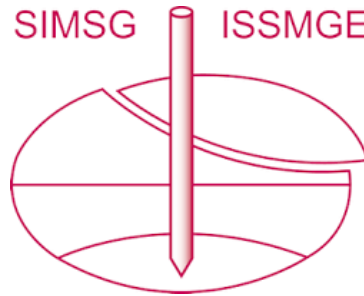


INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Confortation de la Cathédrale St Pierre à Genève

Underpinning of Saint Peter's Cathedral in Geneva

CH. COMTE
G. STENCEK

Ingénieur EPF-SIA Solexperts SA, Dufourstrasse 147 — Zurich
Ingénieur EPF-SIA Ingénieur Conseil, 8 Chemin Rieu — Genève

Résumé: La cathédrale St Pierre à Genève fait l'objet d'une restauration qui s'accompagne de fouilles archéologiques. Les sondages de reconnaissance ont montré que les fondations sont posées à faibles profondeurs, sur une succession de terrains fins quaternaires de 100 mètres d'épaisseur. Une confortation au moyen de 399 micro-pieux Ropress-Tubfix, reliés par une dalle de chaînage, améliore la stabilité pendant les excavations et à long terme.

Objet des travaux

La cathédrale St Pierre à Genève a été érigée entre 1150 et 1230 environ.

L'architecture est typique de la période de transition du style roman au style gothique. Le plan cruciforme est une variante du type bénédictin, avec chapelles latérales rectilignes de tradition cistercienne. Les murs romans massifs de la nef sont percés de petites fenêtres en plein cintre, alors que les piliers intérieurs et les voûtes à croisées d'ogives forment un ensemble gothique aux proportions harmonieuses.

Les deux tours, placées exceptionnellement sur le transept et la chapelle au sud du portail, sont postérieures, du XIV^e et XV^e S respectivement.

L'édifice a connu de nombreuses vicissitudes, la plus importante étant la démolition au XVIII^e S du narthex ancien et son remplacement par un porche monumental, néo-classique, qui constitue à tous points de vue un élément distinct.

D'importants travaux de restauration commencent en 1976 et comprennent un programme de 4 ans, de 1978 à 1982, pour ce qui concerne l'intérieur de la cathédrale. Parmi les objectifs, tels que ravalement des façades, dont les grès tendres et même les calcaires sont attaqués, figure le remplacement du système de chauffage placé sous le sol de la nef. Les travaux d'excavation s'accompagnent de fouilles archéologiques à l'intérieur et à l'extérieur de l'édifice. L'importance de celles-ci n'a fait que croître en raison de l'intérêt considérable des trouvailles. Elles embrassent maintenant toute la place et les rues voisines.

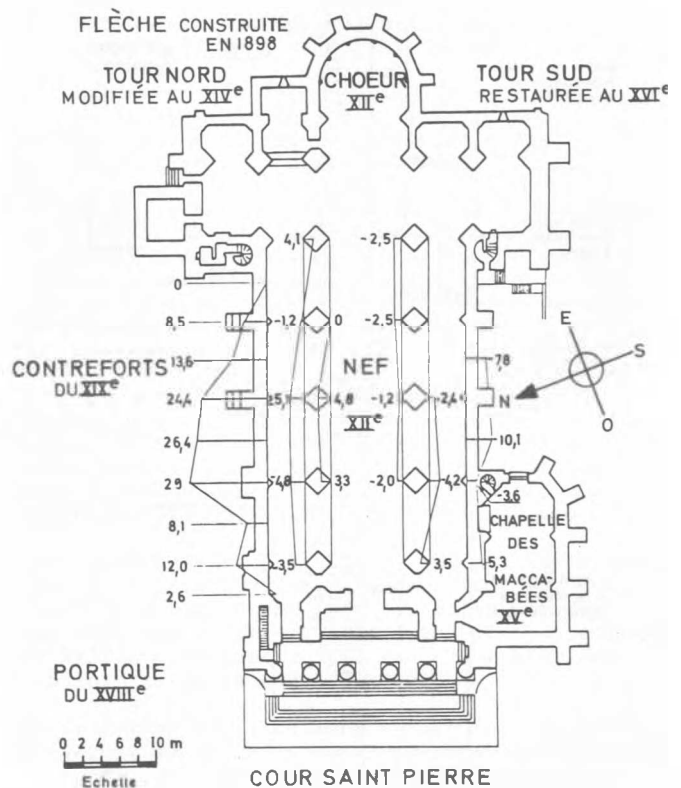
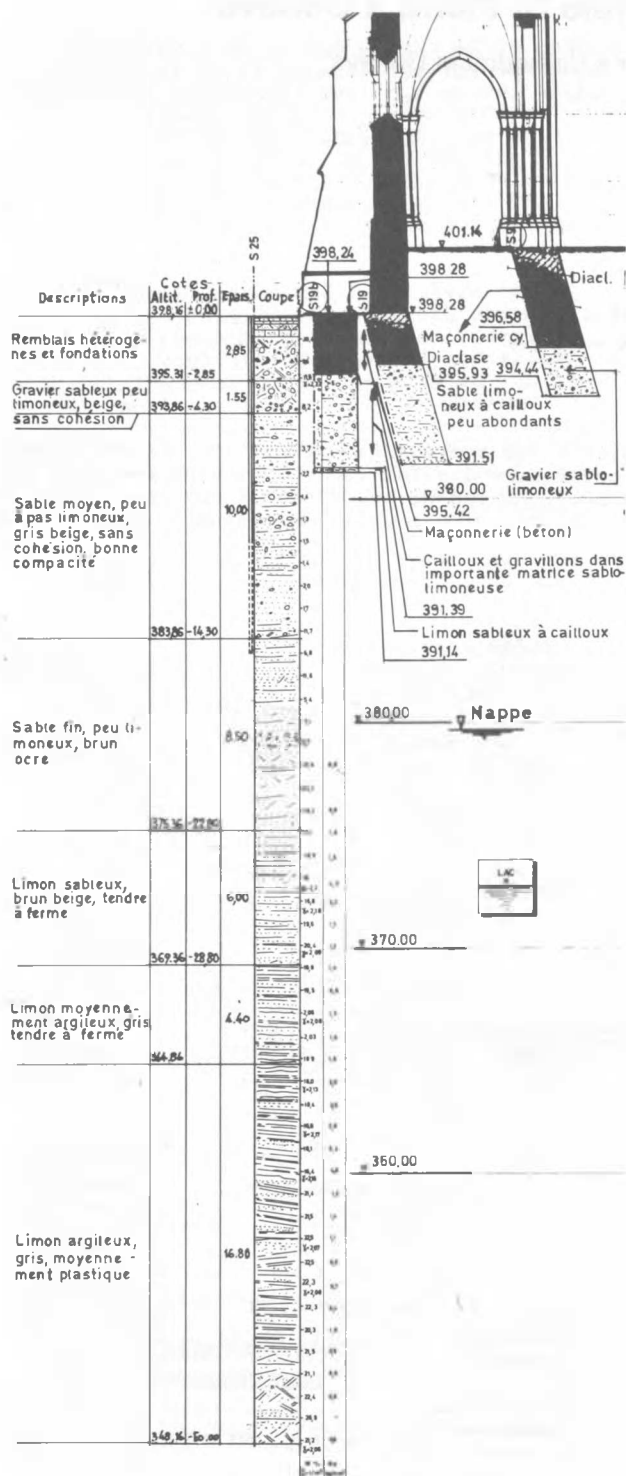


Fig 1 Plan avec valeurs des déformations mesurées à 9.00 m du sol intérieur (en cm)



Les auteurs ont été chargés, dès le début des travaux, de vérifier les conditions de stabilité lors des différentes phases d'exécution en étroite collaboration avec les architectes A. Galeras et E. Martin responsables de la restauration. Les études étaient particulièrement difficiles, comme c'est souvent le cas pour d'anciens édifices, en raison du manque de plans et de renseignements précis. En particulier on ne connaissait ni les dimensions, ni les profondeurs exactes, ni l'état des massifs de fondation. La superstructure avait fait l'objet de relevés minutieux au début du siècle¹⁾ mais on ne possédait pas d'éléments précis sur sa disposition à l'origine, ni surtout sur diverses reconstructions et interventions qui modifièrent le jeu des forces.

On constatait que le mur nord présentait un hors-plomb important de 32 cm et que le porche avait été reconstruit après avoir présenté au XVII^e S des signes évidents de risques d'écroulement.²⁾ (Voir Fig 1)

L'exécution de fouilles, devant atteindre 4 à 5 mètres autour des fondations, mettait celles-ci en danger.

Travaux de reconnaissance

Les travaux de reconnaissance furent conduits simultanément avec divers objectifs.

D'une part il s'agissait d'apprécier l'état de la structure et de déterminer avec suffisamment de précision la répartition des charges.

D'autre part il fallait examiner la qualité et les dimensions des fondations, ainsi que les caractéristiques du sous-sol.

L'inspection visuelle de la superstructure, le contrôle des dimensions et niveaux ont été complétés par un relevé photogrammétrique partiel de l'intrados des voûtes.

Le poids total de l'édifice est très proche de 26 000 t et il en résulte sur les divers éléments de fondation, des charges au sol entre 20 et 50 t/m², ce qui ne paraît pas très élevé. Les voûtes maçonnées sur la nef, sont en réalité de minces voiles très légers, en tuf calcaire, avec par endroit une épaisseur de moins de 25 cm. Il en résulte des poussées horizontales si réduites qu'elles ne peuvent en aucun cas expliquer le déversement des murs massifs extérieurs.

L'auscultation des maçonneries de fondation et la reconnaissance du sous-sol revêtaient de ce fait une importance particulière.

On a utilisé pour cela de nombreux puits et tranchées superficiels pratiqués à la main, mais surtout une série de forages mécaniques.

* (26 000 t métriques = 260 MN
20 et 50 t/m² = 200 et 500 KN/m²)

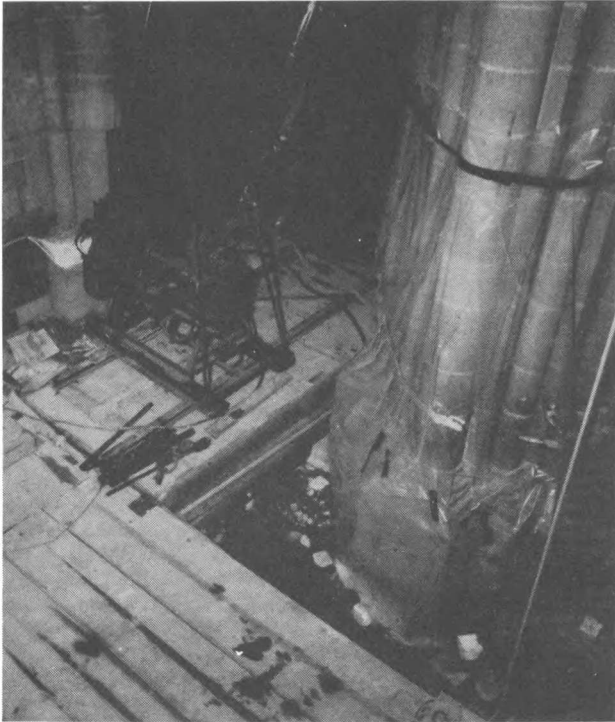


Fig 3 Exécution de forage dans la maçonnerie pour la pose de micro-pieux

19 sondages à rotation à diamant, inclinés, dans la maçonnerie ont livré un carottage continu de celle-ci et la profondeur exacte du niveau de fondation. Ils ont été prolongés de 2 à 3 m, pour donner une reconnaissance du sol sous-jacent. Dans le périmètre de la chapelle des Macchabées 3 sondages plus profonds et dans celui de la cathédrale 3 autres sondages, dont l'un à 50 m de profondeur (Fig 2), ont permis de préciser les conditions géologiques et géotechniques, au sujet desquelles subsistait à l'époque un certain nombre d'équivoques.

En fait, la cathédrale repose sur une colline étroite, constituée par près de 100 m de formations quaternaires provenant des phases de retrait des glaciers wurmiens. Au sommet, qui se trouve 30 m au dessus du niveau actuel du lac de Genève, on trouve une formation sablo-limoneuse contenant quelques horizons caillouteux d'épaisseurs limitées. Cette zone d'une vingtaine de mètres d'épaisseur est suivie par une zone limo-argileuse, qui passe elle-même à la zone argileuse non consolidée sur près de 50 m d'épaisseur, bien connue par les travaux dans les Rues Basses.

Ce n'est qu'à 70 m sous le lac, soit à 100 m sous la cathédrale, que l'on atteint une mince moraine de fond, garnissant les sillons d'érosion de la molasse grise chattienne.³⁾

Le niveau actuel de la nappe phréatique se situe à quelques 7 m au dessus du lac. On a pu s'assurer qu'il se trouvait au moyen-âge, à l'époque de la construction, à une douzaine de mètres plus haut. Il est descendu par étapes, correspondant au développement de l'agglomération, essentiellement parce que celui-ci coupait son alimentation.⁴⁾

De leur côté les forages dans la maçonnerie de fondation ont montré que celle-ci a été fondée à très faibles profondeurs, pratiquement au niveau du terrain vierge de l'époque préhistorique. Les massifs de fondation, qui en atteignant pour certains une hauteur de 5 m étaient importants pour les constructeurs de l'époque, n'ont fait que traverser divers remblais. Ceux-ci contiennent d'ailleurs des vestiges romains et les restes de 4 cathédrales successives.⁵⁾

Les maçonneries quant à elles sont au moins de 4 types distincts

- a) Maçonnerie cyclopéenne, formée de boulets de nature très hétérogène, liés par un mortier de chaux hydraulique, très résistant.
- b) Maçonnerie cyclopéenne à éléments essentiellement calcaires, moins soignée.
- c) Maçonnerie en gros moellons de molasse, de qualité générale bien inférieure.
- d) Maçonnerie de béton, placée lors des consolidations du XIXe S.

Il résultait de cette situation que l'ouverture de fouilles archéologiques très importantes et la création de locaux en sous-sol, pouvaient réduire considérablement la sécurité de l'édifice et même provoquer des désordres ponctuels graves, dans un ensemble de haute valeur historique et artistique.

Mais il a apparu encore plus important aux auteurs que la stabilité générale a été de tous temps insuffisante. Les conditions géologiques, défavorables, bien entendu insoupçonnées des constructeurs, sont à l'origine même des désordres graves apparus au cours des siècles.

Les restaurateurs précédents, qui ne disposaient pas de la technique nécessaire, n'ont pas reconnu la vraie nature des difficultés et ont appliqué des solutions, contestée pour le porche au XVIIIe S ou inefficaces par adjonction des contreforts de la nef, au XIXe S.

Des fissures dans les superstructures, en particulier de la chapelle des Macchabées, mais aussi dans les fondations du collatéral nord, montrent que l'instabilité s'est manifestée après les dernières réfections, jusque pendant le XXe S.

Dans l'évaluation des sollicitations on a tenu compte d'un faible degré de séismicité de la cuvette genevoise. On peut mentionner le séisme du 17 avril 1936 avec une intensité $I_0 = VII - VIII$ avec épicentre à 20 km au sud-ouest de Genève.

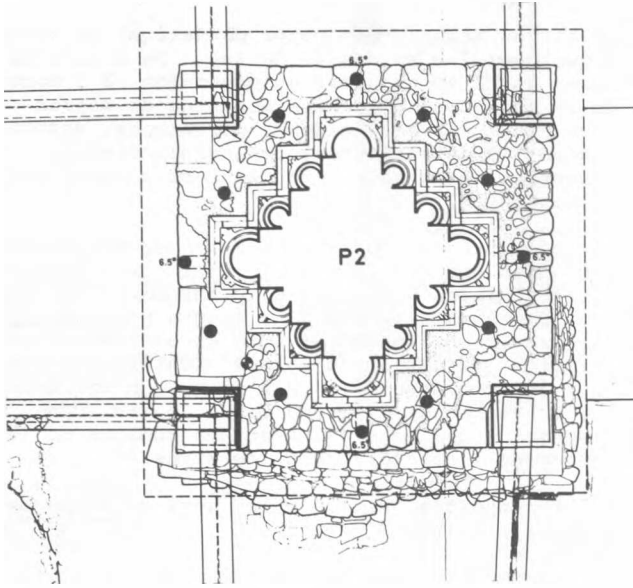


Fig 5 Disposition caractéristique des micro-pieux dans un massif de fondation

Principe de la confortation

Dans cette situation les ingénieurs sont arrivés à la conviction qu'il serait irresponsable d'aborder les travaux par petites étapes, en improvisant des consolidations à chaque apparition de troubles. Ils ont alors proposé au Maître de l'Oeuvre une confortation préalable qui devrait répondre à des impératifs sévères.

1. Réaliser au niveau du sol un chaînage efficace des porteurs
2. Assurer à ce niveau un encastrement des porteurs
3. Assurer le centrage des charges
4. Augmenter la sécurité à la rupture
5. Limiter strictement les nuisances
6. Eviter toute dégradation du site, par exemple, chapiteaux gothiques et restes archéologiques encore inconnus
7. Rapidité d'exécution assurant strictement le respect des délais serrés

Des six techniques spéciales étudiées en détail soit pieux forés, pieux au vérin, terre armée, sous oeuvre maçonné, injections, pieux aiguilles, micro-pieux à mise en charge, seule cette dernière méthode permettait de remplir réellement toutes les exigences. Au lieu de la dalle de chaînage en béton armé envisagée à l'origine, une construction mixte avec poutrelles métalliques, dalles préfabriquées et couche de béton spécial, assure la même fonction en respectant encore mieux le site.

La solution comporte finalement 399 micro-pieux "Ropress" de 50 t de capacité, dont la fonction est de transmettre une partie des charges à plus grande profondeur. Les têtes des micro-pieux dans les massifs de fondation sont noyées dans la dalle assurant le chaînage d'un mur extérieur à l'autre.

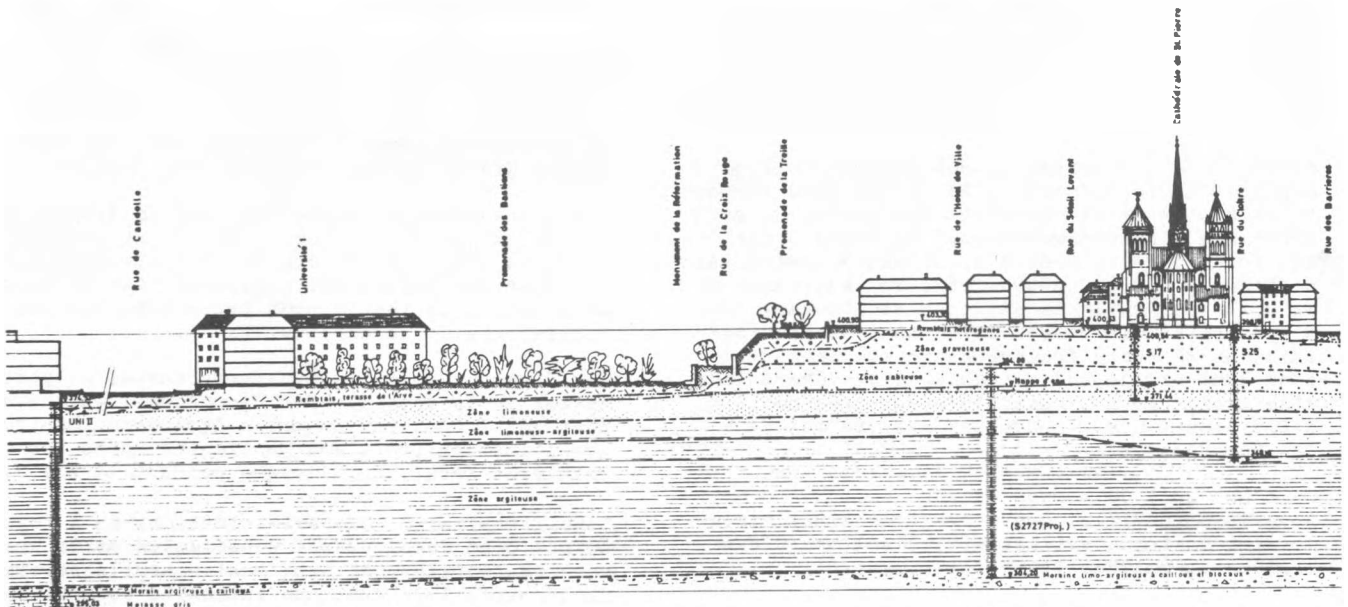


Fig 4 Coupe géologique générale nord-sud à travers la Vieille Ville à Genève, avec sondages pour la cathédrale et divers projets

Les micro-pieux ont en principe une longueur de 11 m et sont exécutés selon une technique très étudiée en plusieurs phases. Dans la première on a exécuté un forage à rotation à diamant à travers la maçonnerie. Ce forage de ϕ 120 à 150 mm, suivant les cas, permet de reconnaître en détail la qualité de la maçonnerie à chaque emplacement et de décider au besoin d'une intervention spéciale, tels une préinjection ou un soutènement supplémentaire si une défaillance locale apparaît.

En général on disposait d'une épaisseur de maçonnerie de 5 m, mais dans quelques cas, elle était réduite à moins de 3 m. On scelle alors un élément de traction tubulaire à l'intérieur duquel est posé le micro pieu proprement dit, formé par un tube métallique épais. Celui-ci est injecté à son extrémité dans le terrain par la méthode "Tubfix"⁶⁾ avec un coulis de ciment sous pression. Après une dizaine de jours on passe à la phase suivante de mise en charge par la technique "Ropress"⁷⁾ telle qu'elle a été mise au point par les entreprises du groupe RODIO.

En prenant appui sur la maçonnerie on a chargé les micro-pieux par paires pour éviter les efforts excentriques.

Par ce procédé chaque micro-pieu a été essayé à la charge de 50 t, pour laquelle on obtient la valeur réelle des déformations, puis déchargé complètement et fixé finalement à 25 t⁸⁾

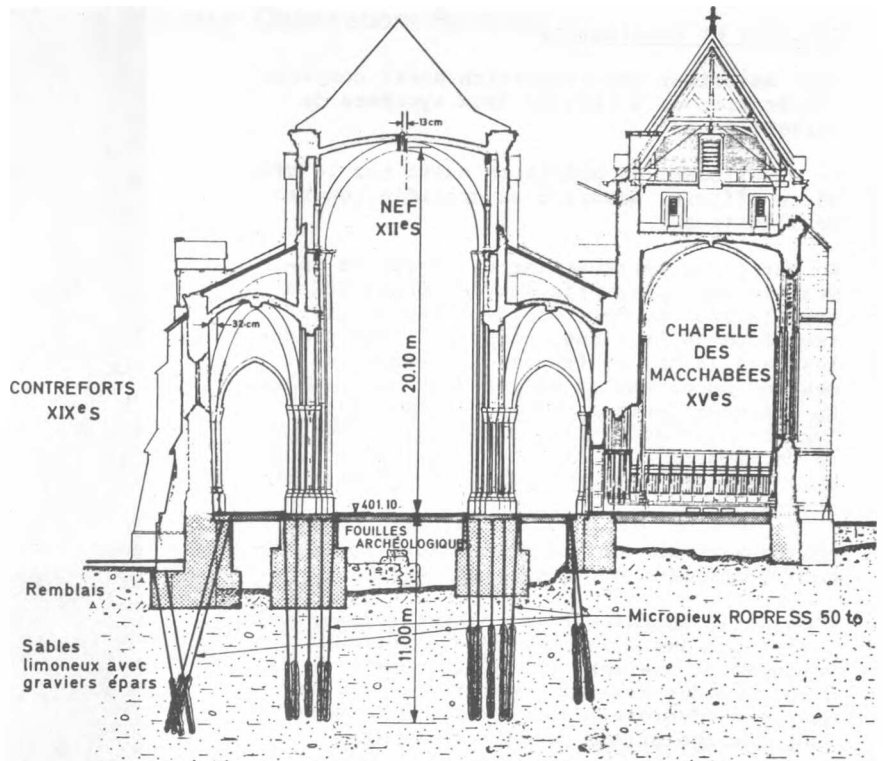
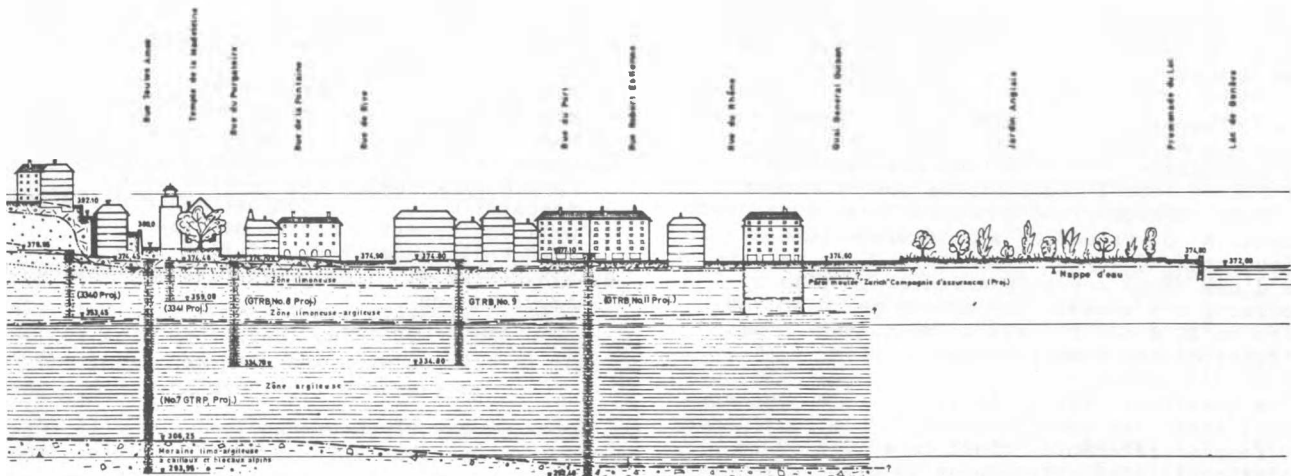


Fig 6 Principe de la confortation au moyen de micro-pieux Ropress-Tubfix et dalle de chaînage

En principe pour les parties les plus préoccupantes de l'édifice, la charge d'essai représente le 100 % des efforts.



Interprétation conforme aux documents du Service Cantonal de Géologie

Dr. es sc G. Amberger

Contrôle et conclusions

Pour maîtriser une succession aussi complexe d'opération on a utilisé deux systèmes de surveillance.

Un nivellement de précision suivi par le géomètre officiel assurait un contrôle général de l'édifice.

En outre une instrumentation conçue et installée par Solexperts, après consultation avec le Prof E. Recordon de l'Ecole Polytechnique de Lausanne, comportait des pendules dans la nef et transept, des axes de mesures au niveau du sol et dans les combles. En outre un certain nombre d'extensomètres "Unirod" ont été utilisés pour la surveillance de groupes de micro-pieux lors du forage, de l'injection en pression et de la mise en charge.

Les deux tours ont été surveillées spécialement par visées optiques.

L'ensemble de ces mesures assurées essentiellement par les collaborateurs du bureau Bourquin et Stencek, chargé également de la direction des travaux, permet de conclure qu'aucun désordre n'est intervenu tout au long des opérations parfois délicates.

L'ensemble de l'édifice a été soulevé d'une quantité proche de 1 mm par cumul de toutes les influences. Mais aucun moment ne sont intervenus des mouvements brusques ou violents qui auraient été néfastes à une maçonnerie de pierre fragile.

Les travaux spéciaux, sondages, micro-pieux, scellement ont été exécutés par l'entreprise Swissboring SA, dont le devis original a été tenu, performance particulièrement remarquable pour une reprise en sous-oeuvre.

On peut ajouter que les experts préoccupés par la conservation de l'édifice et des trésors archéologiques ont tous apprécié la propreté, la précision et l'efficacité des méthodes, servies par un personnel compétent.

Il reste à louer les délégués de l'Eglise protestante de Genève, propriétaire actuelle de la cathédrale. La Fondation des Clefs de St Pierre sous l'impulsion de son Président M P.Ch. George et de son conseiller technique, M G. Friedrich a su faire preuve de l'ouverture d'esprit nécessaire à la maîtrise d'une tâche aussi inhabituelle. Elle a consacré aux travaux invisibles de consolidation un 20 % des travaux de restauration de l'édifice chargé de prestige.

A la question: est-ce le sol ou la maçonnerie qui a trahi les constructeurs? On a pu répondre de façon irréfutable, c'est le sol, d'où la solution la plus efficace et la plus respectueuse de l'édifice.

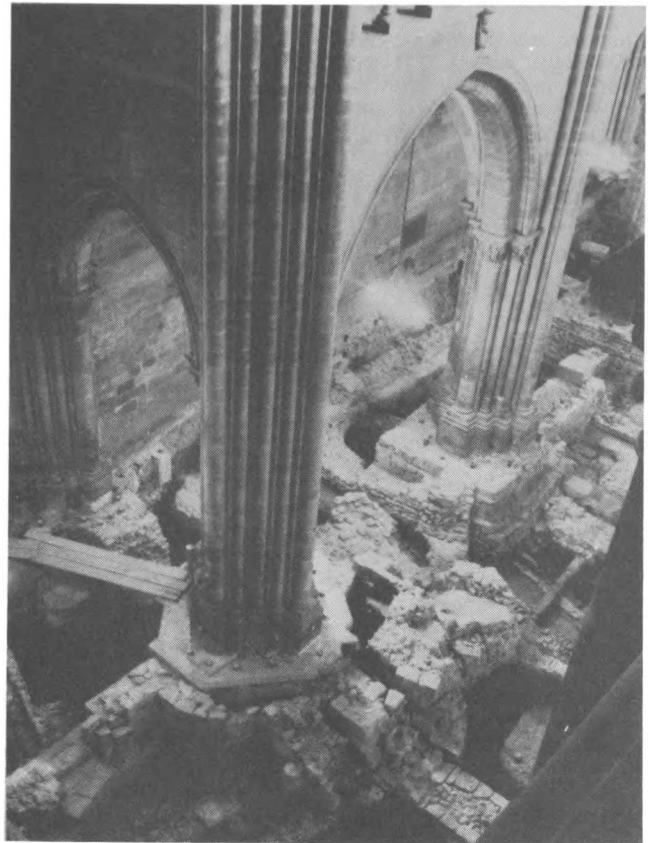


Fig 7 Aspect des fouilles archéologiques avec les piliers et mur sud de la nef

Références:

1. Martin C. Saint Pierre - Ancienne Cathédrale de Genève
Association pour la Restauration de St Pierre - Kündig - Genève 1910
2. Buscarlet D. La Cathédrale de Genève
Delachaux et Niestle, Neuchatel 1969
3. Amberger G.F. Dr Géologie du Canton de Genève
Publ.No 82 SSMSR 1971
4. Blondel L. Le Développement de Genève à travers les Siècles
F. Roth et Cie, Lausanne 1946
5. Bonnet Ch. Chapelle des Macchabées
Fond. des Clefs de St Pierre, Genève 1979
6. Comte Ch. Technologie des Tirants
Fond. Kollbrunner/Rodio, Zurich 1976
7. Mascardi C. Il Comportamento dei Micro-pali sottoposti a Sforzo assiale
Fond. Kollbrunner/Rodio, Zurich 1970
8. Blandenier M. Le Micro-pieu et ses Applications
Publ.No 99 SSMSR 1978