

La cathédrale de Lausanne aura-t-elle sa Tour de Pise?

Autor(en): **Barras, V.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK = Mensuration, photogrammétrie, génie rural**

Band (Jahr): **95 (1997)**

Heft 11

PDF erstellt am: **17.05.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-235389>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

La cathédrale de Lausanne aura-t-elle sa Tour de Pise?

En 1979, suite à la découverte de nombreuses fissures dans la Tour lanterne, on fait appel à un géomètre pour définir très précisément la dimension des mouvements supposés. Depuis 16 ans, les méthodes ont évolué. Ce travail analyse les améliorations que les techniques de compensation actuelles peuvent apporter à un ensemble d'observations aussi spécial et comportant de grandes contraintes. Cet article présente un réseau de grande précision, domaine d'activité auquel peut être confronté le spécialiste de la mesure qu'est l'ingénieur en mensuration [1].

Im Anschluss an die Entdeckung zahlreicher Risse im Kuppelturm der Kathedrale von Lausanne wurde 1979 ein Geometer beauftragt, die Ausmasse der vermuteten Bewegungen genau zu definieren. In 16 Jahren haben sich die Methoden weiterentwickelt. Dieser Beitrag analysiert die Verbesserungen, die die jetzigen Ausgleichstechniken für eine solch spezielle mit grossen Zwängen verbundene Gesamtheit von Beobachtungen bringen können. In diesem Artikel wird ein hoch genaues Netz vorgestellt, ein Tätigkeitsgebiet, dem der Messspezialist wie der Vermessungsingenieur begegnen kann [1].

Nel 1979, in seguito alla scoperta di numerose crepe nella cupola della Cattedrale di Losanna, ci si è rivolti a un geometra per definire con precisione l'entità dei presunti movimenti. In sedici anni i metodi hanno subito un'evoluzione. Questo lavoro analizza i miglioramenti che le odierne tecniche di compensazione sono in grado di fornire per una serie di osservazioni così specifiche e comportanti così tanti vincoli. L'articolo seguente presenta la realizzazione di una rete di grande precisione, un campo d'attività familiare ad uno specialista quale l'ingegnere topografo.

prend le chœur et le transept. Cette nef transversale donne à l'édifice une forme de croix dont les deux bras sont appelés croisillons.

La Tour-lanterne coiffe la croisée. Couverte de sa flèche, elle mesure 70 mètres dont 40 sont pris par la charpente de la toiture. De l'intérieur, chaque face est entrecoupée à différents niveaux par de petits «chemins de ronde» qui permettent de visiter le haut. C'est dans ce volume que se développe le réseau topométrique, objet de cet article.

2. Un réseau au service du patrimoine

Les grands ouvrages actuels font très souvent l'objet de contrôles durant et après leur construction. Pour mettre en évidence les divers mouvements, on fait régulièrement appel à des réseaux topométriques. Pour la Tour-lanterne de la cathédrale de Lausanne, les objectifs du réseau d'auscultation, mis en place dès l'été 1979, sont de surveiller le comportement de la superstructure. Les mesures effectuées doivent permettre de quantifier les déformations globales de l'édifice et de

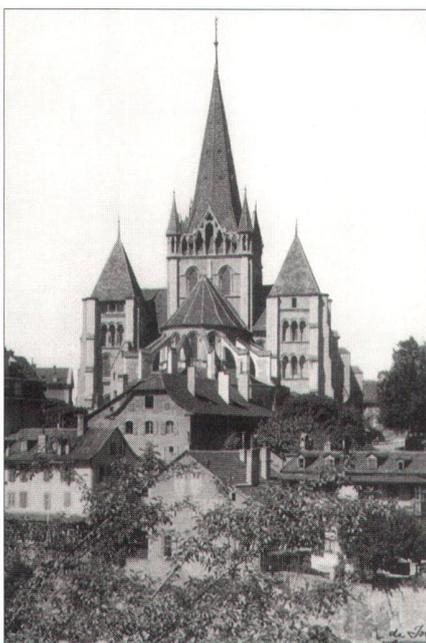


Fig. 1: Vue extérieure de la Tour-lanterne.

V. Barras

1. Introduction

La cathédrale de Lausanne, située sur la «Colline de la Cité», a demandé près de cent ans pour être construite. Le 20 octobre 1275, elle est consacrée par le pape Grégoire X. Cependant, on ne peut pas déterminer précisément quand elle a été achevée, car de tout temps, des architectes l'ont modifiée. Ils ont reconstruit des parties soit par envie de changements, soit surtout à cause des effets du temps et des éléments naturels. C'est ainsi que les deux tours, celle de l'entrée, appelée le Belfroi et celle du transept, nommée Tour-lanterne ont subi de nombreux changements dans leur toiture.

Je me suis plus particulièrement intéressé à la partie est de l'édifice. Ce secteur com-

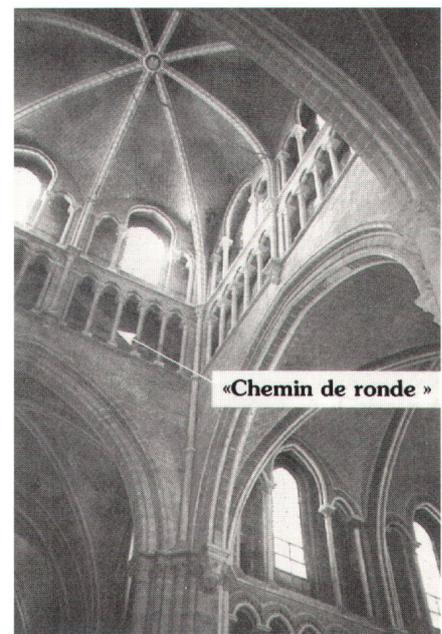


Fig. 2: Aperçu des chemins de ronde intérieurs.

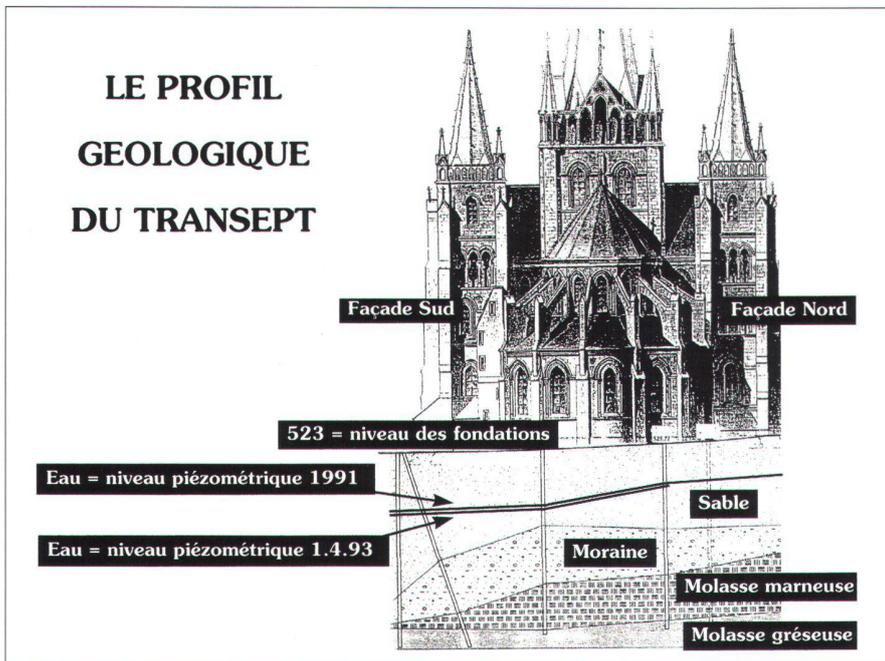


Fig. 3: Croquis d'une coupe géologique sous le transept.

donner l'alerte dès que les déplacements sont jugés excessifs.

Toutes les mesures effectuées sont maintenant traitées avec LTOP. Ce logiciel de compensation permet d'ajuster, grâce à la méthode des moindres carrés, toutes les observations par rapport à des points fixes. Cependant, ce logiciel calcule la planimétrie puis, une fois que celle-ci est déterminée, il définit l'altimétrie. Dans la suite du texte, je nomme cette simplification «2D+1».

M. Jean-Claude Gasser, ingénieur géomètre chargé de ce travail, m'a proposé de passer sous la loupe ce réseau car sa grande particularité est justement son développement dans les trois dimensions. A l'inverse des réseaux topométriques classiques, la composante hauteur devrait faire partie intégrante des discussions de configuration. Cette nouvelle interprétation permettrait peut-être de corriger certaines faiblesses de cet ensemble de mesures. De plus, pour mettre en évidence des déplacements, on est obligé de comparer différentes campagne de mesure. Là aussi, diverses méthodes sont utilisables en fonction de la puissance de calcul des ordinateurs actuels. Quelques-unes ont été testées.

Cependant, avant de regarder de plus près ce réseau, il est bon de faire mieux connaissance avec le comportement d'un tel édifice. Aujourd'hui, avec les campagnes d'analyses géotechniques et de

structures, menées depuis les années 80, il est possible d'infirmer ou de confirmer certaines hypothèses de base émises lors de la conception de cet ensemble de mesures.

3. Les problèmes de la partie est de l'édifice

3.1 Les problèmes possibles dus au sous-sol

La cathédrale repose sur des sables, limons et remblais suivant les endroits. Ces sols sont d'une manière générale de bonne qualité et bien portants. Cependant, ils restent plus compressibles et déformables qu'une roche et l'édifice en est grandement influencé. Pourtant, les spécialistes pensent que les déformations planimétriques sont si petites que sur une période d'environ 15 ans (durée des observations géométriques) on ne peut pas détecter de variations. Par contre, de légères variations d'altitude peuvent être observées de manière cyclique ou permanente. Ces différences proviennent essentiellement des différents niveaux d'une nappe phréatique dont on ne con-



Fig. 4: Résumé des problèmes de cette tour.

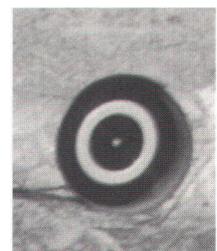


Fig. 5: Image des points scellés.

naît, à l'heure actuelle, ni la provenance, ni l'exutoire.

3.2 La structure porteuse de la tour

Afin de mieux connaître et de définir les forces qui agissent sur la superstructure, une modélisation de la zone est a été effectuée. On se rend compte que certains piliers, avec des fondations identiques, sont jusqu'à dix fois plus sollicités que d'autres. Cela augmente les déformations qui peuvent engendrer des dégâts.

Comme toute construction, la cathédrale, avec ses murs en maellons, subit des dilatations et des contractions. Ces variations peuvent être de l'ordre de plusieurs millimètres entre les différentes saisons. Ces déformations cycliques, qui restent dans la plage de plasticité des matériaux, sont souvent nommées «respirations» du bâtiment. Elles proviennent essentiellement d'effets attendus et prévisibles tels que:

- les différences de température entre chaque face de la tour (variations de l'ensoleillement) et la température intérieure,
- l'humidité,
- les effets du vent.

Ces déformations ne sont que moyennement importantes si la position médiane reste constante. Par contre, si, au cours des ans, une dérive est constatée, celle-ci peut engendrer des transferts de charges, d'où des fissurations. C'est pourquoi, on s'intéresse à tout glissement irrémédiable de plus de 1 mm.

4. Le réseau actuel

4.1 Sa mise en place

En 1979, à la suite de la découverte de nombreuses fissures, la Commission de la cathédrale décide de soumettre toute la partie est de l'édifice à des contrôles de déformations. Deux types de mesures sont effectuées:

- des mesures relatives, très précises (au 1/100^{ème} de mm), de part et d'autre des fissures jugées significatives,
- des mesures de déformations globales

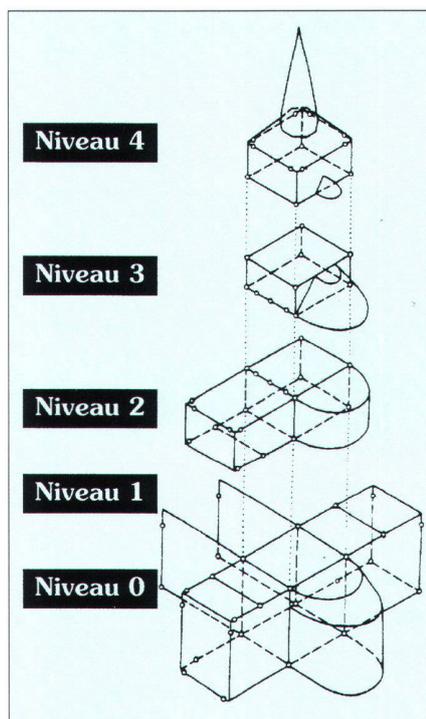


Fig. 6: Schéma décomposé du réseau intérieur.

sur l'ensemble du volume avec une précision recherchée de $\pm 1\text{mm}$.

Seul un réseau d'auscultation par des mesures topométriques permet d'obtenir le deuxième type d'informations. Il existe bien une instrumentation très performante utilisée dans l'industrie, mais ces procédés sont très difficiles, voire impossibles à mettre en œuvre sur des objets de cette taille. Dans quelques cas, la photogrammétrie terrestre de précision a permis également d'atteindre de tels objectifs, mais son exécution demande de grands moyens. De plus, à la fin des années 70, on ne possédait que peu de possibilités de traiter efficacement une autre technique consiste à déterminer non plus la déformation de points, mais de surfaces globales.

4.2 L'implantation du réseau

Placer un réseau à l'extérieur de la cathédrale apparaît très vite inapplicable à cause du volume à contrôler. Les murs de la tour ne sont pas partout visibles et l'éloignement nécessaire engendre une perte de précision inacceptable. Par contre, de l'intérieur, grâce au décou-

page de la tour en différents niveaux, il parut possible, sur chaque «chemin de ronde», de placer des stations pour déterminer la position de petites cibles d'un diamètre de 1 cm avec une marque centrale de 1 mm.

Les points furent répartis selon cinq nappes:

Niveau 0:

16 points au sol, à la cote environ 526, considérés comme fixes;

Niveau 1:

24 points situés entre les premières voussoires des arcs de la croisée et des bras du transept (altitude 538 m soit 12 m plus haut);

Niveau 2:

11 points placés à la hauteur de la première galerie de la Tour-lanterne (altitude 545 m soit 19 m au-dessus du sol);

Niveau 3:

8 points à la hauteur de la seconde galerie de la tour (altitude 550 m soit 24 m au-dessus du sol);

Niveau 4:

8 points fixés au sommet de chaque vitrail qui éclaire la voûte sommitale (altitude 555 m soit 29 m au-dessus du sol).

On a, dans ce réseau principal, 67 points dont 15 sont considérés comme fixes et mesurés en 1995 par environ 300 mesures d'angles verticaux et de directions horizontales. Remarquons encore qu'un bon nombre de ces points sont soit difficilement, soit totalement inaccessibles, ce qui limite grandement les méthodes de détermination.

4.3 Le calcul et la compensation du réseau

Comme il est impossible de placer des piliers d'observation, par respect pour ce monument historique, les stations sont considérées à chaque fois comme inconnues. Cela permet de s'affranchir également de l'erreur de centrage. De plus, du fait de la précision recherchée et des dif-

difficultés d'accès aux cibles, la solution la plus raisonnable consiste à effectuer des intersections de directions. Parmi toutes ces observations, on n'a donc uniquement des observations de directions horizontales et d'angles verticaux, aucune distance n'est mesurée.

Le réseau actuel se base sur les points du niveau 0 considérés comme stables. Cette hypothèse permet de caler les mesures dans ce système local et de donner une échelle à la figure. Dans les étages, en visant depuis chaque station des points du niveau inférieur, du même niveau et du niveau supérieur, on peut imbriquer les stations et déterminer les points inconnus à l'image d'une orientation des faisceaux dans un système de photos aériennes.

D'une manière générale, on constate que le réseau mis en place en 1979 permet presque partout de déterminer avec une bonne précision et à chaque campagne, les coordonnées des points. Par contre, la fiabilité de ces positions peut parfois être discutée et le plus dangereux est que cette perte du niveau de confiance se produit souvent aux endroits critiques. Il faut donc attendre plusieurs campagnes pour avoir l'assurance qu'un secteur se déplace.

La complexité des lieux et la position des points font que les améliorations possibles sont très restreintes. Elles demandent la mise en œuvre d'un grand nombre de mesures supplémentaires si l'on désire garder les mêmes cibles. Pourtant, la modification des emplacements des points visés serait une opération trop coûteuse, car ils ne sont souvent accessibles qu'avec un échafaudage. De plus, cela provoquerait une discontinuité dans la comparaison d'époques.

Le réseau, ainsi constitué, permet de découvrir toute déformation par rapport aux points du niveau 0.

4.4 Les tests sur la fiabilité des points au sol

Selon les spécialistes, les déformations différentielles en plan des points au sol sont très faibles et imperceptibles sur ces 15 dernières années. Ils ne remettent donc pas en cause l'hypothèse de la stabilité planimétrique des cibles du niveau 0. Par

contre, ils estiment que cette affirmation mérite d'être rediscutée pour l'altimétrie, surtout pour la partie sud-ouest du transept. Selon diverses estimations, les écarts de tassement entre cette partie et le reste sont de l'ordre de grandeur du $1/2$ mm.

J'ai donc simulé un tassement des quatre points sud-ouest du transept en soustrayant 1 mm à leur altitude. Puis j'ai effectué un premier calcul avec LTOP et un second avec un logiciel calculant en 3D. On peut dire que les effets de ces légers tassements n'ont que peu d'incidence sur les positions des cibles des étages supérieurs. Les variations qu'ils provoquent restent de la taille des incertitudes des déterminations. Je propose donc de garder l'hypothèse que les points du niveau 0 sont fixes. Ceci, sans souci qu'ils ne cachent des déplacements notables de la tour.

5. Les améliorations possibles

Pour répondre aux quelques critiques que j'avais faites sur le réseau actuel, j'ai cherché à apporter quelques améliorations:

- supprimer ~10% des observations sur des points déjà bien déterminés,
- simuler des mesures à l'aide d'un distancemètre sur des cibles réfléchissantes pour améliorer les points mal définis. La précision de cet instrument ne permet pas d'obtenir des résultats intéressants. J'ai donc abandonné la méthode,
- ajouter des points dans le croisillon sud pour pouvoir ensuite mesurer entre certains points des distances très précises au fil Invar. Cela permet d'améliorer les choses dans ce secteur sensible,
- modifier la position des stations de l'étage 3.

Après de très nombreux essais où seuls les principaux sont présentés dans cette liste, je me suis aperçu que les améliorations intéressantes sont très difficiles à obtenir. Sur le plan, le réseau semble très perfectible, mais une fois dans le bâtiment, avec encore les contraintes de discrétion de la matérialisation des points que demande un édifice historique, les possibilités de perfectionnement sont très minces. Si la précision est un critère très contraignant, surtout pour un groupe de

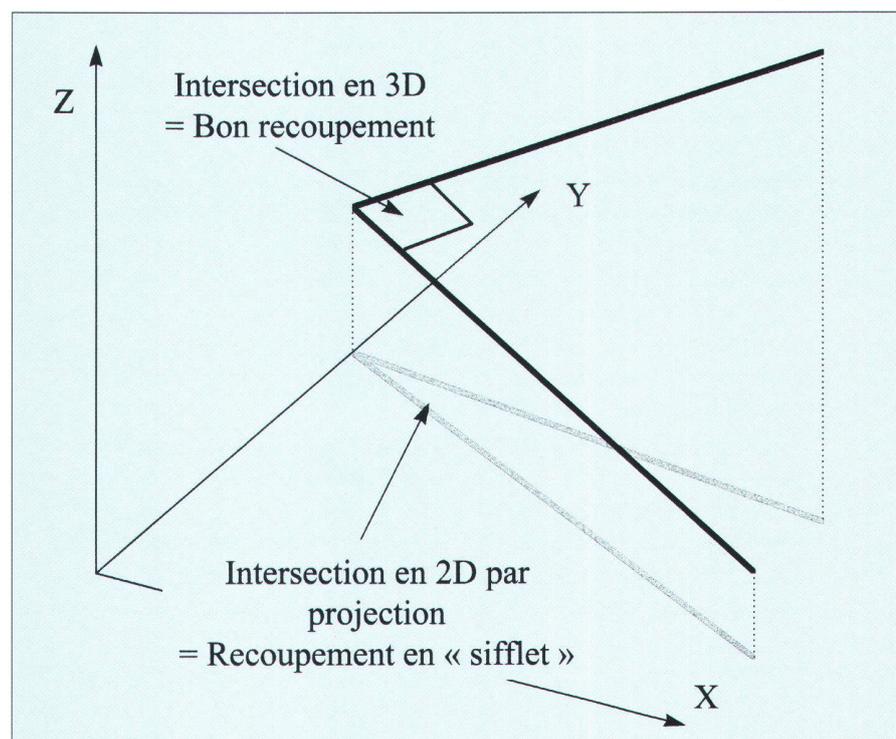


Fig. 7: Conséquences du calcul en 2D par rapport à celui en 3D.

points, la fiabilité n'est que peu significative. Il faut bien voir que les fautes grossières qui se seraient glissées dans une session de mesures ne sont détectables non seulement par les observations de cette époque (comme calculées avec le logiciel de compensation), mais aussi grâce aux mesures précédentes.

6. La prise en compte de la 3ème dimension

En recherchant toutes ces améliorations, je me suis souvent trouvé dans une situation où en 3D, j'avais une bonne intersection. Mais, une fois projeté, le recouvrement se faisait en sifflet et cela réduisait la précision. Pour palier à ce problème, je me suis mis à la recherche d'un programme calculant en 3D directement, sans effectuer la simplification 2D+1 de LTOP.

En Suisse, j'ai trouvé trois logiciels:

- ECDS ou TMS de Leica,
- Raumtri de l'Office fédéral de topographie (O+T),
- LGC du CERN (Centre Européen de Recherche Nucléaire).

Mon choix, pour différents problèmes de compatibilité des résultats, c'est porté sur LGC, abréviation de «Logiciel Général de Compensation». Avec ce programme, j'ai effectué quelques tests. Bien qu'une compensation 3D apporte des indications plus proches de la réalité, les résultats montrent, que dans le cas du réseau de la tour, les différences d'informations par rapport à l'approximation «2D + 1» sont très faibles. Si l'on effectue les calculs toujours avec le même système, on s'affranchit d'une grande partie des variations de position que l'on trouve entre deux méthodes puisque à chaque époque, les mêmes simplifications sont effectuées. Il n'est donc pas nécessaire, selon moi, de demander une compensation tridimensionnelle de cet ensemble, si l'on garde à l'esprit de légères différences, telle que la sous-estimation de l'erreur altimétrique. Par contre, je continue à croire que la fiabilité serait modifiée et cela dans une plus large mesure. Malheureusement, une comparaison rigoureuse est très difficile

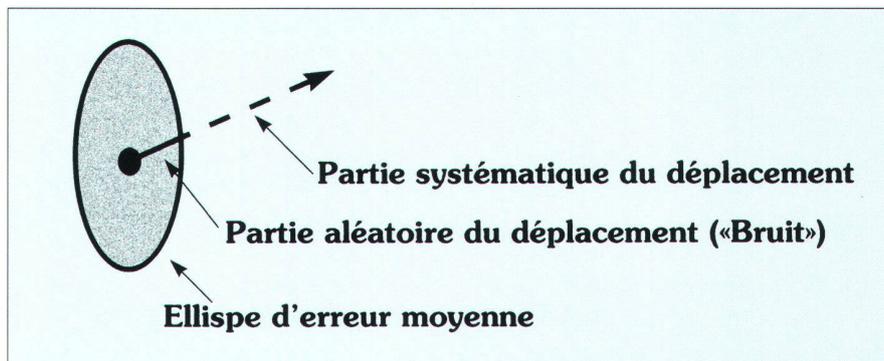


Fig. 8: Les différentes composantes d'un déplacement.

vu les différences de bases statistiques qu'il y a entre les indicateurs fournis par LGC et LTOP.

Il ne faut pourtant pas étendre ces constatations à tous les ensembles de mesures se développant dans les trois dimensions. Ici, on a uniquement des directions et des angles verticaux mesurés depuis des stations libres.

7. La façon de déceler des mouvements

Pour déceler des déformations, on est obligé de comparer différentes époques. Chaque session de mesures doit être ajustée aux précédentes afin de déterminer les écarts de positions. Actuellement, de nombreuses méthodes permettent d'assembler des paires de coordonnées, chacune privilégiant certains paramètres et en simplifiant d'autres. A ce stade, je ne cherche pas encore à dire si la tour bouge, mais simplement à découvrir une marche à suivre pour détecter des mouvements. Le but est de trouver la solution qui permet de mettre en évidence des vecteurs-déplacements nets; c'est-à-dire de trouver leur norme et leur direction, en tenant compte des imprécisions que l'on a sur les points, ainsi que de la dépendance qu'il y a entre chaque détermination.

Différents logiciels sont capables de prendre en compte quelques uns de ces paramètres. On peut:

- compenser plusieurs époques en un seul calcul (cela permet de définir la dépendance entre des époques),
- compenser les mesures de la dernière

époque avec les coordonnées de référence comme observations (ici, on regarde l'ajustage entre les points-origine et les mesures actuelles. S'il y a incompatibilité, c'est que le point a bougé),

- faire des transformations de similitudes avec pondérations des points (Helmert Robuste) qui permettent d'ajuster l'époque mesurée sur l'époque de référence,
- prendre en compte la dépendance entre les points, donc la matrice variance-covariance. Le programme DEFORM permet de trouver un «datum stable». Cette notion de datum est assez complexe. En simplifiant, on peut dire que c'est la liaison entre l'information mesurée et les coordonnées.

Cependant, dans ce cas bien spécial de la Tour-lanterne, l'ajustage de nombreuses

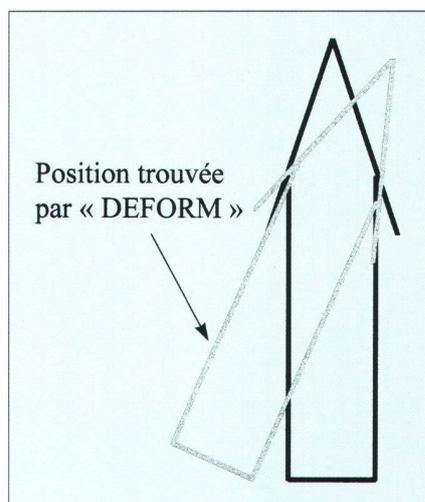


Fig. 9: Mouvement découvert par DEFORM.

directions sur peu de points fixes fait que le programme DEFORM diverge et arrive à la conclusion que le sommet reste fixe et que le fond bouge. On voit donc que même avec des outils performants, il faut toujours bien discuter les résultats. Parmi tous les tests, on ne peut pas dire qu'une méthode donne «la bonne solution». La simple différence de coordonnées compensées donne des déplacements bruts assez faciles à comparer avec des ellipses d'erreur. Donc, si les ingénieurs qui utilisent ces déplacements sont familiarisés avec les indicateurs de précision, cette solution est certainement la plus rentable.

8. La mise en évidence d'une dérive

En juxtaposant plusieurs époques par simples différences de coordonnées compensées, on peut maintenant contrôler si les secteurs sensibles sont bien ceux pressentis par les experts. Il faut bien savoir que tous les points se déplacent. Certains bougent, mais restent dans un même secteur, par contre, d'autres glissent. La juxtaposition des campagnes permet de découvrir des dérives de manière rapide. En regardant les dérives, j'ai trouvé :

- de légers glissements du côté nord sur presque toute la hauteur,
- que l'angle sud du transept glisse vers le sud-ouest,
- que les points du sommet de la tour ont tendance à s'éloigner de manière radia-

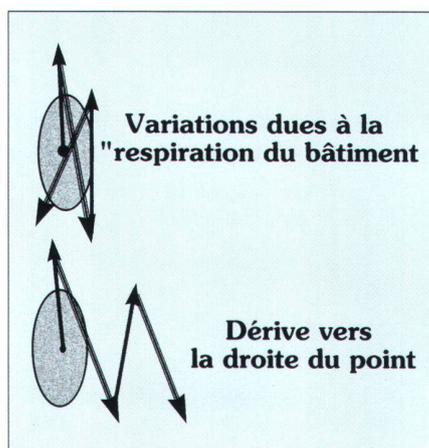


Fig. 10: Différence entre les variations normales et les dérives.

le, mais que les travaux de rénovation de la flèche en 93 les avaient ramenés vers le centre,

- que l'altimétrie reste assez stable, mais l'amplitude des mouvements grandit à mesure que l'on monte dans les étages.
- Ces quelques remarques, accompagnées de plans bien représentatifs, devraient aider les ingénieurs responsables de cet édifice à prendre les mesures adéquates: études plus approfondies d'un secteur, travaux de consolidation, etc.

9. Les conclusions

A première vue, lorsque l'on regarde le réseau mis en place en 79, beaucoup d'options prises semblent étonnantes :

- les points au sol ne sont pas contrôlés,
- seulement des directions et des angles verticaux sont mesurés, pas de distances,
- toutes les stations dans les étages sont calculées par relèvement.

Pourtant, après avoir fait mieux connaissance des lieux et des déformations que craignent de rencontrer les spécialistes, on découvre la raison de toutes ces solutions. De plus, travailler dans un monument historique impose une grande discrétion dans la matérialisation, cela est souvent synonyme de contraintes supplémentaires. Et, lorsque l'on propose des changements, il faut toujours mettre en regard les améliorations qu'ils apportent et les coûts souvent élevés qu'ils engendrent, avant d'entériner un choix. Pour ce qui est des modèles de calcul, aussi étonnant que cela puisse paraître de prime à bord, on ne trouve que très peu de différences entre la compensation «2D + 1» et une «3D». Plus sensible aux variations, la méthode tridimensionnelle apporte des informations plus proches de la réalité. Pourtant, la difficulté à trouver actuellement des logiciels adéquats, restreint énormément ces quelques avantages. De manière globale, ce résultat est rassurant pour toutes les mesures déjà effectuées. La détection de déplacements faite de manière classique, par différences de coordonnées, donne des résultats très acceptables. Après comparaison d'un

grand nombre de méthodes, on voit que si les vecteurs sont discutés en tenant compte des ellipses d'erreur, on découvre assez bien les dérives du bâtiment.

Grâce aux contacts que j'ai eus avec le CERN, j'ai découvert, avec un grand intérêt, d'autres manières d'aborder les problèmes de préanalyse, de précision et de fiabilité.

En globalité, on remarque que, malgré les outils précieux d'analyse que l'on possède actuellement, il est très difficile d'améliorer le réseau, finalement bien mis en place en 1979 dans la Tour-lanterne. Toutes les modifications restent mineures.

Remerciements

J'aimerais remercier toutes les personnes qui m'ont apporté leur soutien durant l'élaboration de ce travail. Je désire tout spécialement mentionner mon professeur, M. Paul-Henri Cattin pour l'aide durant le projet de diplôme et lors de la rédaction de cet article.

Référence:

- [1] V. Barras: Réseau d'auscultation de la Tour-lanterne de la cathédrale de Lausanne. Travail de diplôme effectué à l'EINEV en 1995 sous la conduite du Professeur P.-H. Cattin.

Vincent Barras
Ingénieur ETS en mensuration et génie rural
Poste
CH-1638 Morlon