

LES OUTILS DE CONTRÔLE DES GRANDES STRUCTURES COMPLEXES

LA GRANDE PYRAMIDE DU LOUVRE

par Jean-François Sageau, Ingénieur, PDG SITES S.A.
et Hervé Lançon, Ingénieur, Resp. Svce Vision-Dimension SITES S.A.

Résumé

Le présent article, d'une part, expose et situe dans son contexte la philosophie générale de la surveillance prédictive des structures et du contrôle sur ouvrages complexes, et d'autre part, souligne la diversité des outils techniques qui leur sont associés.

Un exemple d'application sur structure complexe est décrit : le suivi de la Grande Pyramide du Louvre. Le choix de la méthodologie retenue, les moyens mis en œuvre pour assurer les contrôles continus et périodiques, ainsi que les premiers résultats obtenus, sont exposés en détails.

Abstract

This paper presents the general philosophy of the predictive monitoring or the control on structures, and underlines the variety of the present-day engineering means which make possible these surveys or diagnosis.

An example is given for a complex structure: «La Grande Pyramide du Louvre». The selection of the appropriate methodology, the prestations to be implemented to achieve continuous and periodic controls, and the first conclusions obtained, are reported with details.



Jean François Sageau.



Hervé Lançon.

*La pyramide pendant l'intervention de
photogrammétrie*



Planche 1. Le contrôle photogrammétrique de la planéité des faces.

0 - LA PLACE CROISSANTE DU SUIVI DES STRUCTURES COMPLEXES

Depuis toujours, les contrôles techniques réglementaires sur les structures sont effectués, soit dans la phase amont (études, choix des hypothèses, plans...), soit dans la phase de construction (conformité aux spécifications, suivi de l'exécution, ...)

Par la suite, après achèvement, il n'existe plus de réglementations, hormis celles issues de la garantie décennale (en France). La notion de Contrôle disparaît alors au profit de celle d'Expertise.

Le plus souvent, ces expertises ont lieu bien longtemps après l'apparition des premiers désordres et elles sont, dans la majorité des cas, utilisées pour établir un Cahier des Charges des réparations.

Pourtant, de nombreuses évolutions sont apparues depuis plusieurs années, à différents niveaux : architecture et technique, méthodes de construction, matériaux utilisés, et enfin sur le plan de l'exploitation - qui joue un grand rôle, et pas seulement dans le monde industriel (augmentation du nombre de visiteurs à la Tour Eiffel ou à Beaubourg, par exemple).

Il est donc devenu évident, à un certain nombre d'exploitants, que des contrôles préventifs devaient être mis en place systématiquement, juste après la construction, pour mieux assurer la pérennité de leurs structures.

Ces contrôles, effectués parallèlement à la construction et à l'exploitation, connaissent un essor grandissant car ils conduisent d'une part, à une meilleure appréhension des risques techniques, et d'autre part, à une optimisation des réparations et des coûts.

Ils permettent en effet :

- de valider les hypothèses retenues lors de l'édification ou de la réparation, et de vérifier la pérennité de ces hypothèses dans le temps,
- de suivre les évolutions structurelles et en particulier celles de caractère irréversible, de façon à prévenir les désordres,
- d'obtenir une mémoire quantifiée de la structure, en archivant les données et en ne les traitant qu'au cas par cas.

1 - LES OUTILS MIS À DISPOSITION DES INGÉNIEURS ET LEUR UTILISATION

Actuellement, on dispose d'une panoplie importante de méthodes et de techniques pour contrôler l'état d'une structure à un instant donné, ou pour suivre l'évolution de cet état dans le temps.

Toutefois, cette richesse est souvent inexploitée :

- D'une part parce que le choix d'une technique est rarement précédé d'une réflexion pointue sur les descripteurs qui sont les mieux adaptés à représenter l'état de la structure (flèche, déformation, niveau de vibration, état de fissuration, ...) et que cette réflexion, si elle a lieu, n'est en général pas menée de façon impartiale. (La technique de mesure ne doit pas guider le choix des descripteurs, ce qui est malheureusement souvent le cas).
- D'autre part, parce que les bureaux d'études n'ont souvent pas les moyens d'utiliser, pour un contrôle donné, plusieurs techniques complémentaires, ce qui conduit à des diagnostics erronés ou incomplets.

Le tableau 1 ci-dessous présente, à titre indicatif et non exhaustif, la liste des outils les plus souvent mis à disposition par SITES, en fonction du problème cherché.

Tableau n° 1. Techniques mises en œuvre suivant le problème rencontré.

	I.R.	CNS	T.G.	T.P.	A.V.	CVBF	CND	I.F.	I.M.
Dégradations de la surface externe	XXX	XXX							
Déformations de la géométrie		XXX	XXX	XXX				XXX	
Dégradations globales ou cachées				XXX	XXX	XXX			
Altération des matériaux					XXX		XXX		
Phénomènes évolutifs lents		XXX	XXX	XXX		XXX		XXX	
Phénomènes en temps réels					XXX				XX
Défauts sur Machines			XXX		XXX			XXX	XX
Interfaces machines-structures					XXX	XXX		XXX	
Phénomènes sismiques						XXX		XXX	XX

Exemple de choix de techniques en fonction des descripteurs		Cheminée industrielle		Pyramide du Louvre	
Paramètres de Base	Techniques	Descripteurs	Techniques	Descripteurs	Techniques
VISION	* Inspection rapprochée				
	* Imagerie numérique	Taux de Fissuration	Imagerie CNS (Quantitative)	Etat des joints	Inspection rapprochée Imagerie CNS (Qualitative)
DIMENSION	* Topométrie Géodésique * Topométrie Photogrammétrique * Imagerie Numérique * Inclinométrie * Capteurs de déplacement	Verticalité du fût	Topométrie	Planéité des faces	Photogrammétrie
DEFORMATION (dynamique)	* Topométrie Photogrammétrique * Topométrie Géodésique * Accélérométrie * Extensométrie dynamique	Détermination des fréquences propres, modes propres sous l'effet du vent	Accélérométrie Extensométrie dynamique	Effet du soleil Mouvement des barres, tiges... Contraintes	Photogrammétrie Inclinométrie Extensométrie
CONTRAINTES	* Extensométrie * Vernis * Accélérométrie	sans objet, sauf cheminées en métal ou composites	Extensométrie	Sur les éléments internes	Extensométrie Accélérométrie
SENSIBILITE (à un événement)	* Instrumentation	Tempêtes Démolitions	Instrumentation en poste fixe	Climatisation	Extensométrie Inclinométrie
	* Topométrie	Séismes		Nettoyage	Photogrammétrie
VIEILLISSEMENT	* Instrumentation continue	Matériau	Instrumentation périodique	Verre	Instrumentation continue
	* Instrumentation périodique * Topométrie périodique	Structure	Topométrie	structure	

Tableau 2 : Descripteurs et techniques en fonction de la structure

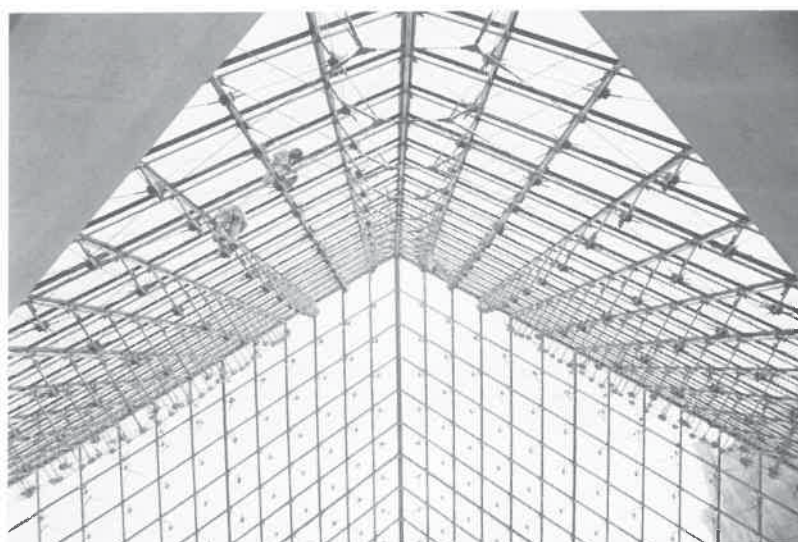


Planche 2. Intérieur de la Pyramide du Louvre. Complexité de la structure. Mise en place des capteurs.

Dans ce tableau, les abréviations correspondent aux techniques suivantes :

I.R. : Inspections Rapprochées
CNS : Système CNS (Cartographie Numérique des Structures).
T.G. : Topométrie Géodésique avec le système ECDS 3.
T.P. : Topométrie Photogrammétrique.
A.V. : Analyses vibratoires.
CVBF : Cartographie Vibratoire Basse Fréquence.
CND : Contrôles Non Destructifs (Ultrasons, Foucault,...).
I.F. : Instrumentation en poste Fixe.
I.M. : Instrumentation en poste Mobile.

En parallèle, la nécessité de faire précéder le choix de la méthode par celui du descripteur est illustrée sur le tableau 2, qui précise les moyens à mettre en œuvre pour contrôler d'une part, une cheminée industrielle et d'autre part, la Grande Pyramide du Louvre.

Dans chaque ligne du tableau 2 (voir page précédente), on trouve successivement : le type de grandeur physique associée aux phénomènes susceptibles d'apparaître, les techniques de base qui permettent de quantifier ces phénomènes, le descripteur le mieux adapté au contrôle, pour la structure donnée (descripteur que l'on peut quantifier avec l'approche de base choisie), et la technique choisie pour le contrôle.

2 - LA GRANDE PYRAMIDE DU LOUVRE ET SES CARACTÉRISTIQUES REMARQUABLES

En phase amont, avant construction, les contrôles se réfèrent à des règles ou à des mesures.

Dans le cas des contrôles mis en place pour une surveillance préventive de la tenue d'une structure, les règles ou les normes font souvent place au retour d'expérience et chaque type de structure implique une méthodologie de surveillance particulière.

La Pyramide du Louvre présente plusieurs caractéristiques remarquables, dès lors que l'on s'intéresse à son évolution dans le temps :

a) Aucun historique

Il ne s'agit pas ici de l'historique de la structure elle-même, mais de l'existence de structures comparables, antérieures. On ne dispose d'aucune donnée susceptible d'aider dans le choix des instrumentations à mettre en place, dans celui de la « normalité » des variations attendues, ...

b) Un nombre important de sous-structures à surveiller

Il suffit de franchir la porte de la Pyramide pour appréhender la complexité de la structure. La transparence du verre fait place à un réseau dense de barres, de câbles, de nœuds, véritable ossature de métal.

c) La présence de trois ensembles appelés à évoluer différemment

La sous-structure en béton, le réseau métallique, la couverture en verre.

Ces trois caractéristiques ont eu des implications importantes sur le choix de la méthodologie et de la technologie de surveillance mises en place.

3 - MÉTHODOLOGIE ET OUTILS ADOPTÉS

3.1 Méthodologie mise en place

Pour surveiller une structure, on peut retenir des méthodologies différentes qui reposent sur des contrôles.

Les caractéristiques de ces contrôles peuvent elles-mêmes être regroupées suivant trois critères :

a) Utilisation d'une seule méthode (par exemple nivellement) ou de plusieurs méthodes apportant chacune des données complémentaires.

b) Utilisation de contrôles continus (par pose d'une instrumentation) ou de contrôles périodiques, ou les deux.

c) Contrôle et recherche des zones sensibles ou contrôle des zones stables.

La méthodologie employée

Les caractéristiques remarquables de la Pyramide du Louvre, exposées au § 2, nous ont contraint à adopter la philosophie suivante :

a) *Utilisation de plusieurs techniques,*

en particulier pour mieux prendre en compte la trilogie béton/métal/verre.

b) *Utilisation d'un contrôle continu dans un premier temps,*

pour permettre d'appréhender les cycles normaux et rapides d'évolution de la structure métallique et de dégager les évolutions irréversibles. Ce contrôle continu a pour but aussi de donner un historique à la Pyramide.

Utilisation en parallèle de contrôles périodiques pour des phénomènes plus lents pouvant être constatés sur le béton ou le verre.

c) Une instrumentation en deux parties :

- une partie en poste fixe, destinée à suivre dans le temps la tenue globale de la structure,
- une partie en poste mobile, qui peut être déplacée pour la recherche et la caractérisation de zones sensibles.

Concrètement, l'adoption de cette méthodologie très diversifiée conduit à utiliser des technologies récentes, tant dans le domaine de l'instrumentation que dans celui des contrôles dimensionnels.

Ces techniques sont décrites dans les paragraphes 4 et 5.

3.2 Outils utilisés

3.2.1 Contrôles continus

80 capteurs ont été mis en place dès l'achèvement de la Pyramide, sur l'ossature en métal et sur l'interface métal/béton.

Ces capteurs, reliés à une centrale de mesure interrogeable depuis nos bureaux centraux à Puteaux, sont :

- Des inclinomètres.
- Des extensomètres.
- Des téléniveaux.
- Des capteurs de température.

Par la suite, l'instrumentation a été complétée par la pose de (6) jauges de déformation.

3.2.2 Contrôles périodiques

Pour compléter les informations ponctuelles données par les capteurs, des opérations topométriques ont été programmées périodiquement.

Enfin, un contrôle par photogrammétrie, portant sur la planéité des faces, a été effectué.

4 - CONTRÔLE EN CONTINU PAR INSTRUMENTATION EN POSTE FIXE

4.1 Instrumentation

4.1.1 Grandeurs mesurées et capteurs utilisés

Les mouvements de la structure métallique sont caractérisés par les variations de contraintes

et d'inclinaisons apparaissant dans les éléments de la structure métallique.

Les températures sont mesurées à proximité des éléments de la structure, permettant de caractériser les causes des déformations réversibles et d'effectuer les corrections en température de certains capteurs.

La flexion des poutres de la structure Génie Civil a été déterminée, dans un premier temps, par des téléniveaux à horizon liquide.

4.1.1.1 contraintes

Les contraintes sont calculées à partir des allongements relatifs mesurés avec des extensomètres à corde vibrante et des jauges de déformation. L'utilisation des extensomètres à corde vibrante est limitée aux pièces possédant une symétrie axiale. La résolution de mesure est de $\pm 2 \mu\text{m/m}$. Les extensomètres sont compensés en température. Les jauges de déformation sont installées sur des pièces de géométrie complexe. La résolution de mesure est de $\pm 1 \mu\text{m/m}$.

4.1.1.2 Inclinomètres

Les inclinomètres délivrent un signal proportionnel à l'inclinaison qu'ils possèdent par rapport à la verticale terrestre dans un plan. Ils permettent d'observer les modifications d'inclinaison des éléments de la structure. La résolution de mesure est de $\pm 10^{-5}$ Rad. La mesure de l'inclinaison est corrigée en température.

4.1.1.3 Thermocouples

Des thermocouples sont installés à proximité de la structure. Ils permettent de connaître précisément les niveaux de température auxquels sont soumis la structure et les capteurs. La résolution de mesure est de $\pm 0,4^\circ\text{C}$.

4.1.1.4 Téléniveaux

L'instrumentation en téléniveaux s'est avérée inopérante du fait des conditions d'installation inadaptées.

4.1.2 Centrales de mesures

Les mesures sont effectuées par deux centrales de mesures spécialement adaptées aux types de capteurs installés.

Ces centrales assurent les fonctions suivantes :

- l'alimentation des capteurs,
- le conditionnement des mesures,
- l'acquisition des mesures,
- l'enregistrement des mesures,
- le transfert des séquences d'acquisition par modem.

D'autre part, ces centrales permettent d'effec-

tuer des acquisitions à des intervalles de temps variables, et un prétraitement numérique des mesures.

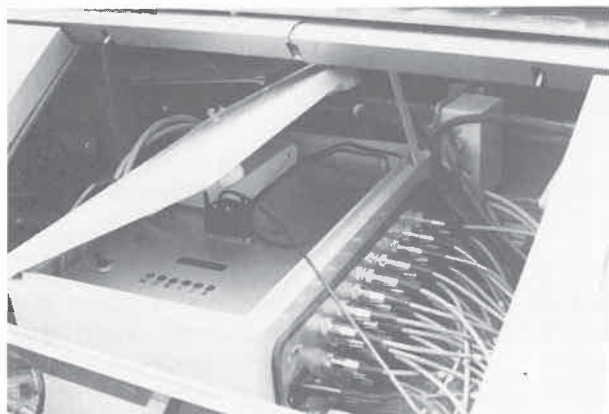


Planche 3. Une centrale de mesure.

4.2 Localisation et choix des éléments

Sur ce type de structure légère, complexe, avec une ossature réticulée, les zones sensibles sont difficiles à appréhender dès la construction car il n'existe pas d'historique sur des structures comparables.

Après discussion avec le constructeur, on a donc défini artificiellement des éléments dits «sensibles», et trois types d'instrumentation ont été mis en place :

- une instrumentation de surveillance, constituée de capteurs en poste fixe, installés dans les zones critiques et dans les zones réputées fixes.
- une instrumentation de caractérisation, constituée de capteurs qui pourront être déplacés.
- une instrumentation de maintenance, constituée de capteurs installés sur des éléments mécaniques nécessitant des actions de maintenance.

L'ensemble de l'instrumentation installée est présenté en planche 4.

4.3 Exploitation des mesures

L'exploitation des mesures répond à deux objectifs :

1. Quantifier l'évolution de l'ouvrage à long terme afin d'assurer sa pérennité.
2. Caractériser les phénomènes journaliers observés sur la structure afin de répondre à des problèmes particuliers d'exploitation, et de mieux comprendre la structure.

L'exploitation des mesures et leur archivage sont réalisés par des logiciels spécifiques déve-

loppés pour le Musée du Louvre.

4.3.1 Evolution de l'ouvrage à long terme

Ce type d'exploitation répond à des préoccupations de surveillance et de maintenance, et a pour but de mettre en évidence les phénomènes irréversibles en éliminant des phénomènes journaliers et saisonniers.

A partir des mesures relevées à heure fixe, le principe consiste à déterminer statistiquement la variation de ces valeurs sur une période de deux années pour chacune des voies de mesure.

4.3.2 Caractérisation des phénomènes réversibles

Quotidiennement, la structure de la Pyramide est exposée à des cas de charges variables, cycliques ou exceptionnels.

Ils sont dus par exemple à la course du soleil, qui crée une action dissymétrique sur la Pyramide, à la mise en marche de la climatisation qui crée des zones chaudes et des effets ponctuels, au nettoyage par les alpinistes qui crée des surcharges locales, ...

Même si toutes ces charges sont prises en compte, par le biais de coefficients de sécurité, dans les calculs, elles induisent, à la longue, des phénomènes de fatigue, et ponctuellement, des sur-contraintes qui peuvent être importantes.

Il est donc nécessaire d'une part, d'en faire l'inventaire, et d'autre part, de les quantifier, pour comprendre le fonctionnement de la structure.

La durée de cette phase préliminaire à celle de recherche des phénomènes irréversibles, a été estimée, sur la Pyramide du Louvre, à trois années, en raison de la complexité de l'ouvrage.

5 - LES CONTRÔLES PÉRIODIQUES

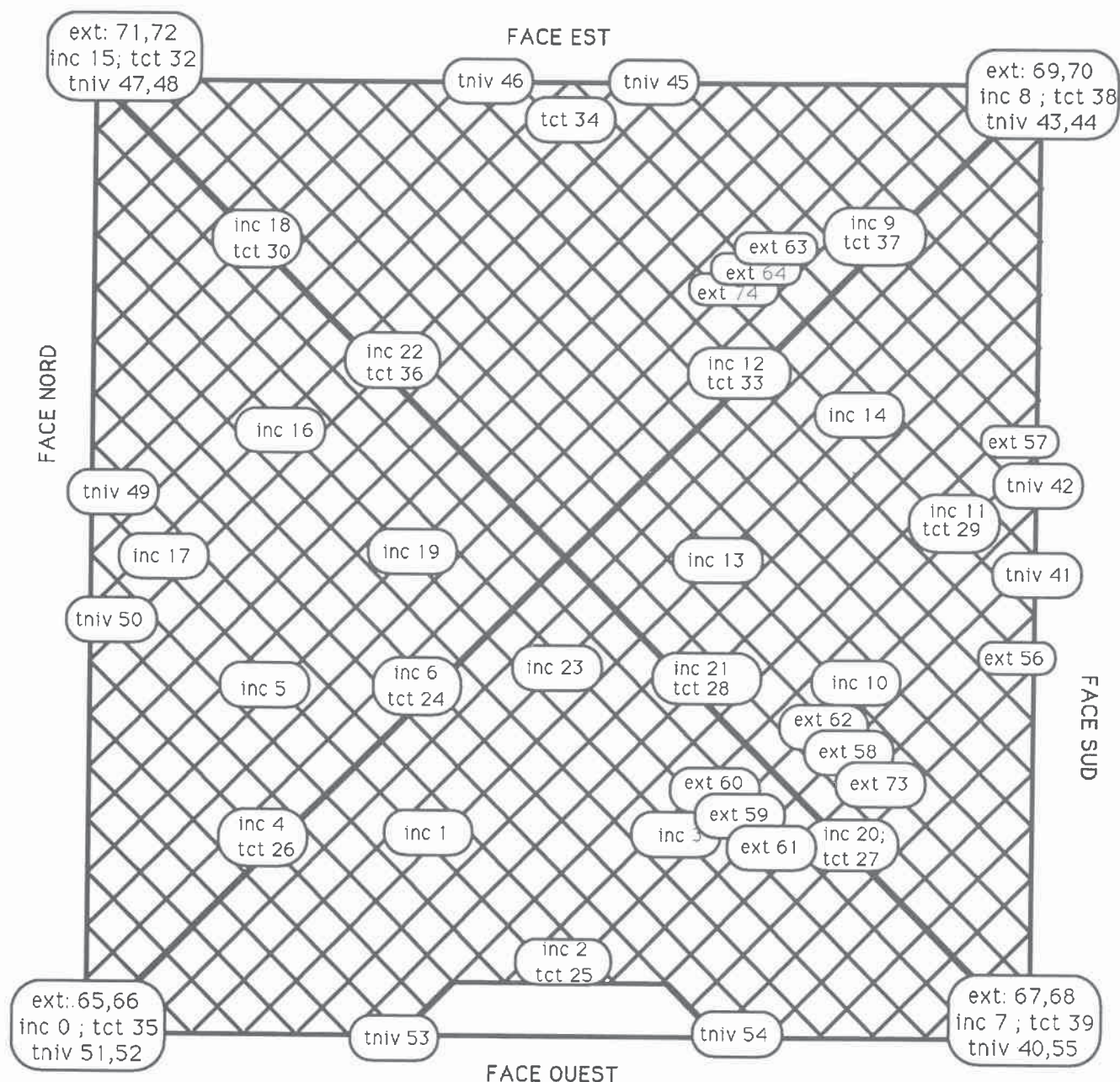
5.1 Définition - Objet

Ces contrôles viennent compléter les précédents et permettent de mettre en évidence, de façon quasi immédiate, le caractère irréversible des variations dimensionnelles de certains éléments sur une période relativement longue.

Les opérations, effectuées suivant une fréquence définie a priori, ou lors d'anomalies constatées par le contrôle en continu, vont permettre de quantifier les mouvements subis et leurs influences sur les éléments voisins (ex : poutre/structure et sous structure/vitrage).



INSTRUMENTATION DE LA GRANDE PYRAMIDE DU LOUVRE



Abréviations:
 ext: Extensomètre
 inc: Inclinomètre
 tct: Thermocouple
 tniv: Téléniveau

Elles s'intéressent à la stabilité du Génie Civil de la structure porteuse, à la géométrie du cadrage et à la planéité des faces.

Ces contrôles nécessitent l'archivage, le plus tôt possible, de l'état «0» de l'ouvrage.

Ils doivent être réalisés avec une bonne reproductibilité, ce qui impose la maîtrise totale des conditions d'intervention.

On utilise pour cela des techniques de métrologie géodésique et photogrammétrique.

5.2 Surveillance altimétrique des poutres-supports

Les mouvements et déformations (induits par le retrait, le fluage du béton ; le tassement différentiel des poteaux...) des poutres porteuses du cadrage inférieur de la Grande Pyramide sont déterminés par des campagnes périodiques de nivellement de précision.

Ces mesures portent sur une vingtaine de points répartis sur les 4 côtés de la base, et sont effectuées à l'aide d'un niveau de haute précision et d'une mire INVAR.

Un dispositif particulier a été mis au point pour matérialiser les points sur les barres du cadrage inférieur.

Enfin, les mesures sont rattachées à l'extérieur de l'édifice, sur des points supposés fixes, en dehors de la zone des travaux.

Ces mesures sont données avec une précision RMS de ± 1 mm.

5.3 Surveillance des mouvements irréversibles de la structure interne par topométrie spatiale

40 cibles de petite taille sont réparties sur l'ensemble des faces intérieures du cadrage.

La détermination des coordonnées (X, Y, Z) de ces points, par rapport à un système de référence lié au Génie Civil, va permettre de juger des mouvements irréversibles de la structure métallique.

Ces opérations sont réalisées à l'aide du système Kern ECDS3 de mesure tridimensionnelle par théodolites.

La précision finale recherchée est inférieure à 1 mm RMS sur le point du sommet qui est le plus éloigné.

Cette prestation est effectuée de nuit (entre 0 h et 5 h), pendant la période de stabilité thermique la plus grande.

5.4 Détermination de la planéité des vitrages par photogrammétrie analytique

Le but de cette campagne d'auscultation est multiple :

- Déterminer la planéité réelle du «revêtement» extérieur de la Grande Pyramide et son évolution au cours du temps.
- localiser les éventuelles dégradations locales des éléments de vitrage.

De plus, lors de la première mesure de ce type, nous avons déterminé l'influence du gradient thermique sur la déformation des faces au cours d'une journée ensoleillée.

Le choix de la méthode de mesure est guidé par les considérations suivantes :

- nécessité d'opérer la mesure dans un intervalle de temps le plus court possible, du fait de la grande souplesse de l'objet,
- nécessité de déterminer simultanément la position de tous les vitrages sur une face,
- précision millimétrique compatible avec les mouvements attendus.

Les récents progrès en matière de photogrammétrie dite à vues convergentes nous ont permis de mettre en œuvre cette technique sur la Grande Pyramide.

La phase «in situ» de la prestation, conduisant au point «zéro» de l'auscultation des faces, est réalisée entièrement en une journée et prévoit les opérations suivantes :

- poste de 2 614 cibles autocollantes à chaque angle de vitrage,
- première campagne de prise de vues à la chambre métrique à raison de 4 points de vue différents par face (matin),
- détermination topométrique de points de calage rattachés à une référence extérieure au bâtiment,
- deuxième campagne de prise de vues (midi),
- dépose des cibles.

L'exploitation de clichés est ensuite réalisée sur monocomparateur. La précision de mesure sur les clichés est de $0,5 \cdot 10^{-3}$ mm.

Les calculs (consistant à assembler les faisceaux perspectifs des différents clichés) fournis-

sent les coordonnées (X, Y, Z) dans le système de référence.

L'exploitation de ces résultats s'est effectuée à plusieurs niveaux :

- exploitation pour recherche de défauts locaux de planéité,
- exploitation globale pour caractérisation de la planéité,
- exploitation comparative (entre mesures à froid et à chaud) pour mettre en évidence les effets du gradient thermique.

Comme pour toutes les opérations métrologiques, cette prestation a été corrélée avec les données recueillies sur les capteurs d'instrumentation pendant l'intervention.

La qualité de la détermination photogrammétrique a été prouvée, d'une part par les critères calculés à la suite des ajustements (1mm RMS), mais aussi par la parfaite cohérence sur l'exploitation locale des résultats entre les mesures à chaud et à froid (On a pu constater la bonne reproduction des variations locales de planéité entre les deux opérations effectuées).

Dans un tel cas, le contrôle photogrammétrique peut être réduit à la seule prise d'informations (clichés) à intervalles réguliers, l'exploitation de ces clichés n'intervenant qu'en cas de besoin de retracer la «vie dimensionnelle» de l'ouvrage.

6 - CONCLUSION

La méthodologie de surveillance de la structure de la Grande Pyramide du Louvre est présentée dans les chapitres précédents.

Les contrôles, continus ou périodiques, mis en œuvre dans le cadre de cette méthodologie, ont débuté il y a environ deux ans.

Ils ont permis, d'ores et déjà, de quantifier les effets de plusieurs cas de charge intéressants sur la structure :

- la course du soleil, qui induit des efforts très

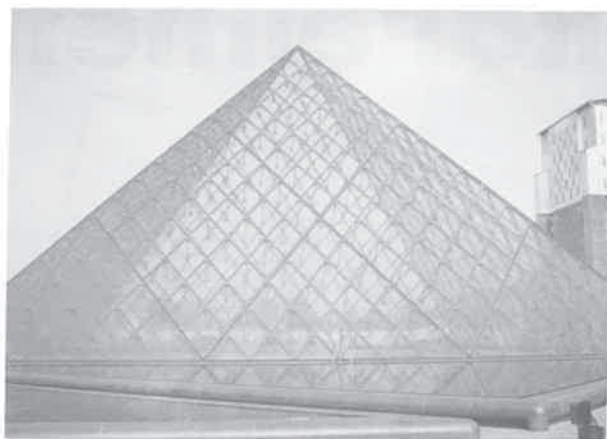


Planche 5. Les 2 614 cibles destinées au contrôle photogrammétrique.

dissymétriques,

- la variation journalière de température,
- les variations saisonnières de température,
- l'effet des grosses chaleurs rencontrées ces derniers étés,
- l'effet ponctuel du nettoyage de la Pyramide.

Par ailleurs, un point zéro complet (sur les poutres supports, la structure métallique et la couverture en verre) a été effectué par différentes méthodes très précises.

La phase de surveillance des évolutions irréversibles de la structure va donc pouvoir commencer dans les prochains mois ; elle se traduira par un nouveau mode d'exploitation des données, susceptible de différencier les phénomènes «quotidiens» déjà quantifiés, des phénomènes anormaux ou conduisant à une évolution irréversible.

Sur un plan plus général, la méthodologie mise en place et les nombreuses techniques utilisées pour contrôler la structure, illustrent la richesse et la puissance des outils dont disposent actuellement les ingénieurs pour mieux appréhender les risques de dégradation et donc mieux assurer le suivi et la pérennité des structures modernes ou complexes.