

Gestion des données multi-temporelles de l'auscultation d'un monument historique

Mathieu KOEHL
Maître de Conférences
INSA de Strasbourg
MAP-PAGE UMR 694 CNRS/MCC
mathieu.koehl@insa-strasbourg.fr



Figure 0 : Vue de la façade principale de la Cathédrale

1.- Introduction : La Cathédrale de Strasbourg, un Monument chargé d'Histoire

La construction de la Cathédrale Notre-Dame de Strasbourg remonte au XI^{ème} siècle pour les parties basses les plus anciennes du chœur et du transept. Les dimensions en plan de la Cathédrale actuelle sont exactement les mêmes que celle de l'édifice d'origine de style roman. A partir de la fin du XII^{ème} siècle la Cathédrale que l'on peut admirer aujourd'hui s'est substituée, par étapes, à l'originale en conservant la même base. A l'époque, il n'était pas prévu de surmonter ce qui devait être une tour nord semblable à celle de Paris ou de Reims, d'une haute tour culminant à quelques 142 mètres au-dessus du parvis (construction au XV^{ème} siècle) et transférant ainsi une charge sur le pilier nord du narthex de l'équivalent du poids de la Tour Eiffel. Déjà au XIII^{ème} siècle la nef et la base de la façade

ont connu des modifications sensibles dont les conséquences, d'un point de vue de la stabilité de l'édifice, n'ont peut-être pas été suffisamment prises en compte.

Depuis l'achèvement de sa construction, de nombreuses études scientifiques ont permis de percer certains mystères et de mieux appréhender la structure même de ce Monument qui conserve ainsi des parties massives, romanes, et des parties élancées en dentelles de pierre, gothiques.

La Cathédrale comporte notamment des fondations prenant généralement appui sur une mince couche de limon reposant elle-même sur les alluvions sablo-graveleuses rhénanes 1 à 2 mètres plus bas. Des pieux ou picots en bois de petits diamètres renforçaient la couche de limon grâce à leur nombre, mais leur partie supérieure, hors d'eau, était déjà à l'état de résidus lors des premières fouilles exécutées au XVII^{ème} siècle. Sous l'effet de pressions considérables, les piliers supportent l'édifice mais présentent des points faibles qui se traduisent de façon visible par des fissurations importantes.

La situation particulière et l'histoire jouent également un rôle important dans la vie de l'édifice. Aux nouvelles constructions des plus audacieuses à travers les siècles, il faut également ajouter les activités sismiques importantes et incessantes du fossé rhénan, les incendies, nombreux, qui pour certains d'entre eux ont nécessité une reconstruction partielle des voûtes, la régularisation du cours du Rhin et l'abaissement de la nappe phréatique consécutif, les actions des agents atmosphériques accélérées singulièrement depuis le dernier siècle par les polluants acides, les bombardements successifs par l'artillerie allemande en 1870, plus tard par erreur par l'aviation américaine en 1944, les travaux de restauration considérables concernant surtout les parties extérieures.

Ainsi, sous son propre poids, mais aussi sous le poids de l'histoire, cette "Dame" connaît-elle des drames ou encore, plus techniquement, des manifestations de comportement défectueux...

Le début du XX^{ème} siècle connut un premier désordre important. Diagnostic : tassement différentiel du pilier de la tour nord. Cet accident fut réparé par la reprise en sous-œuvre des fondations entre 1912 et 1924. Depuis lors, le pilier repose sur les alluvions rhénanes par l'intermédiaire d'un puissant massif de béton armé.

En 1979, une autre manifestation de comportement défectueux donne l'alerte : un joint de plomb de voussoir ayant glissé de 30 centimètres et pendant au-dessus des prie-Dieu est découvert...

Ce nouveau désordre est à l'origine de la mise en place de campagnes de surveillances des mouvements des structures de l'édifice. Une première étude de surveillance est réalisée par l'IUT de Génie civil d'Illkirch.

En 1980, c'est le Service de l'Arpentage de Communauté Urbaine de Strasbourg qui reprend, développe et met en place une réelle opération d'auscultation topométrique de la Cathédrale. Le Laboratoire de Topographie de l'ENSAIS, collabore activement à cette mise en place et reprend, pour le compte de l'ENSAIS ces auscultations à partir de 1992.

Aujourd'hui, le Laboratoire de Topographie de l'INSA de Strasbourg (ex-ENSAIS) réalise une campagne annuelle d'auscultation topométrique. Le Laboratoire d'Informatique pour les Géomètres du même Institut réalise les traitements et l'exploitation des mesures dont certains aspects sont présentés dans ce qui suit.

2.- Cadre des travaux

Annuellement, un Comité Scientifique et un Comité de Pilotage se réunissent pour partager, définir, décider et financer les différentes opérations portant sur les destinées de la Cathédrale de Strasbourg. La Direction Régionale des Affaires Culturelles (D.R.A.C.), la Conservation Régionale des Monuments Historiques, Les Services d'Architectures des Monuments Historiques de France et Le Service d'Architecture de l'Œuvre Notre-Dame sont chargés à différents niveaux, du suivi, de l'entretien et de la conservation de la Cathédrale de Strasbourg. Ces différents services demandent de mettre en œuvre tous les moyens nécessaires pour procéder à l'auscultation topométrique de l'édifice.

Il s'agit de déterminer les mouvements du Monument au niveau des structures porteuses, puis de les définir ou de qualifier les risques liés aux éventuels mouvements.

Ces campagnes, mises en place en 1980, nécessitaient à l'époque beaucoup de main d'œuvre, duraient plusieurs semaines et ne pouvaient être effectuées que dans une Cathédrale fermée au public...

Depuis 1992, de nouvelles méthodes de mesures, beaucoup moins contraignantes sont utilisées grâce à l'utilisation de matériels de mesure électronique beaucoup plus sophistiqués.

Enfin, ce travail étant particulièrement intéressant et permettant de montrer un autre aspect de la profession de géomètre-topographe, à savoir la métrologie fine d'auscultation, sa partie de contrôle

sur le terrain est proposée depuis 1995 aux étudiants de fin de troisième année (sur cinq) de la spécialité Topographie dans la cadre de Travaux Pratiques Groupés.

Les données mesurées sur le terrain sont ensuite prétraitées, puis intégrées dans un SIG (base de données et représentation graphique) permettant d'effectuer tous les traitements complémentaires ainsi que la génération de documents utiles à la compréhension des mouvements affectant le Monument.

3.- Présentation des travaux

Les travaux d'auscultation comportent :

- des opérations qualifiées de "standards", renouvelées chaque année :
 - relevé altimétrique,
 - auscultation des plans transversaux,
- des études et mesures ponctuelles comme celles effectuées lors des travaux de restauration de certaines parties de l'édifice où si des désordres locaux sont constatés et qu'il s'agit d'en suivre l'évolution rapide dans le temps (restaurations importantes et ponctuelles, etc.).

4.- Méthodologie

En fonction de la structure (pilier, contrefort, mur, arc-boutant, etc.) à contrôler et de la nature des mouvements (altimétrique ou planimétrique) à déceler, deux types de missions ont été mis en place depuis 1980.

En premier lieu, les contrôles altimétriques, par nivellement direct, permettent de mesurer les mouvements verticaux des différentes structures. Le nivellement direct nécessitant la mise en place d'une mire et donc l'accès d'un opérateur au repère à mesurer, cette technique est uniquement utilisée pour la base des structures accessible à l'opérateur.

En second lieu, sont effectués des contrôles planimétriques, par mesure d'angles et de distances ou par intersections spatiales, permettant de mesurer des déplacements longitudinaux et transversaux des différentes structures. Des mesures de distances sont effectuées sur les repères accessibles à l'opérateur, les techniques d'intersections spatiales sont mises en œuvre dans le cas des repères inaccessibles comme ceux placés à différents niveaux sur les piliers de la nef, par exemple (cf. Figure 2).

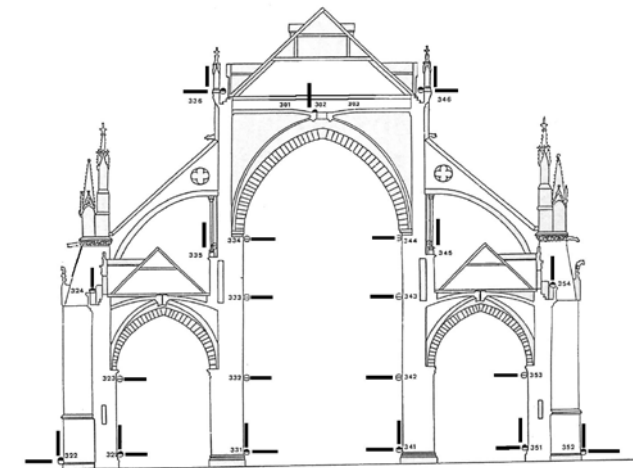


Figure 2 : coupe transversale et mouvements auscultés)

4.1.- Chaîne de traitements

Chaque type d'opération de mesures est soumis à la même chaîne de traitements des données. Les données brutes sont prétraitées selon les règles de l'art pour être affichées comme observations corrigées de chacune des opérations de mesure. Ces observations corrigées sont ainsi intégrées dans la base de données de type MS-ACCESS (cf. Figure 3). Chaque enregistrement est associé à la représentation graphique du repère correspondant dans une couche du SIG correspondant à une coupe de l'édifice.

4.2- Base de données associée

La base de données associée est structurée en tables comprenant pour chaque opération de mesure tout d'abord le champ suivant :

- la valeur de la mesure (après prétraitement), appelée « cote de l'opération » (COTE).

Cette cote est intégrée après les opérations de mesures.

Les valeurs suivantes sont dérivées des valeurs des opérations précédentes. Des requêtes spécifiques permettent d'effectuer les combinaisons de tables et de remplir la table associée à chaque opération de mesure. Cette table est ainsi complétée par les champs suivants :

- la valeur brute de la variation (mouvement) par rapport à la dernière opération de mesure (V),
- la valeur corrigée de ce mouvement tenant compte de la précision de mesure ; cette valeur corrigée est appelée « ripage élémentaire » (RE),
- la valeur des mouvements cumulés depuis le début des opérations de mesure, appelée « ripage cumulé » (RC),

Ces champs peuvent ensuite être utilisés pour la construction de documents graphiques permettant d'illustrer les résultats obtenus.

MSLINK	MAPID	COTE_RAQ22_2004_11	V_RAQ22_2004_11	RE_RAQ22_2004_11	RC_RAQ22_2004_11	L_RAQ22_2004_11	O_RAQ22_2004_11
121	1	145,2339	0	0	0	145,2339	1
131	1	145,2683	-2	-1	-14	145,2683	5
133	1	144,9404	-4	-3	3	144,9405	4
141	1	145,0517	-3	-2	-12	145,0518	6
143	1	144,9938	-2	-1	-1	144,9938	2
151	1	145,2015	-2	0	-4	145,2015	2
152	1	144,5372	-1	0	-4	144,5372	3
153	1	144,5490	2	0	-26	144,5497	9
221	1	144,449	-1	0	-5	144,449	3
222	1	145,199	-1	0	-5	145,199	2
231	1	145,1981	-1	0	-1	145,1981	1
232	1	145,2313	0	0	0	145,2313	0
233	1	145,2248	-1	0	3	145,2248	1
234	1	144,6986	1	0	-11	144,6986	4
241	1	145,0292	-1	0	1	145,0292	1
242	1	145,111	0	0	0	145,111	1
243	1	145,0424	0	0	-4	145,0424	1
244	1	144,7278	-1	0	-10	144,7278	2
251	1	144,4613	-1	0	-4	144,4613	3
252	1	145,2052	-2	0	1	145,2053	2
253	1	144,9020	2	0	-4	144,9027	3

Figure 3 : extrait de la base de données des observations

5.- Détermination des déplacements altimétriques

Le nivellement est une technique de mesure bien connue des géomètres. Il a pour but de déterminer l'altitude d'un ou de plusieurs points à partir de repères d'altitude connue. Il est direct ou géométrique lorsque les différences d'altitudes sont observées à partir de plans ou d'axes horizontaux. Il est indirect ou trigonométrique lorsque les altitudes sont calculées à partir de la combinaison de mesures de distances et d'angles verticaux. Les techniques d'intersections spatiales (voir plus loin) incluent une détermination d'altitudes par nivellement indirect.

Depuis 1980, environ 150 repères ont été scellés dans les structures porteuses de la Cathédrale - piliers de la nef, des collatéraux, du triforium, des contreforts, du chœur, etc. (cf. Figure 4)

Une auscultation altimétrique consiste à redéterminer l'altitude de l'ensemble de ces repères à partir de repères de référence considérés comme stables.

Pour ces opérations sont mis en œuvre des instruments très précis et très évolués : des niveaux numériques à analyse d'image. Ces niveaux sont à calage automatique par l'intermédiaire de compensateurs leur assurant une mise à l'horizontale très rigoureuse. La précision donnée par le constructeur pour ce type d'instrument est de l'ordre du 1/10^{ème} de mm, ce qui, en tenant compte des erreurs accidentelles garantit une précision de l'ordre de quelques 1/10^{ème} de mm dans les conditions dans lesquelles ils sont employés, cette précision correspondant à celle qui doit être obtenue pour ce type d'auscultation.

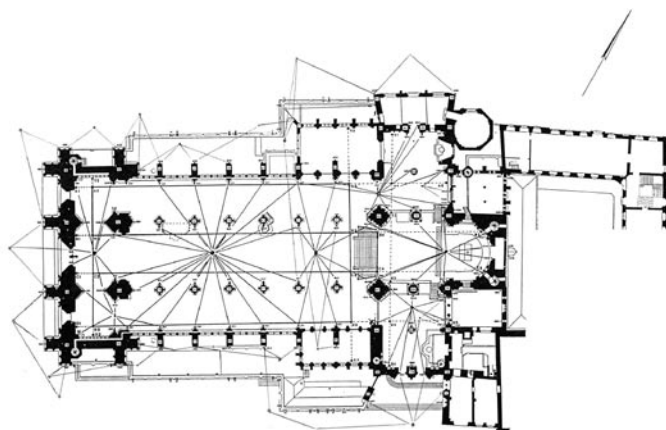


Figure 4 : Extrait de plan schématique des repères altimétriques et des cheminements de nivellement - Niveau 0

Pour atteindre cet objectif, des mesures surabondantes sont réalisées en travaillant avec deux instruments en parallèle et en répétant plusieurs fois les mesures (cf. Figure 5).

L'auscultation altimétrique de 2004- <i>JUIN/JUILLET 2004</i> en quelques chiffres :		
Niveau 0 :	Nombre de repères mesurés :	100 / 122
	Nombre d'opérations / Début des opérations :	31 / 1980 (Opération 0)
	Température :	18°C / 16°C
	Types de déplacements observés :	81 stables 10 affaissements 9 rehaussements
	Nombre de repères documentés :	63
Niveau 1 :	Nombre de repères mesurés :	13 / 18
	Nombre d'opérations / Début des opérations :	27 / 1985 (Opération 5)
	Température :	18°C
	Types de déplacements observés :	2 stables 0 affaissements 11 rehaussements
	Nombre de repères documentés :	9
Niveau 2 :	Nombre de repères mesurés :	10 / 10
	Nombre d'opérations / Début des opérations :	18 / 1985 (Opération 5)
	Température :	18°C
	Types de déplacements observés :	9 stables 1 affaissement 0 rehaussements
	Nombre de repères documentés :	1
Niveau 3 :	Nombre de repères mesurés :	21 / 30
	Nombre d'opérations / Début des opérations :	18 / 1985 (Opération 5)
	Température :	18°C / 16°C
	Types de déplacements observés :	16 stables 2 affaissements 3 rehaussements
	Nombre de repères documentés :	14

Figure 5 : l'auscultation altimétrique en chiffres

6.- Détermination des déplacements planimétriques

Les mesures d'auscultation planimétriques doivent permettre de déceler des déplacements dans le plan horizontal des différents repères. Des points de référence, de position planimétrique approchée connue dans un repère local, sont utilisés. Les opérations de base consistent en la détermination très précise de la géométrie d'une base de référence se composant de 8 points aux sols prolongés par des points scellés dans les murs de la Cathédrale et complétés par 6 points complémentaires différents et redéterminés à chaque nouvelle campagne de mesures.

A partir de cette base, la position de tous les repères planimétriques est mesurée, puis recalculée. Les instruments utilisés ici sont des tachéomètres électroniques de précision permettant de mesurer des angles (horizontaux et verticaux) et des distances. La combinaison des mesures d'angles et de distances très précises permet par le calcul d'obtenir la position planimétrique de tous les points. Cette technique exige une extrême précision dans le placement d'un prisme réflecteur sur le point à mesurer. L'opérateur doit par conséquent avoir directement accès au point à mesurer, ce qui est le cas pour les points déjà traités lors de la phase de mesures altimétriques. Pour les points inaccessibles, il n'est pas possible de mesurer des distances, par conséquent des techniques d'intersections spatiales sont utilisées dans lesquelles n'interviennent que des mesures d'angles horizontaux et verticaux à partir de plusieurs stations d'instrument. Là encore, les mesures

surabondantes sont nombreuses, chaque point étant au minimum déterminé à partir de 3 stations. Les mesures seront compensées lors d'un post-traitement informatique des données. (cf. Figure 6)
Les précisions recherchées sont ici de l'ordre du mm. Les techniques de détermination mettent en jeu la combinaison de plusieurs types de mesures dont la mise en œuvre et la précision sont très fortement liées à la rigueur des opérateurs.

Il est à noter que depuis 1997 ces mesures sont effectuées de nuit pour ne pas gêner et ne pas être gêné par l'exploitation normale de la Cathédrale.

L'auscultation planimétrique de 2004 en quelques chiffres :		
Nombre de plans transversaux auscultés :	6	
Nombre de points par plan transversal mesurés :	8/12	(soit 63 points en tout)
Nombre de points documentés :	22	
Nombre de mesures effectuées :	976	

Figure 6 : l'auscultation planimétrique en chiffres

7.- Intégration dans le SIG

7.1- Constitution du SIG

Le résultat des opérations de mesures consiste, comme cela a été évoqué dans le paragraphe 4, en plusieurs séries de valeurs correspondant à la position de chaque repère suivi. Ces différentes mesures sont intégrées dans un SIG comportant des schémas et coupes du Monument sur lesquels sont reportés aux différents niveaux les positions des repères. Ces mêmes repères constituent les entités graphiques auxquelles sont associées les données quantitatives redéterminées lors de chaque opération d'auscultation. Une opération complète comporte un grand nombre de mesures qui sont ainsi intégrées dans la base de données (cf. Figures 5 et 6).

7.2- Base de données associées

Pour des raisons de facilité d'exploitation, le système de base de données retenu, pour le moment, est de type MS-ACCESS (cf. Figure 3).

Chaque nouvelle campagne d'auscultation donne lieu à une nouvelle table par zone d'opération. Ainsi retrouve-t-on des tables RA0xx, RA1xx, RA2xx, RA3xx comme tables prototypes pour les Résultats Altimétriques des niveaux 0, 1, 2 et 3.

De ces tables prototypes sont ensuite déduites des tables RAnop où « n » correspond au niveau et « op » au numéro d'opération et éventuellement RAnop_aaaa_mm où « n » correspond au niveau et « op » au numéro d'opération qui est alors décliné en « aaaa_mm » correspondant à l'année et au mois de l'opération en cas de reprise d'opération plusieurs fois dans l'année.

De ces nouvelles tables peuvent alors être déduites d'autres tables complémentaires RAN_SCHEMA_OPop permettant de ne comporter que les valeurs destinées à être représentées lors des différentes représentations dans le SIG. La création de ces nouvelles tables est le sujet de la composition de requêtes intéressantes.

Il en va de même pour le traitement et la constitution de tables sur les données planimétriques : RP3xx jusqu'à RP8xx pour les Résultats Planimétriques concernant les plans transversaux numérotés de 3 à 8 (« n ») pour chaque opération de mesures (« xx »).

7.3- Représentations graphiques

Les représentations graphiques correspondent à des schémas de coupes horizontales pour les différents niveaux auscultés altimétriquement et des coupes verticales correspondant aux différents plans transversaux auscultés planimétriquement.

Il y a 4 niveaux altimétriques, le niveau 1 comportant un Côté Nord et un Côté Sud. Le niveau 0 correspond au niveau du sol à la base des différents piliers ; le niveau 1 correspond à la galerie des collatéraux, le niveau 2 correspond aux clefs de voûte de la nef principale et à la galerie extérieure correspondante, le niveau 3 correspond aux clefs de voûte des croisés du transept.

Chaque repère représenté est ainsi associé aux tables de la base de données décrite dans le paragraphe précédent. Une représentation classique permettra d'afficher pour chaque repère, pour

n'importe quelle opération de mesure la valeur brute, le ripage élémentaire depuis la campagne précédente, le ripage cumulé sur plusieurs opérations. (cf. Figure 7).

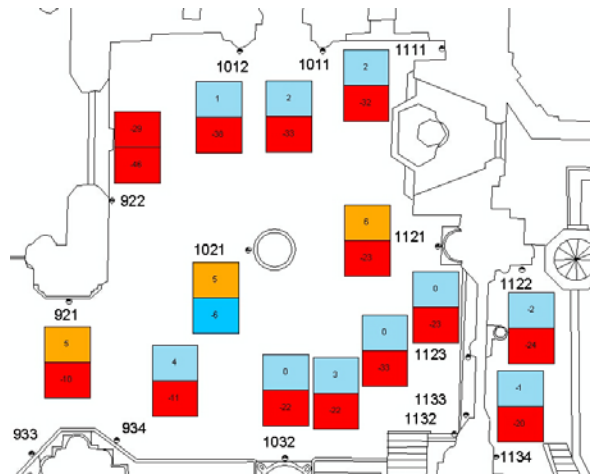


Figure 7 : Représentation classique d'un repère et des valeurs associées

La mise en place de ce SIG avec des données multi-temporelles permet le traitement et l'analyse du comportement du monument à travers le temps. Différentes exploitations possibles sont présentées dans le paragraphe suivant.

8.- Exploitation du SIG pour la confection du rapport de présentation des résultats

8.1- Traitements « classiques »

Les traitements considérés comme classique comportent l'affichage au niveau de chaque repère de la valeur du ripage élémentaire (« RE ») observé depuis la campagne de mesures précédente et la valeur du ripage cumulé (« RC ») depuis le début des observations ou depuis une campagne particulière (cf. Figure 8). Ces indices s'avèrent être des données quantitatives très précieuses pour la connaissance et la compréhension du comportement du monument. Les facilités de représentation fournies par le SIG et la modification des propriétés d'affichage permettent la composition des documents les plus parlants et les plus explicites.

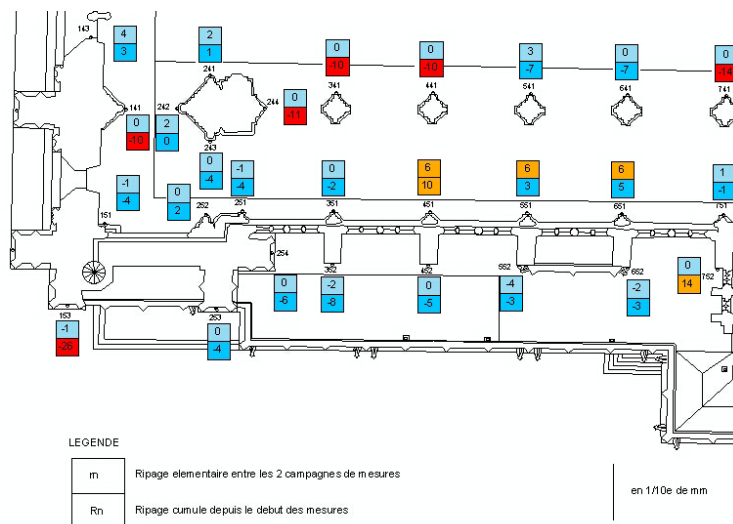


Figure 8

8.2- Traitements multi-temporels

Le caractère multi-temporel des données intégrées permet également de produire des documents comportant des comparaisons de comportement. Ainsi, des variations cycliques saisonnières ont pu être observées et reproduites d'après des campagnes de mesures répétées plusieurs fois – jusqu'à 4 fois - dans l'année. (cf. Figure 9).

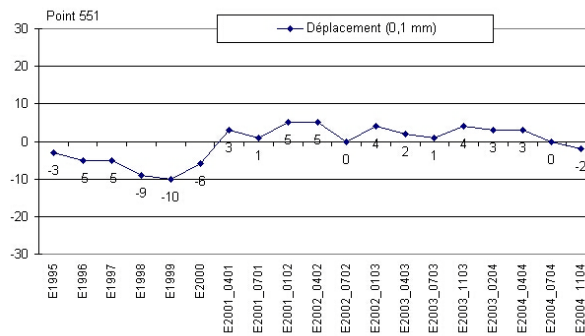


Figure 9 : comportement d'un repère dans le temps

8.3- Traitements 3D

En intégrant les schémas dans un système de coordonnées local, les cotes des repères sont traitées comme des attributs 3D. Les outils « 3D Analyst » permettent alors des traitements d'ensemble également très explicites. En effet, la création de couches sous forme de TIN sur la base des ripages élémentaires ou cumulés, puis la génération des rasters dérivés sous forme de Modèles Numériques de Déplacements forment, là aussi, une base de documents très intéressante pour la compréhension du comportement du monument. (cf. Figure 10)

Les paramétrages, les choix des différentes méthodes de traitement et leur comparaison sont ici des exercices très intéressants pour de futurs utilisateurs de données qui seront amenés à générer des documents compréhensibles et exploitables.

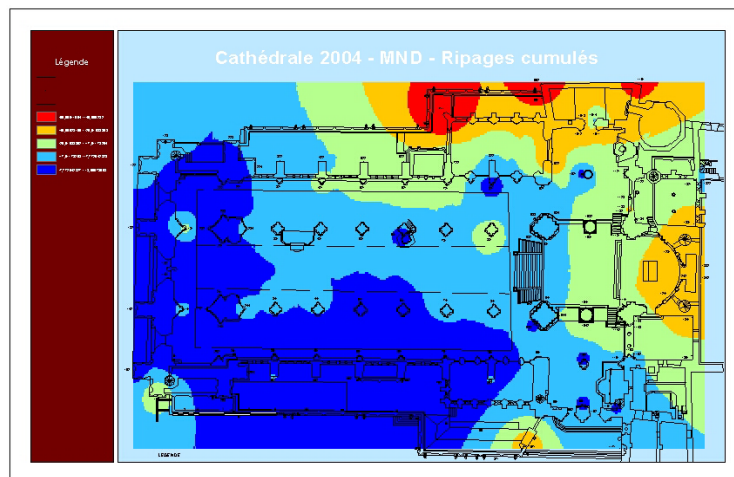


Figure 10 : Représentation du MND

8.4- Mise en forme et transmission des résultats

Une fois tous les différents traitements réalisés, paramétrés, et les différentes couches obtenues, il s'agit de générer des documents utilisables par les spécialistes. La transmission sous la forme d'un document publié sous « Publisher » au format PMF est ici très appréciable. Les multiples couches sont paramétrées et mises à disposition de l'utilisateur final qui n'aura pas à réinventer et à recalculer les différents traitements. (cf. Figure 11)

L'explication des possibilités de traitements est bien sûr nécessaire avant la constitution du document PMF, là aussi, le travail de dialogue, d'explication et la connaissance des multiples et puissantes possibilités du SIG et de ses applicatifs est très instructive.

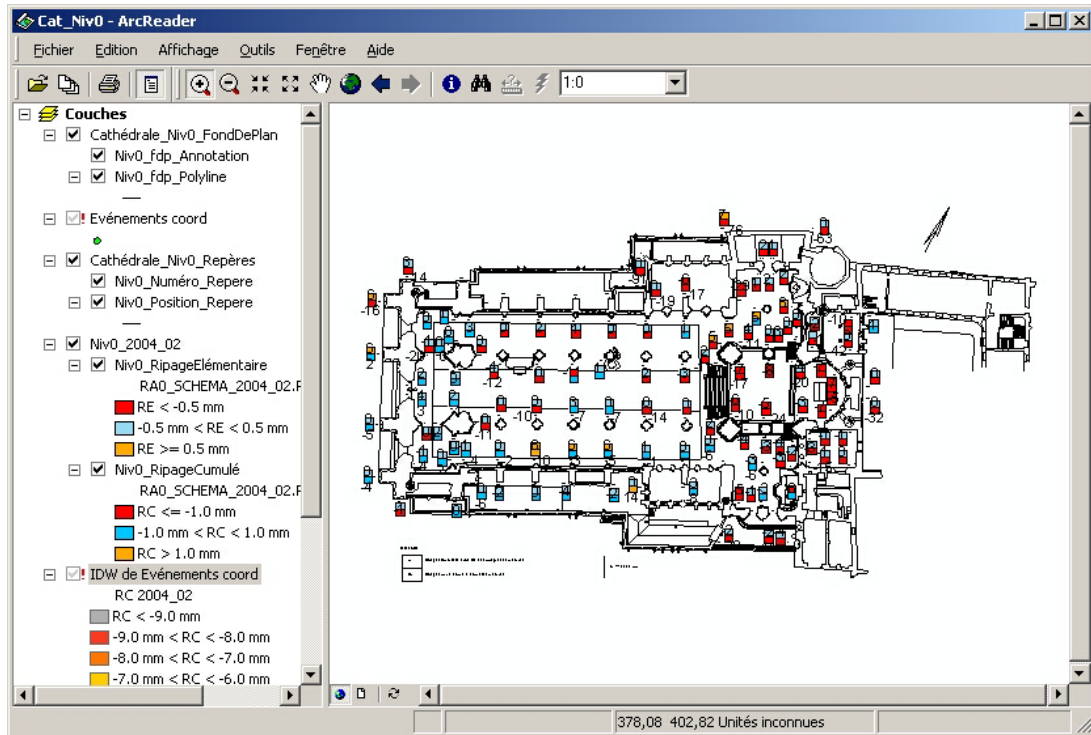


Figure 11 : Document PMF comportant les couches résultant des différents traitements

9.- Applications futures

9.1- Modèle 3D

Toujours dans un souci de meilleure lisibilité des résultats pour une meilleure analyse du comportement de la Cathédrale, un modèle schématique 3D est envisagé pour le futur. Il s'agira dans un premier temps de la reconstitution sous forme squelettique du modèle en associant les différents plans et coupes disponibles dans un seul et même projet. Les données associées étant toujours les mêmes, la représentation 3D permettra de mieux situer les différents phénomènes observés et de mieux les corréliser en fonction de leur localisation géographique dans différentes couches (cf. Figure 9 : Modèle 3D squelettique).

Tout un ensemble de nouveaux traitements pourront alors être mis en place en travaillant sur toutes les mesures à la fois et non seulement sur des mesures à l'intérieur d'une même couche.

9.2- Animations

Enfin, pour la compréhension et la simulation des phénomènes, l'utilisation d'animations est envisagée. Un applicatif comme « ArcScene » est alors un précieux outil pour la visualisation et pour la génération d'images animées.

10. Conclusion

Des travaux d'une telle envergure et d'un tel prestige ne s'offrent que rarement à une Ecole d'ingénieurs.

Les étudiants participent activement aux différentes phases de mesures, ce qui leur permet d'expérimenter un autre aspect de la profession de géomètre-topographe : la métrologie fine d'auscultation. Lors de tels travaux, seul le respect rigoureux des règles de l'art permet d'obtenir des mesures aux précisions requises pour ce type d'opération.

L'exploitation des données est un autre aspect très important de l'opération. L'utilisation des technologies SIG permet non seulement d'effectuer les traitements mais également de réfléchir à la

meilleure structuration des données permettant la réalisation d'analyses fines. La large gamme d'applicatifs ArcGIS d'ESRI (« ArcView, ArcCatalog, Publisher, ArcReader, 3D Analyst, ArcScene ») permet de faire réaliser aux étudiants une analyse complète des phénomènes observés et d'en produire des documents très utiles pour la compréhension du comportement dans le temps du monument.

Bibliographie

M. Koehl, 2003. *Dix ans d'auscultation de la Cathédrale de Strasbourg*. Séminaire UMR MAP – Arc et Senans.

M. Koehl, J. Ledig, 1999. *Auscultation topométrique de la Cathédrale de Strasbourg*. Revue Arts et Industries.

M. Koehl, 1994 – 2004. *Rapports sur l'auscultation topométrique de la Cathédrale Notre-Dame de Strasbourg*.