des fissures durant la période d'enregistrement.

Titulaire Alain ROCHE pour LARCROA MARCHÉ N° 2009-PA-DP-ST-2-043	Château de Versailles – Grands Appartements – <i>Rapport sur l'instrumentation des fissures</i>	Pierre DIAZ PEDREGAL pour ...IN EXTE...SO...
------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------

En dehors de ce bruit de fond, pendant toute la durée des mesures on peut déterminer pour les deux fissures des séries de resserrements et écartements d'amplitudes variables bien supérieures au bruit de fond, **Figure 15**.

Ce sont ces séries de mouvements qui sont l'objet de l'analyse. Elles sont au nombre de 9. L'ensemble est regroupé dans le Tableau 1.

	1 resst	2 écart.	3 resst	4 écart.	5 resst	6 écart.	7 resst.	8 écart.	9 resst
Fissure 1	0.129 mm	0.145 mm	0.134 mm	0.06 mm	0.06 mm	0.118 mm	0.130 mm	0.111 mm	0.137 mm
Dépl.rela	8,6%	9,6%	8,9%	4%	4%	7,86%	8,6%	7,4%	9,13%
Fissure 2	0.038 mm	0.079 mm	0.072 mm	0.042 mm	0.051 mm	0.071 mm	0.072 mm	0.072 mm	0.133 mm
Dépl.rela	7,6%	15,9%	14,4%	8,4%	10,2%	14,4%	14,4%	14,4%	26,6%
Période	388 h	228 h	286 h	144 h	276 h	110 h	276 h	352 h	412 h

Tableau 1 : Mouvements des fissures 1 et 2

L'amplitude des séries permet de faire les remarques suivantes :

- En valeurs absolues, la fissure 1 a des mouvements plus importants que la fissure 2
- En valeurs relatives, la fissure 2 a des variations plus grandes.
- Les mouvements de la fissure 1 oscillent autour de -0.08 mm et ceux de la fissure 2 autour de 0.
- Ces amplitudes de déplacements s'étalent sur des durées allant de 110 heures à 412 heures. A priori il n'y a pas de corrélation entre la durée et les variations de largeur des fissures.

## RELATION ENTRE MOUVEMENTS DES FISSURES ET CLIMAT.

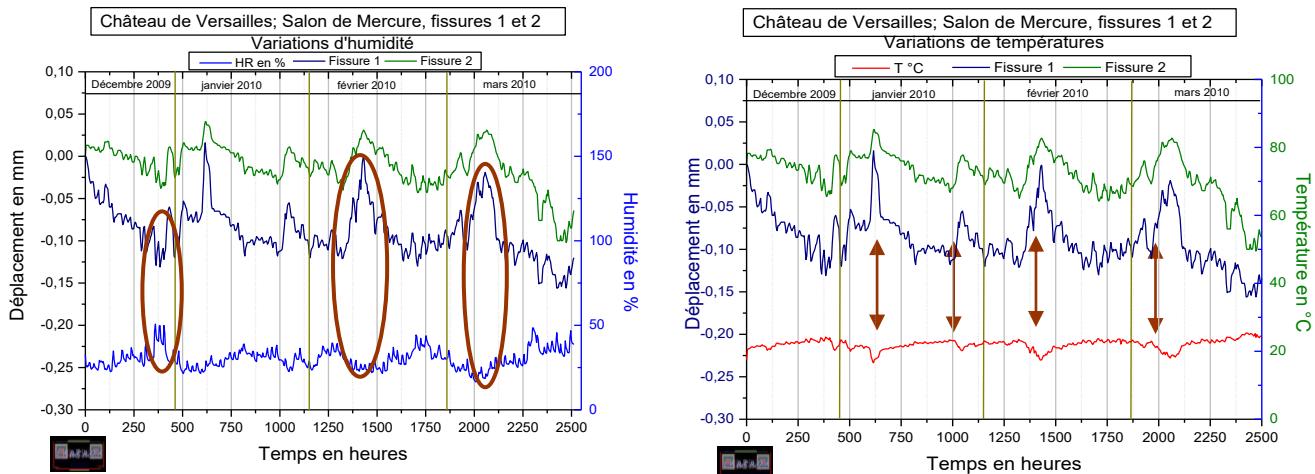


Figure 16 : Mouvements des fissures et humidité et température

L'observation de ces deux graphes, Figure 16, l'un représentant les mouvements des fissures par rapport à l'humidité et l'autre par rapport à la température, permet d'établir une première relation des effets hydriques et thermiques sur le comportement des fissures. Quand l'humidité augmente la fissure se referme et inversement. Ces phénomènes sont bien marqués à 384 h, 1440 h et 2008 h. Par ailleurs une chute de la température provoque des

élargissements brutaux des fissures comme en témoignent les phénomènes observés à 616 h, 1248 h, 1428 h et 2080 h. Par exemple pour une variation de température de 6°C et une humidité relative de 6,6% entre le 7 et le 11 mars 2010 la fissure s'est écartée de 0,121 mm.

Bien que les amplitudes soient fort différentes, pour chacune des fissures, une allure générale semblable montrant des alternances d'élargissement et de resserrement permet de supposer que des causes identiques expliquent ces évolutions a priori non aléatoires. La corrélation des mouvements des fissures aux paramètres physiques de l'environnement, humidité d'une part et température de l'autre, permet de mettre en évidence le facteur climatique le plus influent.

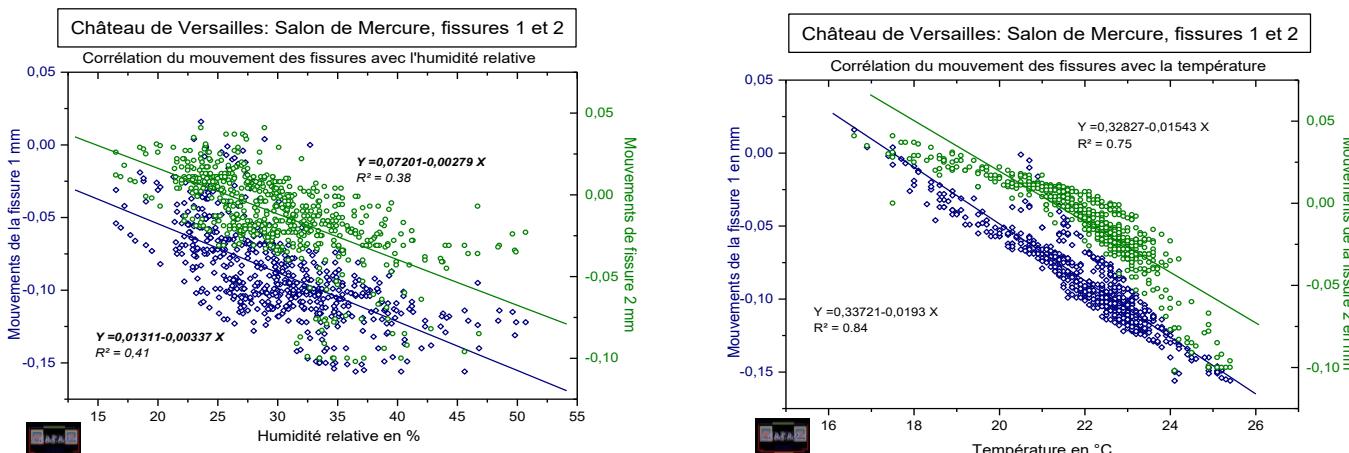


Figure 17: Corrélation mouvements des fissures et humidité relative et température.

À l'aide de la méthode des moindres carrés, nous avons déterminé les droites de régression linéaire représentée sur la Figure 17. La « qualité » de la régression peut être évaluée par un coefficient dit de détermination (noté  $r^2$ ). Ce coefficient est obtenu en faisant le rapport de la variance expliquée sur la variance totale des données. Lorsque la corrélation est parfaite,  $r^2$  vaut évidemment 1. Le Tableau 2 regroupe les résultats.

	F1 (HR)	F2 (HR)	F1 (T)	F2 (T)
$r^2$	0.41	0.38	0.84	0.75

Tableau 2 : Corrélation du mouvement des fissures 1 et 2 avec l'humidité et la température.

La corrélation entre les mouvements des fissures et l'humidité n'est pas particulièrement significative, elle se situe en dessous de 0,5. Par contre la corrélation est bien meilleure pour la température et il est possible d'affirmer que cette corrélation est significative et qu'elle n'est pas due au hasard. On peut donc conclure que c'est la température qui est le facteur climatique dominant dans les mouvements des fissures.

## Salon de Mercure : corniche est : fissure 3

### RELEVES DES TEMPERATURES ET HUMIDITES.

#### Températures, Figure 18.

Minima des températures inférieures de 22,5°C : la température la plus basse apparaît le 3 mai 2009 à 16 h 45 : (20,6°C).

Maxima des températures supérieures à 27,5°C : la température du 19 août 2009 est particulièrement chaude, elle est de 30,6°C. De juillet à août, toutes les températures sont supérieures à 25°C. Écart maximum :  $\Delta T = 10,8^\circ\text{C}$ . La température moyenne est de 25,18°C. La température varie de 25,18, l'écart type est de 2,04°C

#### Humidités relatives, Figure 18.

Pendant les mois d'enregistrement, l'humidité oscille entre 30% et 60%. Le 24 avril est le jour le plus sec de la période de mesures.

Les maxima des humidités relatives sont supérieurs à 60%. Le 24 octobre 09 l'humidité de 67,44% atteint son maximum. La valeur moyenne d'humidité est de 44,48% et l'écart type est de 7%.

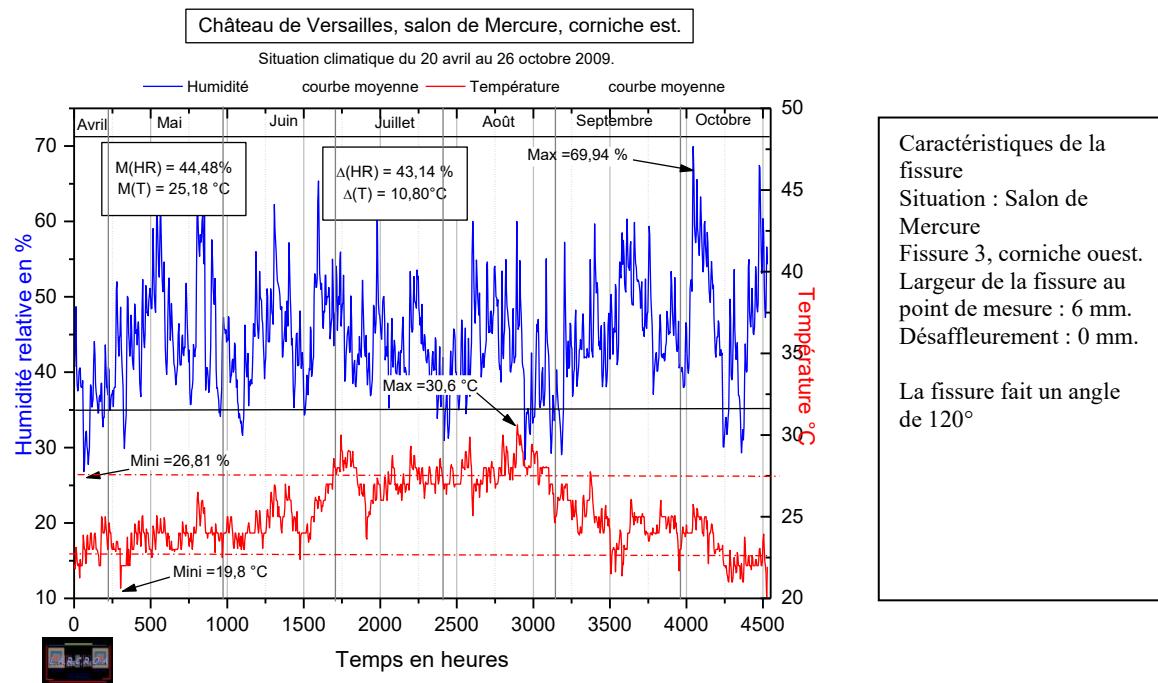


Figure 18: Situation climatique dans la zone proche de la fissure 3

## ANALYSE DES MOUVEMENTS DE LA FISSURE

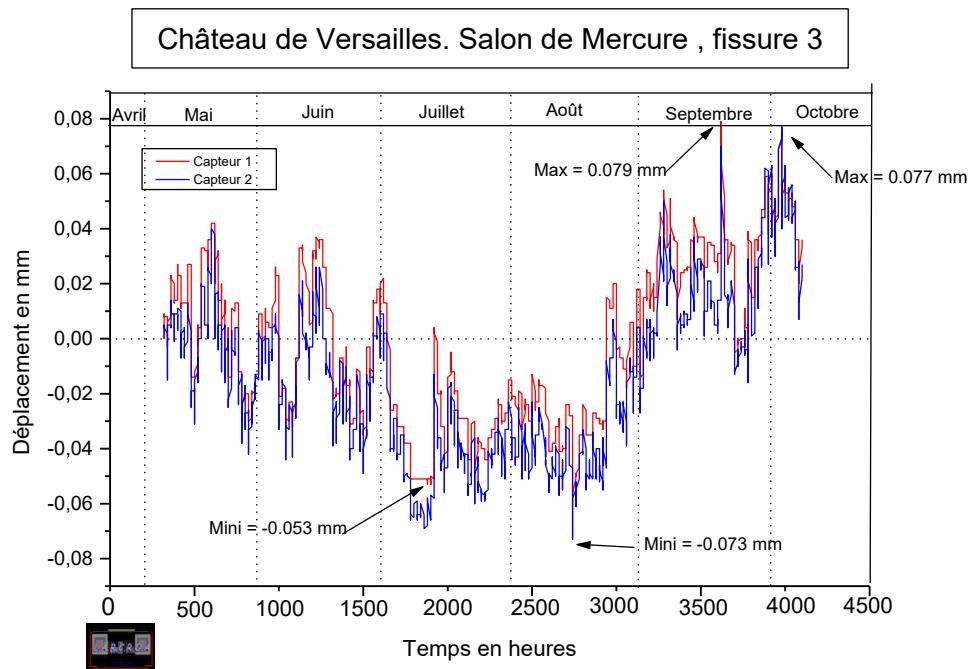


Figure 19: Mouvements de la fissure 3

## INTERPRETATION DES RESULTATS

L'analyse géométrique de la configuration de la fissure nous montre que de petits mouvements de cisaillement apparaissent à chaque déplacement de la fissure. Ils sont relativement faibles par rapport aux déplacements principaux.

La fissure 3 présente, comme les fissures 1 et 2, deux types de variations. Un bruit de fond et une série de resserrements et écartements d'amplitudes variables supérieures au bruit de fond, correspondant à des cycles.

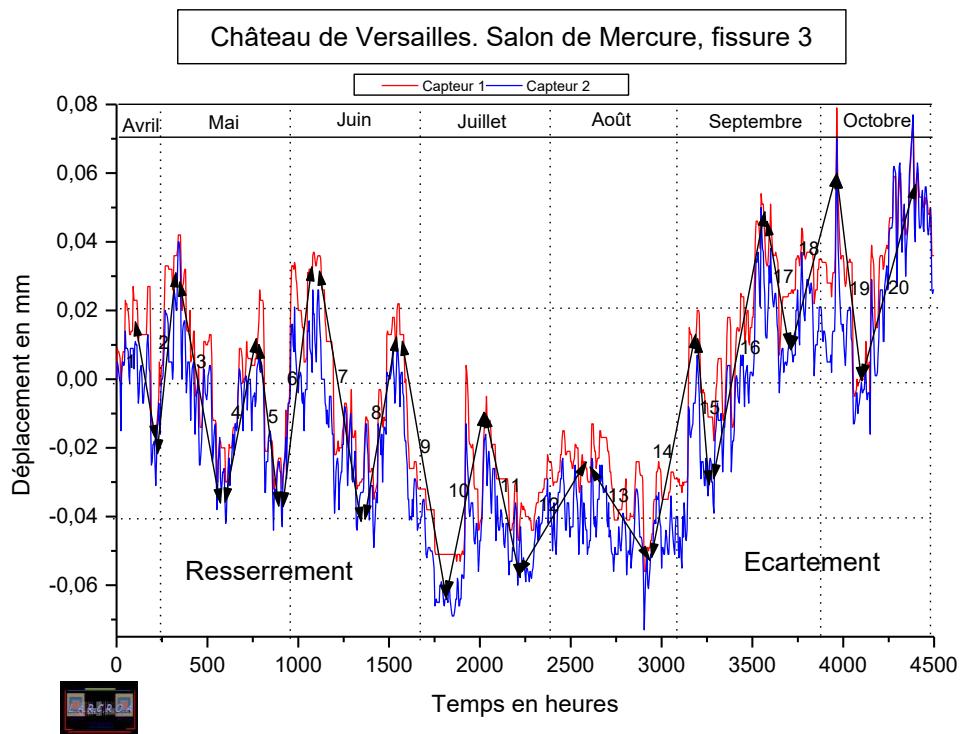


Figure 20 : Identification des mouvements de la fissure durant la période d'enregistrement.

Une série de 20 mouvements significatifs sont regroupés dans le Tableau 3.

N°	1 resst	2 écart.	3 resst	4 écart.	5 resst	6 écart.	7 resst.	8 écart.	9 resst	10 écart
Fissure 3	0.035mm	0.050 mm	0.056 mm	0.036 mm	0,037 mm	0.067 mm	0.070 mm	0.051 mm	0.074mm	0.063 mm
Dépl.rela	80.58%	0.83%	0.91%	0.6%	0.62%	1.11%	1.16%	0.95%	1,23%	1.05%
Période	214 h	116 h	272 h	188 h	109 h	209 h	251 h	212 h	257 h	201 h
N°	11 resst	12 écart.	13 resst	14 écart.	15 resst	16 écart.	17 resst	18 écart.	19 resst	20 écart.
Fissure 3	0.057 mm	0.081 mm	0.076mm	0.062 mm	0.050mm	0.075 mm	0.045 mm	0.057 mm	0.058 mm	0.057 mm
Dépl.rela	0.95%	1.35%	1,26%	1.03%	0.83%	1,25%	0.75%	0.95%	0.96%	0.95 %
Période	202 h	360 h	353 h	258 h	77 h	322 h	116 h	254 h	145 h	280 h

Tableau 3 : Mouvements de la fissure 3

Les valeurs du tableau permettent de faire les remarques suivantes :

- Les amplitudes des mouvements de cette fissure ont des valeurs comprises entre 0.035 et 0.075 mm.
- Du mois d'avril à mi juin les mouvements oscillent autour de 0. De mi juin à fin août, les mouvements oscillent autour de -0.04 mm. Enfin en septembre et octobre les mouvements oscillent autour de 0.02 mm.
- Ces amplitudes de déplacements s'étalent sur des durées allant de 77 heures à 360 heures. A priori, il n'y a pas de corrélation entre la durée et les variations de largeur des fissures.

## RELATION ENTRE MOUVEMENTS DE LA FISSURE ET DU CLIMAT.

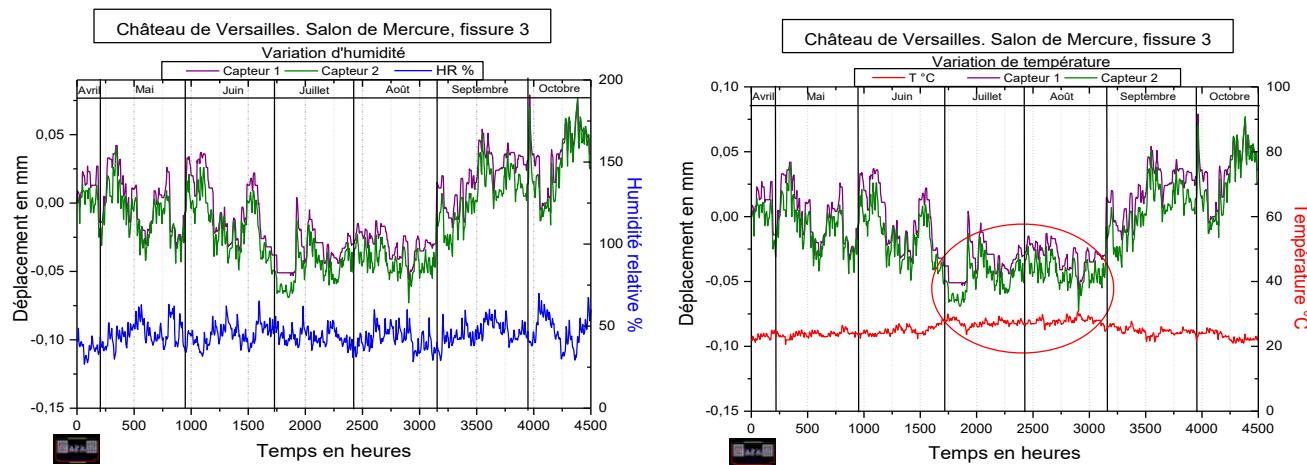


Figure 21 : Relation entre mouvements de la fissure et du climat

Le mouvement général de resserrement et d'écartement de la fissure n'a pas d'échos au niveau des variations d'humidité. En contrepartie l'allure générale du mouvement de la fissure permet d'établir, comme nous l'avons déjà vu pour les fissures 1 et 2, qu'elle est liée à la température Figure 21. La corrélation des mouvements des fissures aux paramètres physiques de l'environnement, humidité d'une part et température de l'autre, permet de mettre en évidence le facteur climatique le plus influent, Figure 22.

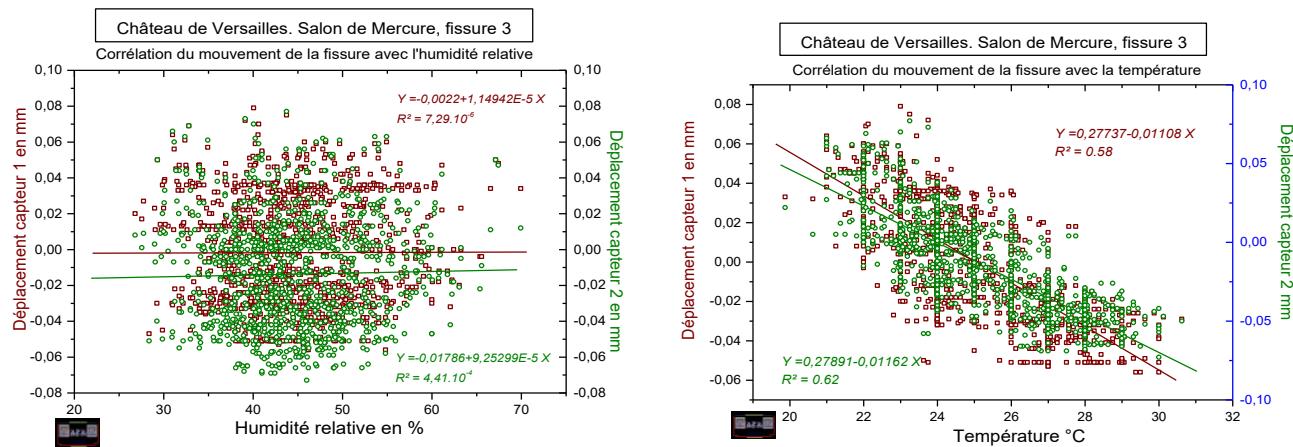


Figure 22 : Corrélation des mouvements de la fissure avec l'humidité et la température.

Les coefficients de détermination  $r^2$  sont regroupés dans le Tableau 4.

	C1 (HR)	C2 (HR)	C1 (T)	C2 (T)
$r^2$	0	0	0.58	0.62

Tableau 4 : Corrélation mouvements de la fissure 1 avec l'humidité et la température.

Titulaire Alain ROCHE pour LARCROA MARCHÉ N° 2009-PA-DP-ST-2-043	Château de Versailles – Grands Appartements – <i>Rapport sur l'instrumentation des fissures</i>	Pierre DIAZ PEDREGAL pour ...IN EXTE...SO...
------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------

Il n'y a pas de corrélation entre les mouvements de la fissure et l'humidité. Par contre, une corrélation existe pour la température. On peut donc conclure également que la température est le facteur climatique dominant dans les mouvements de ces fissures.

### Salon de Mars : corniche ouest : fissure 4 et 5

#### RELEVES DES TEMPERATURES ET HUMIDITES

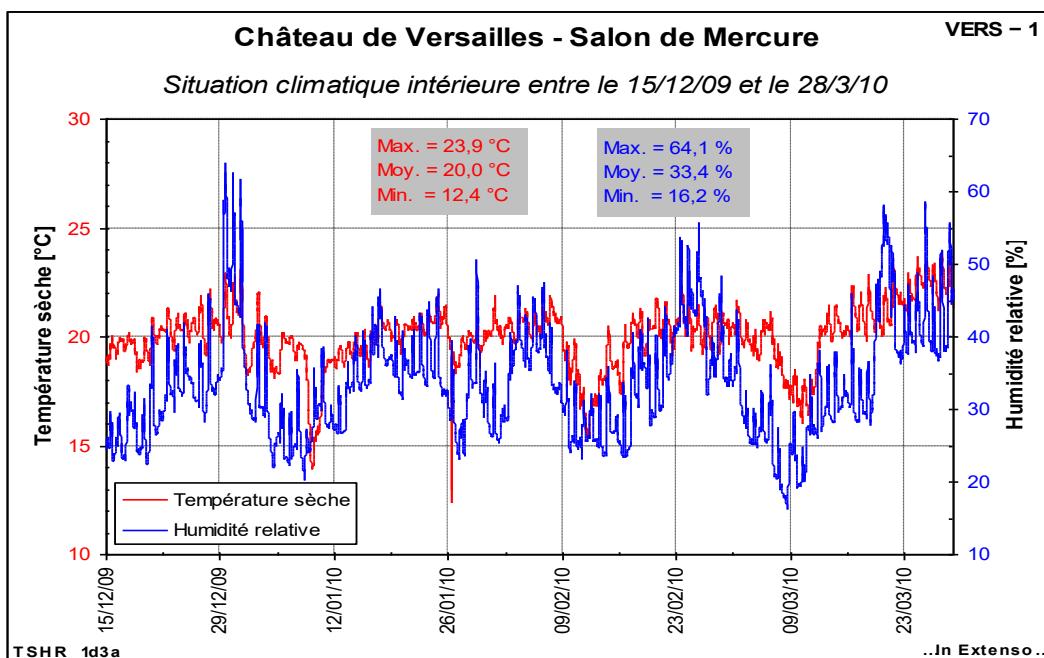


Figure 23 : Situation climatique dans la zone proche des fissures 4 et 5

L'étude du climat proche de la fissure est basée sur.

- Les minima de températures et d'humidité
- Les maxima de températures et d'humidité
- Les variations quotidiennes des écarts d'humidité et températures.

#### Températures

Minima des températures inférieures à 18°C : la température la plus basse apparaît le 26 janvier 2010 à 06 h 45 min elle est de 12,4 °C.

Maxima des températures supérieures à 20°C : La température la plus élevée apparaît le 25 mars 2010. Elle est de 23,9 °C. Écart maximum :  $\Delta T = 8^\circ\text{C}$ .

#### Humidités relatives

Pendant les mois d'enregistrement, l'humidité moyenne est de 33,4%. En décembre, l'humidité relative maximum 64,1% est atteinte le 30 décembre 2009 puis chute brutalement vers le 10 janvier 2010. L'écart maximum est de 44% en une dizaine de jours. En janvier et février les fluctuations sont moins prononcées. Les écarts sont de l'ordre de 25% alors qu'en mars ils sont de 40 et 32,5 %.

Titulaire Alain ROCHE pour LARCROA MARCHÉ N° 2009-PA-DP-ST-2-043	Château de Versailles – Grands Appartements – <i>Rapport sur l'instrumentation des fissures</i>	Pierre DIAZ PEDREGAL pour ...IN EXTE... N
------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------

Les deux graphes suivants montrent la variabilité quotidienne des grandeurs mesurées. Ont été représentées sur ces graphes les valeurs limites qu'il conviendrait de ne pas dépasser dans un établissement patrimonial, soit respectivement 1 °C/ 24 h pour la température et 5 %/24 h pour l'humidité relative. Seuls 17,8 % des observations respectent le critère pour la température. Cette statistique tombe à 7,6 % pour l'humidité relative. On constate une élévation très évidente de l'humidité relative et une baisse tout aussi claire en phase avec l'ouverture du château aux visiteurs. Une augmentation plus discrète de la température est également mesurable. L'accroissement simultané de la température et de l'humidité relative signale un apport de vapeur d'eau dans l'espace, apport attribuable sans contestation à la présence humaine.

## ANALYSE DES MOUVEMENTS DES FISSURES 4 ET 5

Caractéristiques des fissures.  
 Situation : Salon de Mars  
 Fissure 4, corniche est.  
 Largeur de la fissure au point de mesure : 2 mm.  
 Désaffleurement : 0 mm.  
 Fissure 5, corniche est  
 Fissure d'angle

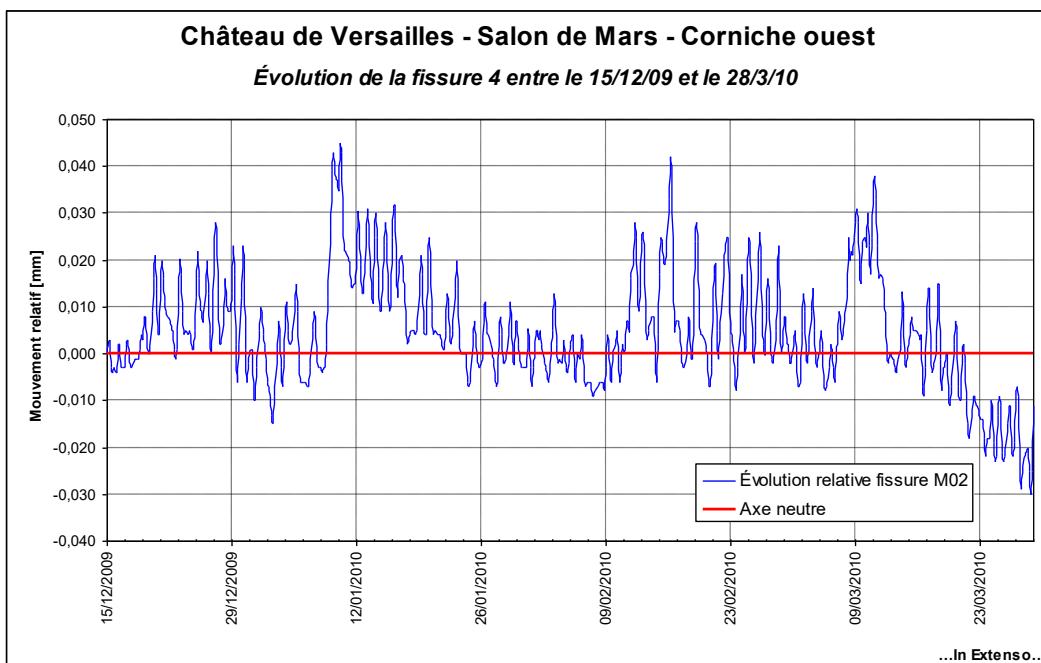


Figure 24 : Mouvements de la fissure 4.

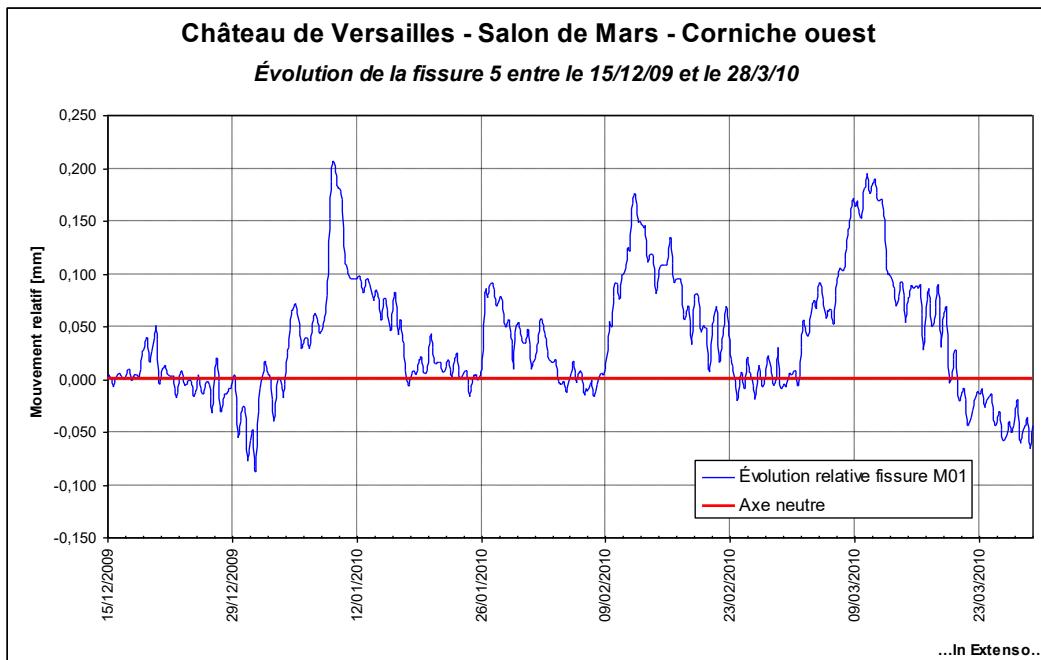


Figure 25 : Mouvements de la fissure 5.

Dans les deux cas, la valeur de départ est calée à zéro. Les valeurs décroissantes correspondent à un resserrement et les valeurs croissantes à un écartement de la fissure.

## INTERPRETATION DES RESULTATS

Comme les précédentes, les fissures 4 et 5 présentent deux types de variations. De petites fluctuations permanentes correspondant au bruit de fond des capteurs.

Pendant toute la durée des mesures on peut dénombrer pour les deux fissures une série de resserrements et écartements d'amplitudes variables supérieures au bruit de fond, Figure 26.

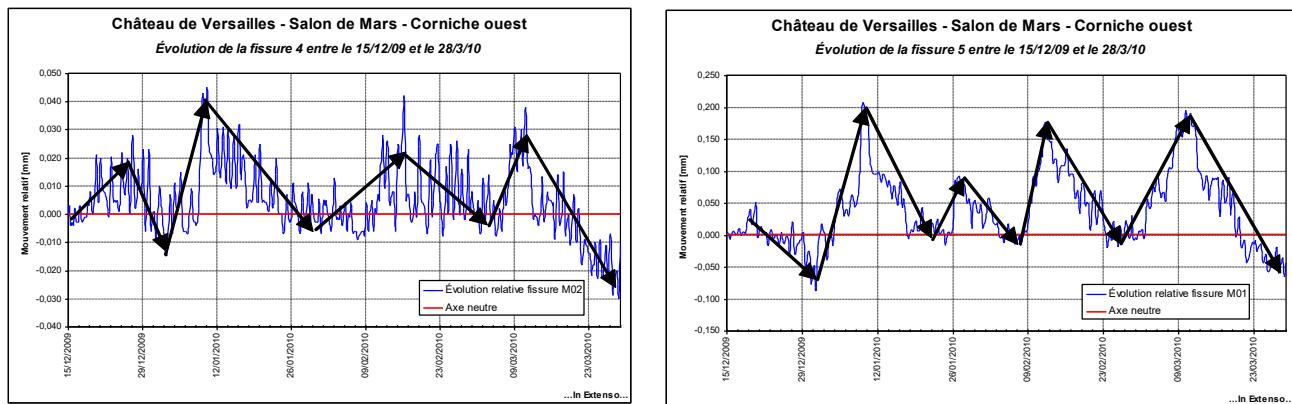


Figure 26 : Identification des mouvements des fissures durant la période d'enregistrement.

Deux séries de 8 et 9 mouvements significatifs sont regroupées dans le Tableau 5.

Titulaire Alain ROCHE pour LARCROA MARCHÉ N° 2009-PA-DP-ST-2-043	Château de Versailles – Grands Appartements – <i>Rapport sur l'instrumentation des fissures</i>	Pierre DIAZ PEDREGAL pour ...IN EXTE... ...IN EXTE...
------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------

	1 resst	2 écart.	3 resst	4 écart.	5 resst	6 écart.	7 resst.	8 écart.	9 resst
Fissure 4 Dépl.rela		0,020 mm 1,00%	0,035 mm 1,75%	0,045 mm 2,25%	0,048 mm 2,40%	0,031 mm 1,55%	0,027 mm 1,35%	0,034 mm 1,70%	0,053 mm 2,65%
Période		216 h	192 h	192 h	528 h	360 h	432 h	144 h	384 h
Fissure 5 Dépl.rela	0,105 mm	0,275 mm	0,200 mm	0,080 mm	0,090 mm	0,185 mm	0,195 mm	0,200 mm	0,235 mm
Période	288 h	216 h	240 h	192 h	240 h	120 h	336 h	288 h	384 h

Tableau 5 : Mouvements des fissures 4 et 5.

Les valeurs du tableau permettent de faire les remarques suivantes :

- En valeurs absolues, la fissure 5 a des mouvements plus importants que la fissure 4.
- Les mouvements de la fissure 4 oscillent autour de 0,009 mm et ceux de la fissure 5 autour de 0,035 mm.
- Ces amplitudes de déplacements s'étalent sur des durées allant de 120 heures à 528 heures. A priori il n'y a pas de corrélation entre la durée et les variations de largeur des fissures.

## RELATION ENTRE MOUVEMENTS DES FISSURES ET CLIMAT.

Aucune corrélation n'apparaît avec les variations de la pression atmosphérique. Nous avons poursuivi l'étude en examinant successivement les corrélations possibles avec la température sèche, l'humidité relative et le rapport de mélange.

Il résulte de nos analyses que les fluctuations de la température semblent être la cause principale des variations de l'ouverture des fissures. Les Figure 28 et la Figure 28 illustrent cette corrélation. Le coefficient de corrélation  $r^2$  vaut respectivement environ 0,4 et 0,7. Bien que ces valeurs ne soient pas très élevées, il est possible d'affirmer que ces corrélations sont significatives et qu'elles ne sont pas dues au hasard. Pour vérifier de manière rigoureuse ce point de vue, nous avons représenté deux courbes encadrant la droite de régression constituant l'intervalle de confiance à 95 %. On constate que la plupart des points sont inclus dans cet intervalle de confiance. On peut donc conclure, que sans être parfaites, ces corrélations mises en évidence entre les fluctuations de la température et l'ouverture et la fermeture des fissures sont significatives avec une probabilité de 95 %.

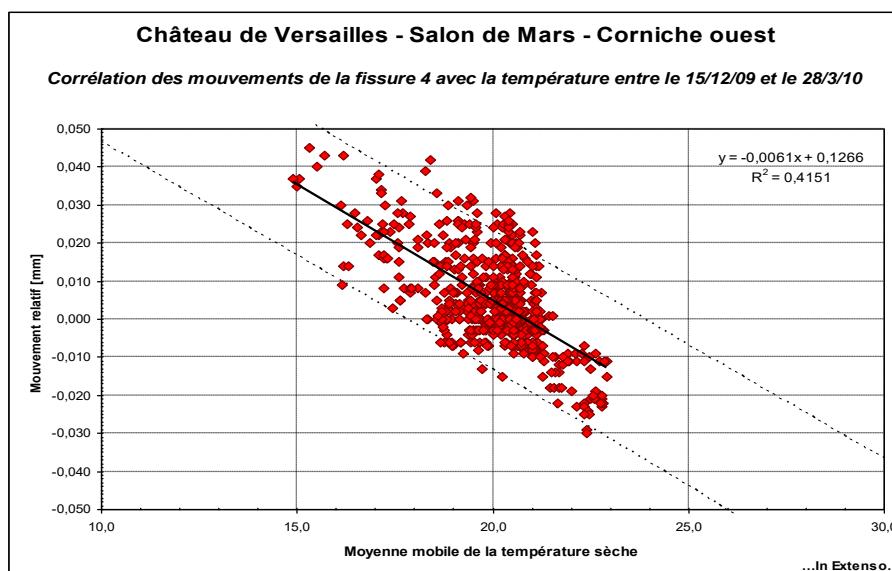


Figure 27 : Corrélation des mouvements de la fissure 4 avec la température

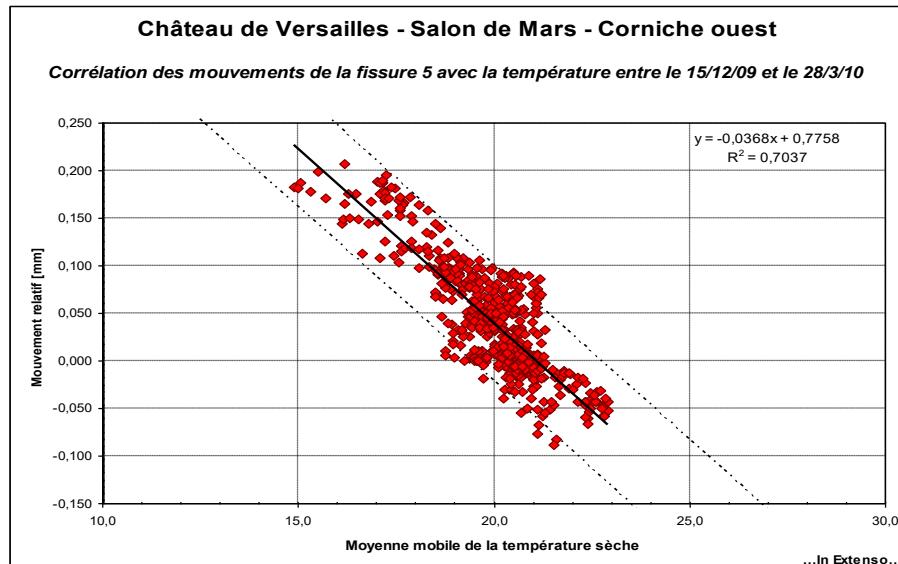


Figure 28 : Corrélation des mouvements de la fissure 5 avec la température.

Il est intéressant d'observer le sens des variations. On constate qu'une baisse tendancielle de la température s'accompagne d'un élargissement des fissures. À l'inverse, une augmentation de la température se traduit par un resserrement. L'examen de quelques épisodes singuliers comme celui du 9 janvier suggère également que le mouvement d'ouverture est toujours plus rapide que le mouvement de fermeture. Ce phénomène peut s'interpréter en supposant que l'ouverture de la fissure lors d'un épisode de refroidissement de la température ambiante, correspond à une libération rapide des contraintes mécaniques induites par l'échauffement des maçonneries et la dilatation qui l'accompagne.

## Conclusion

Les caractéristiques de chaque fissure sont regroupées dans le tableau suivant :

Fissures	Durée h	Mouv.	Δ <sub>max</sub> mm	Tendance générale	R <sup>2</sup> T	R <sup>2</sup> HR	Observations
Fissure 1	2500	9	0.145	Sensible à T	0.84	0.41	Stable
Fissure 2	2500	8	0.133	Sensible à T	0.75	0.38	Stable
Fissure 3	2500	12	0.081	Sensible à T	0.58	0	Stable
	4500	20	0.081		0.62	0	
Fissure 4	2500	9	0.053	Sensible à T	0.42	0.09	Stable
Fissure 5	2500	8	0.275	Sensible à T	0.70	0.38	Stable

Tableau 6 : Récapitulation des caractéristiques des fissures.

Les enregistrements des mouvements de l'ensemble des fissures montrent que leurs activités sont liées avant tout aux conditions environnementales et plus précisément à la température.

Les écarts thermiques quotidiens qui sont à l'origine des mouvements de faibles amplitudes affectent très peu le comportement des fissures. On peut considérer qu'ils sont le résultat d'une dilatation/contraction des matériaux constitutifs des corniches.

La campagne de mesures menée sur ces fissures permet de constater que localement les problèmes de structures se sont stabilisés. Ce diagnostic se trouve du reste confirmé par les témoins de plâtre qui sont restés intacts depuis 1996.

Ces micromouvements des fissures peuvent éventuellement participer aux phénomènes d'élargissement de celles-ci à très long terme mais ils ne sont pas à priori, pour le moment, des facteurs de risques majeurs. Par contre lors d'une intervention de restauration des stucs et moulures, il faudrait tenir compte dans le cas de rebouchage des fissures de laisser un jeu de l'ordre du millimètre pour que les fissures d'une manière générale puissent bouger.

*Alain Roche, LARCROA,  
Pierre Diaz Pedregal, IN EXTEENO.*

Titulaire Alain ROCHE pour LARCROA MARCHÉ N° 2009-PA-DP-ST-2-043	Château de Versailles – Grands Appartements – <i>Rapport sur l'instrumentation des fissures</i>	Pierre DIAZ PEDREGAL pour ...IN EXTEENO...
------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------

## Annexe : Description des matériels de mesure

### Capteur de déplacement, potentiométrique FWA025TR

Linéarité indépendante :  $\pm 0.2 \%$   
Longueur du boîtier : 63 mm  
Course maximum : 30 mm  
Masse totale : 120 g  
Fréquence de manœuvre : 18 Hz  
Force d'application :  $\pm 5 \text{ N}$ .  
Rigidité diélectrique :  $\pm 1 \text{ mA}$ .  
Plage de température : - 30 à 100 °C.  
Connecteur AMENO pour tension  $\pm 26 \text{ V}$ , résolution 0,1 mV.

### Centrale d'acquisition portable ALMENO 2390-8

Entrées de mesure : 5 entrées ALMENO, séparation galvanique pour 5 capteurs.

Canaux : 4 canaux par capteur, mesures et fonctions.

Plages de mesure :

0 à 500 ohms (résolution 0,1 ohm), 0 à 5 000 ohms (résolution 1 ohm).  
-2 à 2,6 V et -26 à 2,6 mA.

Tension d'alimentation capteur :

Pile : 7 à 9 V ou 100 mA max.  
Secteur : 12 V ou 100 mA max.

Sorties : 2 prises ALMENO.

Mémoire : 512 ko.

Alimentation :

Piles de 9 V.  
Adaptateur secteur.

Consommation : env. 10 mA soit 10000 cycles par pile.

### Logiciel AMR-CONTROL

Programmation des capteurs.

Récupération des données en fichier texte par RS 232.

Titulaire Alain ROCHE pour LARCROA MARCHÉ N° 2009-PA-DP-ST-2-043	Château de Versailles – Grands Appartements – <i>Rapport sur l'instrumentation des fissures</i>	Pierre DIAZ PEDREGAL pour ...IN EXTE...SO...
------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------

## Table des illustrations

<b>Figure 1</b> : Cintrage et déformation de la corniche.....	3
<b>Figure 2</b> : Fissures au niveau de la corniche angle nord est.....	4
<b>Figure 3</b> : Témoins de plâtre.....	4
<b>Figure 4</b> : Fissure transversale de la corniche.....	4
<b>Figure 5</b> : Angle nord ouest du salon de Mars.....	5
<b>Figure 6</b> : Plan de l'aile nord du château.....	6
<b>Figure 7</b> : Instrumentation des fissures.....	7
<b>Figure 8</b> : Fissures 1 et 2 instrumentées .....	8
<b>Figure 9</b> : Fissure 3 instrumentée. ....	9
<b>Figure 10</b> .: Configuration des mesures.....	9
<b>Figure 11</b> : Fissures 4 et 5 instrumentées. ....	10
<b>Figure 12</b> : Planning d'instrumentation des fissures. ....	10
<b>Figure 13</b> : Situation climatique de la zone proche des fissures 1 et 2.....	11
<b>Figure 14</b> : Enregistrement des mouvements des fissures 1 et 2.....	12
<b>Figure 15</b> : Identification des mouvements des fissures durant la période d'enregistrement.	12
<b>Figure 16</b> : Mouvements des fissures et humidité et température .....	13
<b>Figure 17</b> : Corrélation mouvements des fissures et humidité relative et température. ....	14
<b>Figure 18</b> : Situation climatique dans la zone proche de la fissure 3 .....	15
<b>Figure 19</b> : Mouvements de la fissure 3 .....	16
<b>Figure 20</b> : Identification des mouvements de la fissure durant la période d'enregistrement. ....	17
<b>Figure 21</b> : Relation entre mouvements de la fissure et du climat .....	18
<b>Figure 22</b> : Corrélation des mouvements de la fissure avec l'humidité et la température. ....	18
<b>Figure 23</b> : Situation climatique dans la zone proche des fissures 4 et 5 .....	19
<b>Figure 24</b> : Mouvements de la fissure 4. ....	20
<b>Figure 25</b> : Mouvements de la fissure 5. ....	21
<b>Figure 26</b> : Identification des mouvements des fissures durant la période d'enregistrement.	21
<b>Figure 27</b> : Corrélation des mouvements de la fissure 4 avec la température.....	23
<b>Figure 28</b> : Corrélation des mouvements de la fissure 5 avec la température.....	23

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1</b> : Mouvements des fissures 1 et 2 .....	13
<b>Tableau 2</b> : Corrélation du mouvement des fissures 1 et 2 avec l'humidité et la température. .....	14
<b>Tableau 3</b> : Mouvements de la fissure 3.....	17
<b>Tableau 4</b> : Corrélation mouvements de la fissure 1 avec l'humidité et la température. ....	18
<b>Tableau 5</b> : Mouvements des fissures 4 et 5. ....	22
<b>Tableau 6</b> : Récapitulation des caractéristiques des fissures.....	23

## Table des matières

<i>Introduction</i> .....	3
<i>Problématique</i> .....	3
Rappel du cahier des charges de l'étude :.....	3
Désordres structuraux du Salon de Mercure : .....	3
Désordres structuraux du Salon de Mars :.....	5
Hypothèses sur l'origine des désordres :.....	5
<i>Localisation des zones d'intervention</i> .....	6
<i>Localisation des capteurs et enregistreurs</i> .....	7
<i>Instrumentation des fissures</i> .....	8
Salon de Mercure, corniche ouest : Fissures 1, 2 .....	8
Salon de Mercure, corniche est : Fissure 3 .....	9
Salon de Mars, corniche ouest : Fissure 4, 5.....	9
Période de mesures .....	10
<i>Salon de Mercure : corniche ouest : fissures 1 et 2</i> .....	10
Relevé des températures et humidités.....	10
Analyse des mouvements des fissures.....	12
Interprétation des résultats .....	12
Relation entre mouvements des fissures et climat.....	13
<i>Salon de Mercure : corniche est : fissure 3</i> .....	15
Relevés des températures et humidités. ....	15
Analyse des mouvements de la fissure,.....	16
Interprétation des résultats .....	16
Relation entre mouvements de la fissure et du climat. ....	18
<i>Salon de Mars : corniche ouest : fissure 4 et 5</i> .....	19
Relevés des températures et humidités .....	19
Analyse des mouvements des fissures 4 et 5.....	20
Interprétation des résultats .....	21
Relation entre mouvements des fissures et climat.....	22
<i>Conclusion</i> .....	23
<i>Annexe : Description des matériels de mesure</i> .....	25
<i>Table des illustrations</i> .....	26
<i>Liste des tableaux</i> .....	27
<i>Table des matières</i> .....	28

Titulaire Alain ROCHE pour LARCROA MARCHÉ N° 2009-PA-DP-ST-2-043	Château de Versailles – Grands Appartements – <i>Rapport sur l'instrumentation des fissures</i>	Pierre DIAZ PEDREGAL pour ...IN EXTE...SO...
------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------