

L'instrumentation des ouvrages au service de la recherche de l'origine des désordres : l'église Saint-Bernard (Lyon)

**F. EMERIAULT
L. VINET**

INSA-Lyon, LGCIE
Bât. J.C.A. Coulomb
34, av. des Arts
69621 Villeurbanne Cedex
fabrice.emeriault@insa-lyon.fr
louis.vinet@insa-lyon.fr

M. PIEDEVACHE

Solexperts France
Immeuble Escurial
17, av. de la Forêt de Haye
54500 Vandœuvre-lès-Nancy
info@solexperts.fr

**G. PASINI
N. BOUILLOD**

Direction Sécurité Prévention
Ville de Lyon
1, rue de la République
69001 Lyon
georges.pasini@mairie-lyon.fr
nicole.bouillod@mairie-lyon.fr

Résumé

Depuis sa construction, l'église Saint-Bernard de Lyon est le lieu de désordres structurels et géotechniques dont l'origine n'est pas clairement identifiée. La communication présente les résultats sur une période de 30 mois d'une instrumentation en continu de l'ouvrage permettant de mieux cerner les raisons de ces désordres et jouant également le rôle de système d'alerte pour la collectivité responsable de l'ouvrage. L'instrumentation doit, in fine, conduire à la définition de la réponse la plus adaptée au problème du devenir de cette église.

Mots-clés : instrumentation, désordres, tassement, fissuration, monument historique, effet de la température.

Instrumentation of buildings, a tool for the determination of the origin of damage : the case of Saint-Bernard church (Lyon)

Abstract

Since its construction, the St Bernard church of Lyon is the place of structural and geotechnical damage the origins of which are not clearly identified. The communication presents the results of a comprehensive monitoring of the structure over a period of 30 months allowing to shed some light on the reasons for such damage. The monitoring is also used as an alarm system for the community responsible for the church. The instrumentation should lead, in fine, to the definition of the most adequate answer to the problem of the future of this church.

Key words : monitoring, damage, settlement, crack opening, monument, temperature effect.

Introduction

Les versants des collines de la ville de Lyon – appelés localement Balmes – sont répertoriés comme des zones potentiellement instables. Ces versants sont sous la surveillance du Service des Balmes de la Ville de Lyon, et tout désordre lié au sol est soumis à l'appréciation d'une commission d'experts en géologie et géotechnique, la Commission des Balmes (Vinet et Mongereau, 1994 ; Emeriault et Vinet, 2003, 2004). C'est ainsi que ce service et cette commission doivent gérer actuellement des désordres survenus sur un édifice religieux construit en 1874 sur les pentes de la Croix-Rousse, l'église Saint-Bernard. Apparues rapidement après sa construction, des fissurations de l'édifice avaient entraîné d'importantes reprises en sous-œuvre de certaines fondations. Des déformations sont nouvellement apparues il y a une vingtaine d'années. Le Service des Balmes a été saisi du problème, chargé d'en découvrir les causes ainsi que d'envisager les moyens de le résoudre.

Une reconnaissance géotechnique complète ayant été conduite, des anomalies ont été repérées dans le sous-sol mais sans apporter encore d'explication définitive aux mouvements et désordres. Des hypothèses géotechniques et architecturales s'opposent pour l'explication des phénomènes observés.

Le parti retenu pour l'heure consiste à mesurer le plus finement possible les déformations en cours afin de les interpréter de la manière la plus exacte. L'instrumentation mise en place depuis mars 2004 remplit un double objectif d'alerte et d'analyse. Cette dernière permettra, à partir de mesures obtenues sur le long terme, une identification claire des causes de déformation et la définition d'une réponse technique et économique adaptée. L'instrumentation a ainsi pour vocation d'aider la collectivité à choisir une option définitive sur le devenir de l'ouvrage.

L'église Saint-Bernard : les désordres et leur prise en compte par la municipalité

L'église Saint-Bernard, conçue par l'architecte Tony Desjardins dans un style néogothique, est située dans les pentes de la colline de la Croix-Rousse sur le territoire du 1^{er} arrondissement de la Ville de Lyon (Fig. 1a). Sa construction a débuté en 1863 mais n'a pu être complétée par manque de financement (la façade sud, le clocher ainsi que l'escalier monumental devant desservir la place Colbert en contrebas n'ont pu être réalisés). De nombreux désordres ont pu être observés depuis la construction jusqu'à nos jours : on notera en particulier qu'un confortement des fondations sud-ouest a été nécessaire suite à des désordres induits par le percement à proximité du tunnel du funiculaire en 1889. Jusqu'en 1900, des fissurations de la structure sont observées dans l'ensemble de la partie sud de l'ouvrage et réparées (Fig. 1b et c). En 1970 et de manière plus importante en 1992, une reprise des mouvements est observée qui conduit les services municipaux à demander la fermeture définitive de l'ouvrage au public et la mise en place de dispositifs de surveillance simples (points topographiques, témoins de plâtre sur fissures et inspection du réseau de galeries sous-jacentes). Une accélération des mouvements en 1998 conduit à la mise en place d'étampage intérieur des voûtes les plus endommagées (angle sud-est). L'amplitude des tassements observés depuis 1992 est plurimillimétrique et augmente graduellement depuis le chœur au nord (pas de mouvement) jusqu'à la façade sud (Fig. 2). Des mouvements sont également observés dans la galerie située à l'aplomb de cette façade.

L'église Saint-Bernard est positionnée sur le rebord sud-est de la colline de la Croix-Rousse (altitude 240 m) qui forme un promontoire dominant au sud la

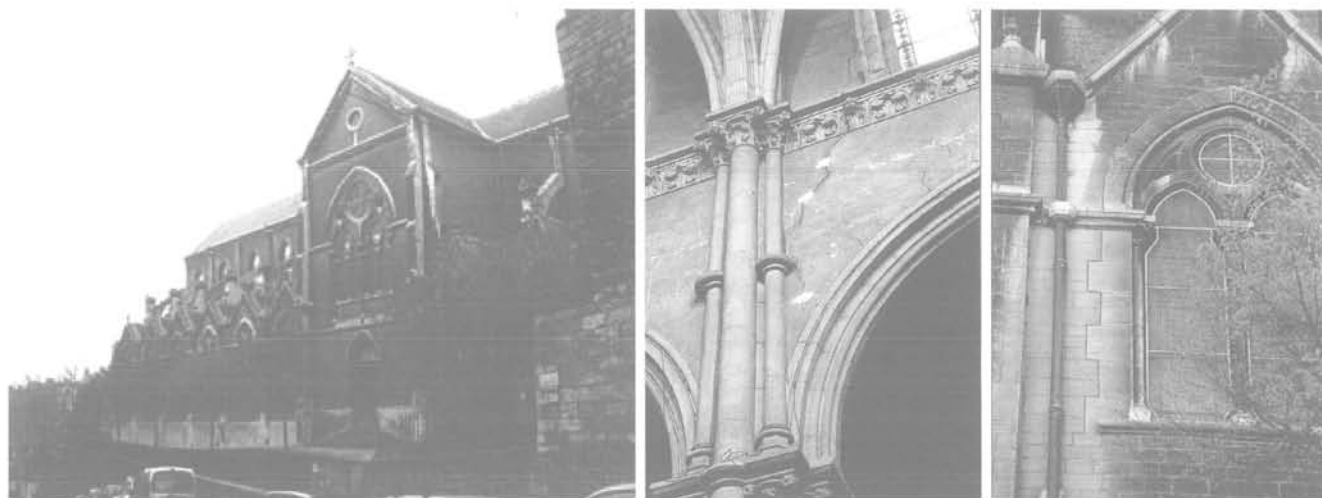


FIG. 1

Vue générale de l'ouvrage (vue depuis la montée Saint-Sébastien à l'est) et exemples de désordres intérieurs et extérieurs.

General view of the building (view from the Montée Saint-Sébastien to the East) and examples of inner and outer damages.

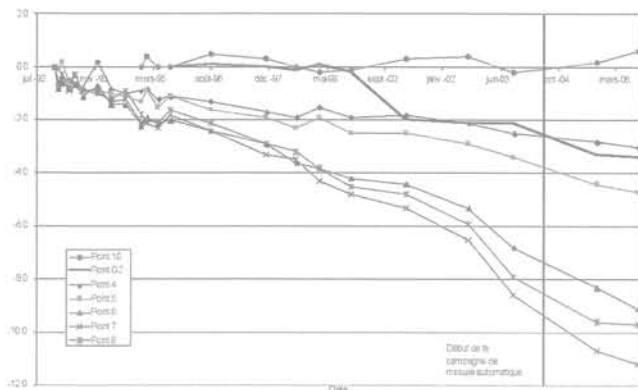


FIG. 2 Mesures de tassement de points en pied de façade sud (6, 7 et 8), des chapelles est (4, 5 et 6), dans le chœur nord (10) et en galerie (G2 situé au droit de la façade sud).

Settlements of points located at the bottom of the south facade (6, 7 and 8), of the east chapels (4, 5 and 6), in the north choir (10) and in the gallery (G2 located directly below the south facade).

« presque », zone historique urbanisée entre Rhône et Saône. D'un point de vue géologique (Vinet, 1991 ; Mongereau, 2001 ; Mongereau et Vinet, 2004), cette colline s'appuie sur une ossature granito-gneissique recouverte sur le flanc est par des sables molassiques fins et compacts, localement grésifiés en lentilles et en plaque, déposés par la mer Miocène à l'Helvétien. A partir de l'altitude 200 m (Fig. 3), ces deux formations disparaissent sous des argiles silteuses jaunes, continentales, puis des argiles sableuses, kaki ou ocre selon leur degré d'oxydation, à gravier feldspathique, en provenance du Massif central. Cet ensemble témoigne d'un colmatage continental de toute la zone qui se termine au Miocène par des argiles limoneuses jaunes à grisâtres. Des argiles et des sables fins beiges plio-villafranchiens mettent un terme à ce remplissage jusqu'à la cote 225 m approximativement. Cet ensemble est alors raviné par les glaciers du Quaternaire qui déposent des moraines internes, sablo-graveleuses, puis frontales, argilo-limoneuses à graves et blocs. Enfin, des loess sont déposés çà et là et sont plus ou moins préservés par l'érosion superficielle. Après le retrait des glaciers, le Rhône et la Saône installent leurs cours et s'enfoncent progressivement jusqu'à atteindre leur

cote actuelle. L'activité colluvionnaire résultante fait que le long de la pente entre le plateau et les alluvions des cours d'eau, un manteau de plusieurs mètres de moraines glissées et remaniées tapissent le versant et dissimule la série précédemment décrite. L'installation de la ville de Lyon ajoute des terrains fortement anthropisés qualifiés de remblais.

Le site de l'église Saint-Bernard a été remodelé à l'horizontale le long de la montée Saint-Sébastien au moyen d'un prisme de remblais qui repose sur de la moraine colluvionnée puis sur les argiles pliocènes beiges, les argiles silteuses et enfin sur les argiles graveleuses vertes ou kaki. Cette dernière formation est spécialement aquifère, du fait de sa granulométrie constratée et contient donc des ouvrages de captage anciens dont quelques-uns sont connus et entretenus tandis que d'autres peuvent exister à l'insu des habitants et dans un état plus ou moins effondré. Par ailleurs, il faut préciser la grande hétérogénéité verticale des argiles limoneuses et silteuses où peuvent alterner dans un contexte finement lité, argile très plastique, sable fin, limons et même des lentilles grésifiées. D'où une certaine difficulté à les définir au niveau de leurs caractéristiques géotechniques.

De ce point de vue (Fondaconseil, 2002), l'ouvrage s'insère dans un contexte fortement pentu, les fondations réalisées en escalier (Figs. 4 et 5) sont ancrées dans la couche de moraine. Le remblaiement important entre les plots de fondation a permis d'obtenir une plate-forme horizontale sur laquelle repose la superstructure de l'église. A l'interface entre les moraines et les argiles pliocènes se développe un réseau de galeries anciennes (Fig. 6). Malgré les recherches, des doutes persistent sur l'existence d'autres galeries non répertoriées ou de vides et décompressions (comme peuvent les traduire les fontis observés lors de la construction récente d'un immeuble voisin). La proximité du tunnel du funiculaire induit également des vibrations régulières dans la structure. La figure 4 présente deux coupes géologiques interprétatives dans les deux principaux axes de l'ouvrage. Les principales caractéristiques géotechniques de ces formations mesurées par des essais pénétrométriques ou pressiométriques sont données dans le tableau I. Pour ce qui est des argiles pliocènes (ici de couleur beige et grise), des essais de laboratoire ont permis de déterminer les

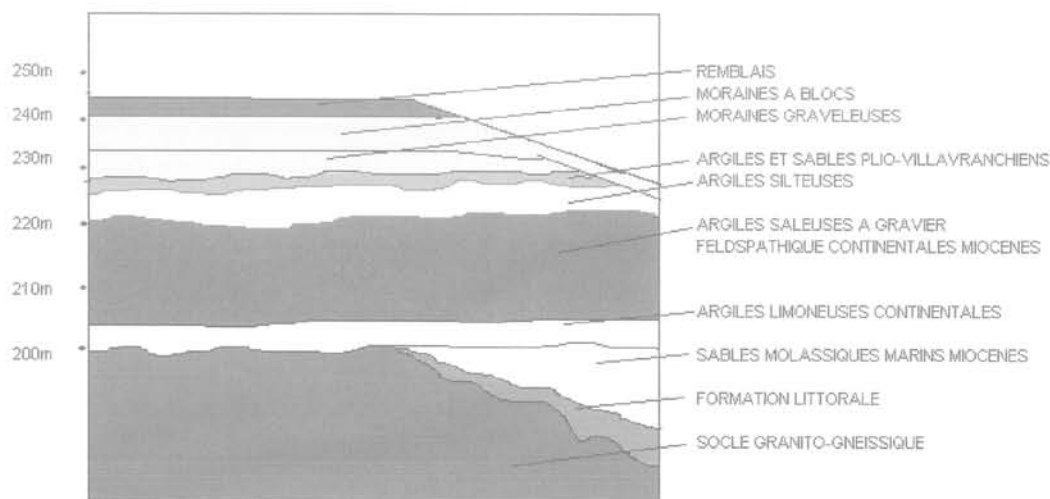


FIG. 3 Coupe géologique type de la colline de Croix-Rousse.
Typical geological profile of the Croix-Rousse hill.

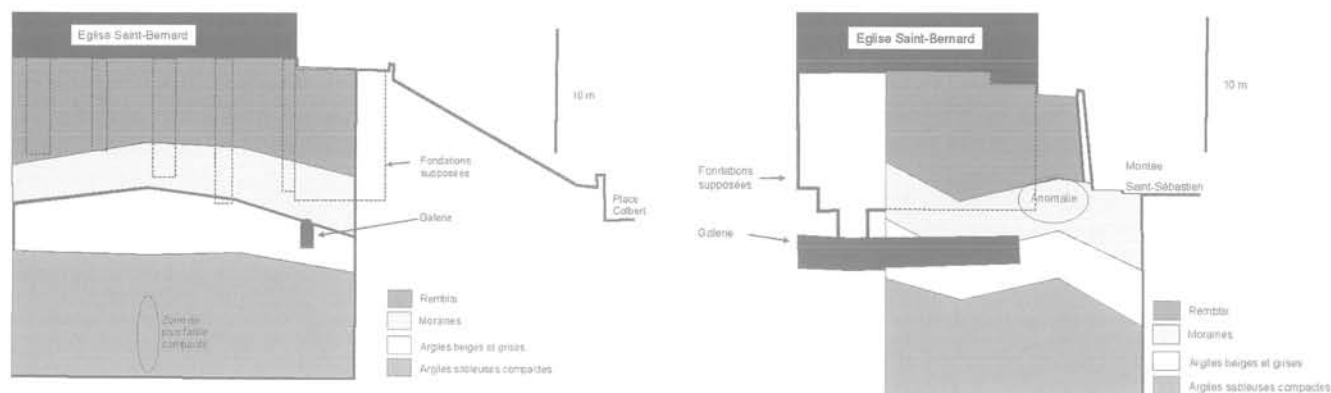


FIG. 4 Coupe géotechnique interprétative au droit de l'église (d'après Fondaconseil, 2002) : a) Nord-Sud, dans l'axe de l'église ; b) Ouest-Est, au droit de la façade sud.
Geotechnical profile below the church (from Fondaconseil 2002) : a) North-South, in the church centre line ; b) West-East, at the level of the south facade.

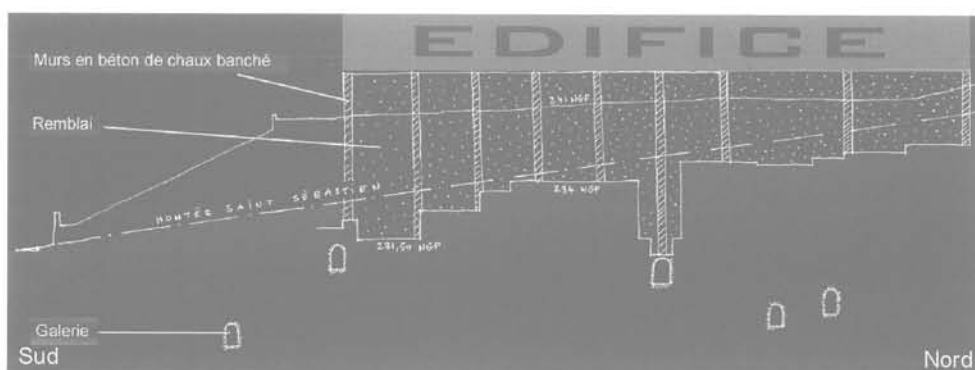


FIG. 5 Coupe Sud-Nord schématique des fondations et implantation des galeries connues.
Schematic South-North view of the foundations and location of the know galleries.



FIG. 6 Localisation des galeries connues sous l'emprise de l'église.
Location of the know galleries below the church.

caractéristiques nécessaires à l'évaluation des tassements et des temps de tassements (Tableaux II et III). On notera, d'une part, l'état de surconsolidation assez peu marqué de ces matériaux malgré la présence au Quaternaire de glaciers sur le territoire lyonnais et, d'autre part, le caractère très plastique et compressible de ces matériaux. De plus les argiles de couleur grise démontrent un caractère gonflant. Des échantillons d'argiles prélevés à la même altitude mais sur un site voisin de 150 m ont montré un comportement très plastique (limite de liquidité $w_L = 60 \%$, indice de plasticité $I_p = 40 \%$ et limite de retrait de 12%). Les caractéristiques de résistance ont été mesurées par des essais triaxiaux CU + u et fournissent $c' = 30 \text{ kPa}$ et $\phi' = 27^\circ$ ainsi que $Cu_0 = 130 \text{ kPa}$ et $\lambda_{cu} = 0,37$.

Pour expliquer les désordres, deux hypothèses sont, pour l'instant, développées :

- une origine géotechnique : les désordres sont causés par des mouvements de sols résultant :
 - de la pente et des caractéristiques mécaniques des argiles (à l'origine du fluage en particulier) et du terrain de couverture ;

TABLEAU I Principales caractéristiques mécaniques des formations rencontrées.
Main mechanical characteristics of the different geological formations.

Formation	Essai pressiométrique		Essai pénétrométrique
	Pression limite p_l (MPa)	Module pressiométrique E_{in} (MPa)	Résistance de pointe q_c (MPa)
Moraines	1,3	15	7
Argiles beiges et grises	0,8	10	3
Argiles sableuses	3	80	7

TABEAU II Identification des argiles beiges et grises.
Identification of the beige and gray clays.

Formation	Classe GTR	Teneur en eau naturelle w (%)	Valeur de bleu VBS
Argiles beiges	A2	28	3,4
Argiles grises	A4	38	11,3

TABEAU III Caractéristiques œdométriques des argiles beiges et grises.
Oedometric characteristics of the beige and gray clays.

Formation	Coeff. de consolidation C_v (m^2s^{-1})	Coeff. de compression C_c	Coeff. de consolidation secondaire C_{α}	Contrainte de préconsolidation σ'_c (kPa)	Degré de surconsolidation OCR
Argiles beiges	$1,1 \cdot 10^{-7}$	0,20	$3 \cdot 10^{-3}$	200	1,25 à 1,5
Argiles grises	$7,0 \cdot 10^{-9}$	0,74	$2,5 \cdot 10^{-3}$	500	2

– de la présence de vides, décompression ou galeries non connues en cours d'affaissement au droit de l'angle sud-est de l'église (responsables des anomalies notées lors des reconnaissances par forages destructifs et reportées sur la figure 4) ;

– et amplifiés par les vibrations dues au fonctionnement du funiculaire ;

• une origine structurelle (Repellin, 2003) : les désordres sont liés à une rotation de la façade qui, n'ayant pas été achevée, n'est pas butée par le clocher et les contreforts de la façade définitive. Des profils de verticalité ayant été réalisés par tachéomètre laser (Fig. 7) montrent que la façade est inclinée de 7 cm au maximum vers le sud mettant en évidence un double mécanisme de rotation avec une pente de 2° jusqu'à environ 9 m de haut puis de 5° jusqu'au sommet de la façade (environ 16 m). Les désordres peuvent avoir été amplifiés par l'infiltration d'eaux en divers points de la structure mais aussi en pied de façade (au niveau de fissures existantes ou des fosses de fondation non étanchées de la façade sud actuelle).

L'église ayant été désacralisée en 1999, la Ville de Lyon est désormais responsable de l'ouvrage. Elle doit

en particulier assurer le suivi et la gestion des désordres mais aussi définir quel peut être l'avenir de l'église (destruction, confortement...). A l'heure actuelle, aucun scénario n'ayant été particulièrement privilégié, le service Sécurité de la Ville de Lyon a pris comme parti de mesurer le plus finement possible les déformations en cours afin de les interpréter de la manière la plus exacte. Un protocole alliant plusieurs capteurs reliés à une centrale d'acquisition et de transmission a été mis en place depuis mars 2004. Cette instrumentation remplit un double objectif :

– par des niveaux d'alerte définis pour chaque capteur, le Service des Balmes peut gérer au jour le jour le risque d'aggravation rapide des désordres et la mise en oeuvre de protection du public (périmètre de sécurité, évacuation...) ;

– l'analyse des résultats de mesure sur le long terme permettra une identification claire des causes de déformation et la définition d'une réponse technique et économique adaptée. L'instrumentation a alors pour vocation d'aider la collectivité à choisir une option définitive sur le devenir de l'ouvrage.

3

Le dispositif de mesures

Le dispositif de mesures mis en place par la société Solexperts a été conçu conjointement par le Service des Balmes et la Commission des Balmes de manière à pouvoir, de part la complémentarité des mesures effectuées, renseigner sur le type de sollicitations et de mouvements auxquels est soumis l'ouvrage, en particulier les zones concernées par des désordres.

Ainsi ont été installées des mesures de nivellement automatique par cibles à codes barres sur divers éléments porteurs de la structure (piliers et façades), des mesures d'ouvertures de fissures (diverses localisations et orientations de fissures existantes plurimillimétriques), des mesures d'inclinaison par pendules (diverses orientations et plusieurs points de mesures sur une verticale pour obtenir une allure de la déformation d'un pilier et de la façade). Enfin, des mesures de température permettent d'évaluer l'effet des variations journalières et saisonnières sur le comportement de la structure.

L'acquisition automatique de l'ensemble des données avec une fréquence variant de 4 à 12 mesures par jour sur le logiciel GeoMonitor et la transmission par modem au siège de Solexperts (Zurich, Suisse) permet un traitement instantané des données, la vérification de

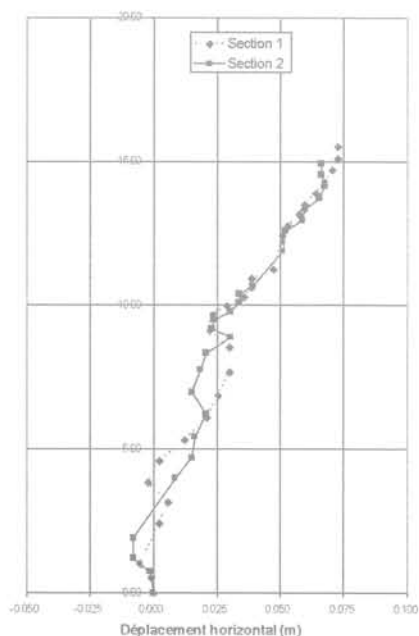


FIG. 7 Profil de verticalité réalisé sur la façade (d'après Repellin 2003).
Vertical profile of the facade (from Repellin 2003).

critères d'alerte pré-définis, l'information en temps réel du service Sécurité de la Ville de Lyon, mais aussi une mise à disposition en temps réel des résultats sur le site web de l'entreprise (via le logiciel WebDavis).

Le dispositif de mesure (Fig. 8) inclut 10 points de mesure de nivellement (L1 à L10) ainsi que trois points situés à l'intérieur de l'église (au nord, coté chœur) servant de référence au niveau digital motorisé. Les fissuromètres F1, F3, F5 mesurent les ouvertures de fissures centimétriques pré-existantes au niveau de la corniche séparant la nef du bas-côté est. F2 est associé à F5 et mesure le déplacement horizontal relatif des lèvres de la fissure parallèlement à celle-ci. Enfin F4 et F6 sont positionnés de façon symétrique sur des fissures également centimétriques visibles sur les arcs des voûtes séparant la nef des bas-côtés et en contact avec la façade intérieure. Enfin, le pendule vertical 1 d'une hauteur totale de 7,8 m mesure les inclinaisons d'un pilier intérieur de l'ouvrage dans deux directions orthogonales et en deux points alors que le pendule 2 (hauteur 7,9 m) détermine les mouvements de l'intérieur de la façade sud perpendiculairement à celle-ci.

4

Les premiers résultats

La campagne de mesures a débuté fin mars 2004 (Ferrari et Garcia, 2004) ; les résultats obtenus jusqu'à début octobre 2006 sont présentés par la suite. Cette durée totale de plus de 30 mois permet en particulier de déterminer l'impact des variations de température sur les mouvements observés, de proposer une « correction » des mesures des effets cycliques de la température et d'évaluer les accumulations de déformations résultant d'un cycle annuel.

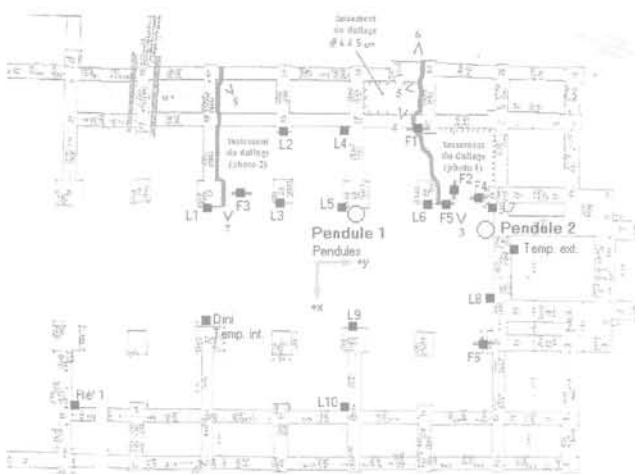


FIG. 8 Implantation des différents instruments de mesure :

- L1 à L10 : points de nivellement par codes barres ;
 - F1 à F6 : fissuromètres avec indication de la direction de mesure de l'ouverture de fissure ;
 - Dini : position du niveau automatique ;
 - Ref1 : position d'un des points de référence pour le nivellement.
- Position of the different measuring devices :
- L1 to L10 : levelling points with codes ;
 - F1 to F6 : crack measurement apparatus with indication of the direction of the crack opening measurement ;
 - Dini : position of the automatic level ;
 - Ref1 : position of one of the reference points for levelling.

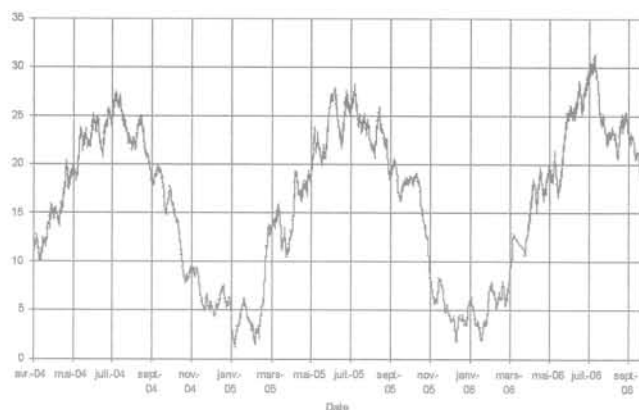


FIG. 9 Variation de la température mesurée à l'intérieur de l'ouvrage.

Temperature variation measured inside the structure.

4.1

Correction de l'effet de la température

En ce qui concerne la température, il est à noter que les températures extérieure et intérieure à l'ouvrage sont mesurées. Si les écarts maximum entre ces deux valeurs atteignent + 17 °C en été et - 7 °C en hiver, l'écart est en général limité à ± 3 °C. Dans la suite de l'analyse, on « corrigera » l'ensemble des mesures par rapport à la température intérieure, c'est-à-dire que l'on essaiera de faire abstraction des variations saisonnières en grande partie réversibles en retranchant des valeurs mesurées une quantité proportionnelle à la variation de température depuis la mise en place de l'instrumentation. Le coefficient de proportionnalité est calé sur un cycle annuel complet de mesure.

4.2

Mesures de nivellement

Les mesures de nivellement des 10 codes barres s'avèrent d'une part très corrélées avec la température intérieure et d'autre part très semblables entre elles (peu de mouvement différentiel notable). La figure 10 montre les résultats obtenus pour le point L1 : une correction linéaire avec la température permet de calculer les mouvements verticaux « vrais » du point, c'est-à-dire non affectés des variations saisonnières et de la respiration du ter-

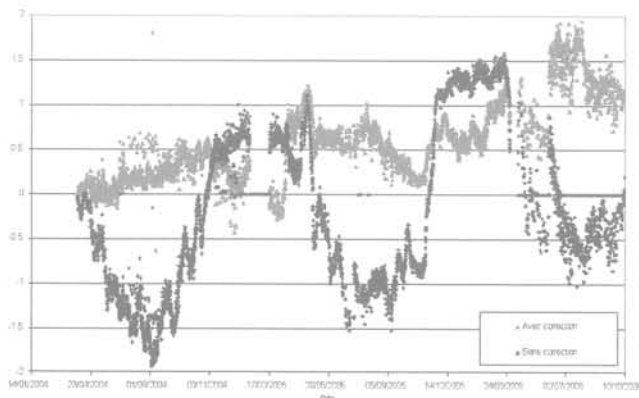


FIG. 10 Mesure de nivellement du point 1 (avec et sans « correction » en température).

Results of the levelling of point 1 (with and without "correction" with temperature).

rain et de l'ouvrage ; l'amplitude des mouvements est ramenée de 3,5 mm à moins de 2 mm (1 mm en moyenne) sur l'ensemble de la campagne de mesure. Ces mesures sont compatibles avec les amplitudes de mouvements mesurés ponctuellement par la campagne de suivi topographique classique (Fig. 2) qui, malgré la mise en place de l'instrumentation automatique, a été conservée à un rythme réduit d'une mesure par an : le chœur est stable, les points en pied de façade ont tassé d'environ 1 à 1,5 mm.

4.3

Ouvertures de fissures

L'analyse conjointe des ouvertures de fissure et de la température permet également de définir une « correction » linéaire à apporter aux mesures. La figure 11 montre l'effet de cette correction sur le fissuromètre F1 : on voit clairement apparaître une accumulation des déformations sur un cycle annuel complet (ici une ouverture de l'ordre de 0,5 à 1 mm par année est observée entre mai et septembre). La même démarche appliquée aux autres fissuromètres permet de conclure (Fig. 12) que :

- F1, F3 et F5 situés du côté est de l'église et mesurant des déplacements parallèles à l'axe de la nef présentent sensiblement le même comportement et des amplitudes voisines (ouverture de 0,5 mm par an) ;
- F2 montre un déplacement relatif tangentiel entre les deux parties de la fissure sur laquelle F5 est également positionné ; ce déplacement de l'ordre de 0,25 mm par an est bien corrélé à l'ouverture de la fissure ;
- F4 et F6 ne présentent pas de mouvement significatif (ils ne sont pas représentés sur la figure 12) : ils sont positionnés sur des fissures qui, même si elles présentent une ouverture importante, ne semblent plus être sollicitées par le mécanisme de déformation global de l'ouvrage.

4.4

Mesures d'inclinaison

Les mesures d'inclinaison de deux éléments porteurs (façade et pilier) sont réalisées à l'aide de pendules d'environ 8 m de haut. Le pendule 2 est fixé sur la façade et permet de mesurer les déformées (déplacements et rotation) relatives au point d'ancrage perpendiculairement à la façade (axe nord-sud).

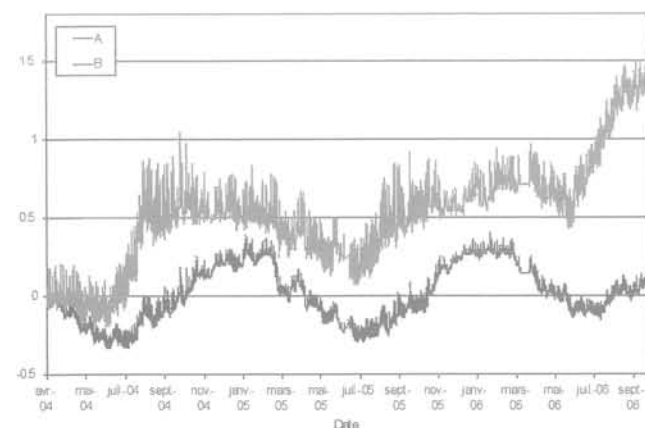


FIG. 13

Mesures de déplacements de la façade par rapport au pendule (A et B resp. à 2,5 et 7,9 m de l'axe du pendule) sans et avec « correction » en température.

Displacements of the facade measured with the pendulum (A et B resp. located at 2.5 and 7.9 m (from the pendulum axis) with and without "correction" with temperature.

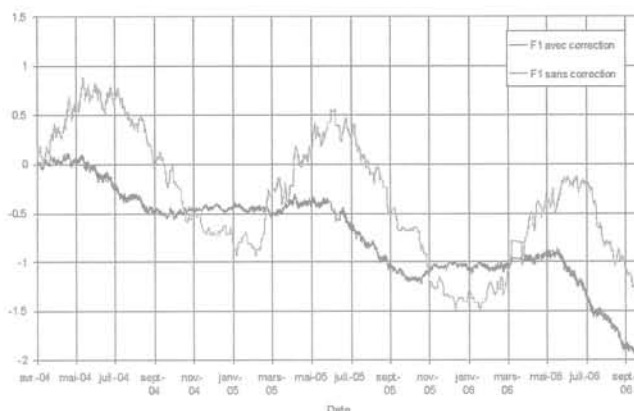


FIG. 11

Évolution de l'ouverture de la fissure F1 (avec et sans « correction » en température). Evolution of the opening of crack F1 (with and without "correction" with temperature).

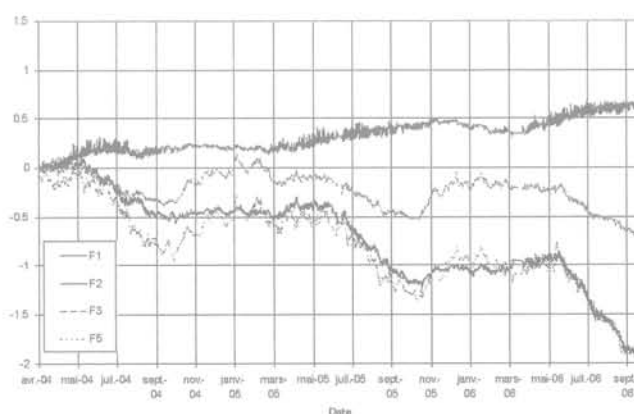
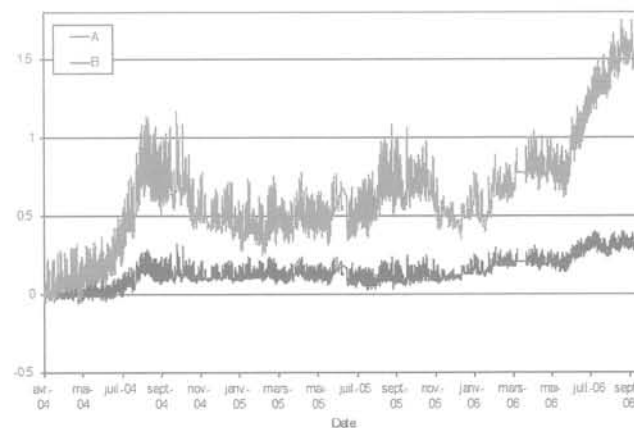


FIG. 12

Évolution des ouvertures de fissure (avec « correction » en température). Evolution of the opening of cracks (with "correction" with temperature).

La figure 13 montre que la correction avec la température est très pertinente pour le point A le plus haut (« bras de levier » de 2,47 m) : un déplacement constant de 0,15 mm apparaît après 6 mois de mesure ce qui correspond à la première phase d'augmentation de la température. Une augmentation identique est observée en avril 2006. Pour le point B, la distance de mesure étant plus grande (7,88 m soit 3,2 fois le bras de levier pour



A), des phénomènes parasites apparaissent qu'une simple correction linéaire avec la température ne peut gommer. Néanmoins on observe bien, dans ce cas également, le développement d'un déplacement sensiblement constant voisin de 0,45 mm après 6 mois de mesure et une deuxième augmentation notable en avril 2006 portant le déplacement à 1,5 mm environ. Ainsi, une fois que la correction des effets cycliques de température est appliquée, on constate que le rapport entre

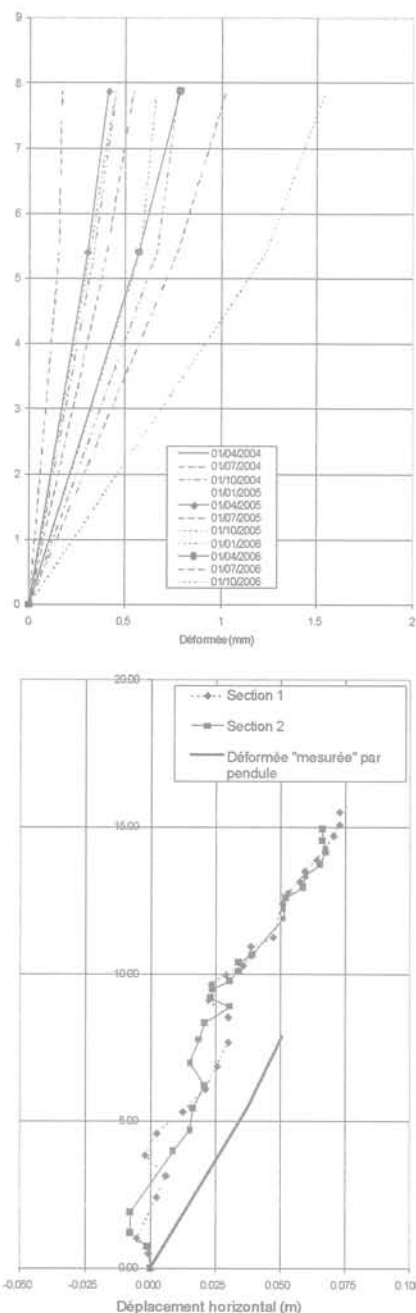


FIG. 14

a) Allure des déformations de la façade à partir des mesures « corrigées » du pendule ; b) comparaison du profil actuel avec une extrapolation sur l'ensemble de la durée de vie de l'ouvrage de l'accumulation annuelle régulière de déplacements horizontaux.

a) Deformations of the facade determined from the "corrected" results of the pendulum and b) comparison of the present vertical profile with an extrapolation over the whole life of the structure of the regular annual accumulation of horizontal displacements.

les deux déplacements (0,15 et 0,45 mm soit un rapport de 3 pour la première augmentation et 0,3 et 1,5 mm soit un rapport de 5 pour les mouvements depuis avril 2006) est proche de celui des « bras de levier ». Ceci permet de conclure que, majoritairement, une rotation d'ensemble de la façade est observée.

Pour le pendule 1 fixé sur un pilier du côté est de la nef, les mesures montrent un comportement similaire, même si les déplacements sont plus faibles dans la direction longitudinale de la nef (au maximum 0,2 mm) et quasi nuls dans la direction perpendiculaire.

Enfin, il est intéressant de noter que la rotation globale de la façade mesurée après 6 mois de mesure et à partir d'avril 2006 (correspondant à des déplacements de 0,45 et 1,5 mm sur environ 8 m de haut) est compatible avec les mesures issues des fissuromètres F1, F3 et F5 situés sur une corniche de la nef centrale à une hauteur voisine de celle de l'ancrage du pendule 2 (donnant des déplacements irréversibles de 0,5 et 2 mm respectivement après 6 mois de mesure et à partir d'avril 2006).

La figure 14, d'une part, présente une évolution de la déformée de la façade sud de l'église depuis la mise en place de l'instrumentation, d'autre part, compare le profil actuel de l'église mesuré par tachéomètre laser avec une extrapolation sur 130 ans (soit de 1874 à 2004) de l'inclinaison de la façade résultant d'une accumulation annuelle régulière de déplacements. Si le profil actuel n'est pas exactement retrouvé, l'inclinaison générale de la façade est en revanche bien représentée.

5

Interprétation des mesures et origine possible des désordres

L'ensemble des résultats présentés montre tout d'abord qu'il est primordial d'être capable de faire abstraction des effets de la variation saisonnière des températures et d'autre part de mener une campagne de mesure sur une période assez longue (plusieurs années) pour pouvoir identifier les phénomènes cumulatifs même de faible amplitude. Une fois le travail de correction effectué sur les mesures de l'église Saint-Bernard, il s'avère que depuis mars 2004 :

- le nivellement de plusieurs points à l'intérieur de l'église donne une amplitude de mouvement faible (au regard de la précision de la mesure automatique par le niveau utilisé) : il semble donc qu'il n'y ait pas de mouvement notable du sol sous le niveau d'assise des piliers et autres éléments structuraux mais que celui-ci se fasse au niveau du dallage et qu'il intéresse donc le remblai utilisé pour combler les espaces entre les murs porteurs. Ces mesures sont cohérentes avec les évaluations de tassement de fluage basées sur les caractéristiques oedométriques des argiles beiges et grises (Tableau III) ;
- les différents fissuromètres installés indiquent un mouvement global d'ouverture des fissures orientées est-ouest (perpendiculaire à l'axe de la nef centrale) qui s'accumule au rythme régulier de 0,5 mm par an et correspond à un mouvement vers l'aval de la façade ;
- parallèlement, les mesures d'inclinaisons par pendule semblent indiquer une rotation d'ensemble de la façade de l'église correspondant à un déversement vers l'aval. Ce résultat conforte l'hypothèse structurelle de manque de reprise des efforts horizontaux de la structure par la façade inachevée et donc faiblement contreventée.

Il est néanmoins indéniable qu'entre 1992 et 2003 des mouvements de sol ont été mesurés (au maximum 50 mm de tassement sur les dallages à l'intérieur de l'église et 2 mm en cinq ans sur les piliers). Par ailleurs, à l'extérieur de l'ouvrage, en particulier en pied de façades sud et est, les tassements mesurés ont été de l'ordre de 0,7 mm par an. La figure 2 montre également que pendant les 30 mois de la campagne de mesure automatique, les points situés en galerie sous la façade ont tassé d'environ 1 mm.

Ainsi, on peut donc supposer que les mouvements observés avant la mise en place de l'instrumentation et en particulier leur aggravation en 1999 étaient liés non seulement à une « instabilité » structurelle de l'ouvrage de faible ampleur qui s'accumule après chaque cycle annuel de température mais également à des infiltrations d'eau mal ou non contrôlées. Parallèlement à l'installation du dispositif de mesure, des opérations de reprises des évacuations d'eau pluviale et d'étanchement des fosses de fondations en pied de façade sud ont été réalisées. Ceci peut expliquer qu'une rotation de la façade ait été observée sur les 6 premiers mois de mesure, puis que celle-ci se soit stabilisée. La poursuite de la campagne de mesure permettra de valider cette hypothèse.

6

Conclusion

L'instrumentation mise en place sur l'église Saint-Bernard de Lyon a été définie de façon à fournir des informations nombreuses et redondantes sur les mou-

vements de la structure (acquisition automatique de déplacements verticaux, d'ouvertures de fissures et d'inclinaison de pilier et de façade). L'exploitation de ces mesures sur une période de 30 mois permet de mieux comprendre les mécanismes entraînant l'apparition de désordres.

Il ressort que, si l'origine des mouvements était essentiellement géotechnique dans un premier temps, dans la période récente ceux-ci sont liés majoritairement à un défaut de la structure, en particulier de la façade inachevée et partiellement butée. Le rôle particulier du cycle de température annuel a pu être mis en évidence dans le développement lent des désordres (ouverture de fissures de 0,5 mm par an).

On retiendra de plus que le dispositif de mesure a également un rôle d'alerte en temps réel pour le service de Sécurité de la Ville de Lyon. Des seuils d'alerte ont été définis pour chacun des instruments : leur valeur définitive a pu être ajustée après l'analyse complète des résultats de mesure sur 30 mois d'observation. Le dispositif complet permettra d'assurer la sécurité du public tant qu'aucune décision n'aura été prise pour le devenir de cet ouvrage.

Au vu des résultats de la campagne de mesure, le service de Sécurité de la Ville de Lyon a décidé de mettre en place, courant 2007, un tirant métallique orienté suivant l'axe de la nef et positionné au niveau de la corniche supérieure (à proximité des fissures F3 et F5). Par sa mise en traction, celui-ci devrait permettre de limiter le développement de déplacements horizontaux annuels et donc d'empêcher les ouvertures de fissures et l'inclinaison de la façade sud de l'église.

Bibliographie

- Emeriault F., Vinet L. – Accidents et conduites de prévention dans le domaine des mouvements de terrain en site urbain: le cas de la Ville de Lyon. *Annales du Bâtiment et des Travaux Publics* 4, 2003, p. 25-39.
- Emeriault F., Vinet L. – Risque géotechnique en site urbain dense – Prévention des aléas fontis et effondrements de cavités souterraines par la collectivité territoriale de Lyon. *Proceedings of the Int. Conf. on Geotechnical Eng. GeoBeyrouth 2004*, May 19-22 2004, p. 185-190.
- Ferrari J.C., Garcia K. – *L'église Saint-Bernard*. Mémoire de projet de fin d'études, INSA de Lyon, 2004, 109 p.
- Fondaconseil – *Ville de Lyon, église Saint-Bernard*. Rapport d'étude géotechnique, 2002, 21 p. + annexes.
- Mongereau N. – *Géologie de Lyon*. Éditions lyonnaises d'art et d'histoire, 2001, 95 p.
- Mongereau N., Vinet L. – *Balmes – Note géotechnique*, 2004, 18 p., www.lyon.fr/vdl/sections/fr/securite/balmes_et_collines_1/.
- Repellin D. – *Église Saint-Bernard, consolidation, restauration et réutilisation de l'édifice*, Rapport d'étude préalable, 2003, 128 p.
- Vinet L. – *Typologie et prévention des risques et accidents géotechniques en site urbain : les collines de la Ville de Lyon entre 1977 et 1990*. Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 1991, 335 p.
- Vinet L., Mongereau N. – Risques naturels en site urbain : la crise pluviométrique de l'automne 1993 et ses conséquences sur la stabilité des terrains à Lyon. *Proc. 7^e Congrès Int. AIGI*, Lisbonne, septembre 1994, vol. 3, p. 1543-1547.