



La métrologie est omniprésente sur les grands chantiers. Ici le viaduc de Millau.

Métrologie et auscultation d'ouvrages

La sécurité haute précision

La surveillance dans le temps des altérations

Les activités de métrologie, que ce soit pour des ouvrages d'art ou pour des applications industrielles, sont fondamentalement stressantes et extrêmement exigeantes. Mais les cabinets qui les pratiquent les présentent toujours comme passionnantes, pleines d'imprévus et aux antipodes d'une routine monotone.

En revanche, si les risques sont nombreux, le fait de les assumer permet en contrepartie de dégager des marges plus confortables que dans d'autres domaines de la topométrie. Les évolutions récentes ont montré que la demande avait de bonnes chances de continuer à augmenter. Les cabinets qui s'y engagent ont toutes les raisons possibles pour développer une politique de qualité totale. Dans de nombreux cas, une certification est même devenue nécessaire. C'est un métier directement voisin de celui des géomètres-experts, qui pousse au maximum un de leurs domaines de compétences techniques ; ils peuvent donc aisément décider de s'y consacrer pourvu qu'ils consentent l'investissement nécessaire, en termes de matériels bien sûr, mais aussi et surtout en matière de formation de leur personnel.

Ailes d'avions, barrages, sites industriels, centrales nucléaires... Autant d'ouvrages qui nécessitent un suivi des déformations, par mesure de sécurité. Si les équipements sont d'une grande précision, leur utilisation réclame une extrême rigueur.

Michel Kasser, directeur de l'ENSG

Le terme de métrologie, dans le milieu professionnel des géomètres et du BTP, évoque tout d'abord l'ensemble des méthodes qui, depuis toujours, ont été mises en œuvre en appui à la construction des ouvrages d'art et des bâtiments divers. A ce titre, on trouve des traces de métrologie depuis la haute Antiquité. En effet, aucun grand bâtiment ou ouvrage hydraulique n'a jamais pu se passer de nivellement de précision. Plus récemment, au cours du ^{XX}e siècle, les techniques de construction dans le BTP se sont enrichies de quantités de méthodes nouvelles (le terme utilisé étant ici celui d'auscultation) parfois extrêmement hardies et proches des limites physiques des matériaux utilisés, ce qui a progressivement amené les maîtres d'ouvrages à se poser des questions sur l'évolution dans le temps de ces structures. Que faire face à ce problème ? Une simple inspection visuelle a longtemps été la réponse principale : les matériaux employés se

fissurent en cas de contraintes excessives, ce qui peut se repérer assez facilement. Mais certains ouvrages ne permettent pas ce type d'inspection à cause de leurs dimensions ou de leurs techniques de construction. Par exemple, lorsque les premières centrales nucléaires ont été construites, les tours aéroréfrigérantes ont été conçues sans anticiper des inspections futures. Une fois les échafaudages retirés, il n'y avait plus aucun moyen d'accéder aux surfaces, sauf à utiliser les services très coûteux d'alpinistes. Or, ces structures ont présenté progressivement les signes normaux de fatigue mécanique du béton armé, et il a alors été souhaité qu'on puisse s'assurer que rien d'anormal ne se passait, l'idée étant évidemment de détecter des éléments inquiétants bien avant que quelque chose de grave ne se produise. Les mêmes considérations se sont retrouvées pour des ponts suspendus, puis des immeubles de grande hauteur : la technique a permis

de les construire, mais il a fallu plusieurs décennies pour qu'une certaine sagesse apparaisse chez les maîtres d'ouvrage et qu'ils incluent la métrologie dans le processus même de conception et de suivi du vieillissement.

Vers les outils les plus précis de géomètres

Comment cette métrologie a-t-elle été conçue ? Dans les années 1950 et 1960, il s'est agi de faire le plus précis possible avec les outils existants, presque sans aucun développement technologique spécifique. S'agissant de mesures géométriques sur des distances assez importantes (quelques dizaines, voire cen-

taines de mètres), les outils de mesure des mécaniciens (les seuls habitués au centième de millimètre à cette époque) n'étaient plus adaptés : les plus grandes machines à mesurer tridimensionnelles ne dépassaient pas un champ de quelques mètres et ne pouvaient absolument pas être déplacées. Très naturellement, la demande de métrologie s'est donc tournée vers les outils les plus précis de géomètres, qui étaient ceux utilisés depuis longtemps pour les mesures géodésiques : théodolites (simples d'emploi et extrêmement précis) et mesures de distances avec des fils ou rubans invar étalonnés avec soin. C'est ainsi qu'une unité pionnière a été créée durant les années 1950 à

la direction de la géodésie à l'IGN, celle des TS (travaux spéciaux), qui s'est attachée à développer les méthodologies adaptées et à compléter les savoirs et les matériels requis. Matériels de centrage forcé très précis, matériels annexes de très haute précision (cibles, embases, cannes de centrage, trépieds lourds, etc.). Un des chantiers particulièrement emblématique de cette démarche a été concrétisé par le travail du regretté Jean Gervaise, issu des TS, pour mettre en place toute la métrologie ultra-précise requise par le premier synchrotron du Cern (Organisation européenne pour la recherche nucléaire), suivi par de nombreuses autres expériences, toutes extrêmement exi- ➤➤

Aéroréfrigérants de la centrale nucléaire de Saint-Laurent-des-Eaux (Loir-et-Cher).

J.-C. RAOUL / EDF



Des matériels et des mesures

Les théodolites et tachéomètres électroniques

La mesure d'angles obtenue peut atteindre une précision de l'ordre de 1 mm ou 2 mm à 1 km de distance. Sur des distances de quelques dizaines de mètres, on dispose donc d'une précision sans équivalent dans d'autres techniques, pourvu que les centrages soient de même niveau de précision. En outre, lorsque ces tachéomètres ont pu être motorisés, ils ont permis le suivi régulier de groupes parfois importants de réflecteurs fixés sur un ouvrage, ce qui permet alors un suivi temporel très précis de la géométrie d'un groupe de points.

Les moyens de centrage

Ils sont essentiels et doivent permettre de centrer divers appareils et leurs accessoires avec une précision de l'ordre de 0,01 mm, ce qui ne va pas de soi. Beaucoup de ces matériels de centrage forcé sont d'ailleurs issus des développements menés aux TS de l'IGN et surtout ensuite au Cern, tant les besoins de métrologie de très haute précision sur un grand nombre de points y ont été intenses. Les centrages des accessoires sont critiques eux aussi, ce qui est parfois oublié de certains praticiens : réflecteurs, cibles, etc., doivent eux aussi avoir un excen-trement, sinon nul du moins connu, ce qui différencie les matériels de topométrie courante de ceux qualifiés pour la métrologie, même si leurs aspects externes sont rigoureusement semblables. Et ces accessoires deviennent alors passablement onéreux, d'autant plus que le nombre requis peut s'avérer important pour traiter convenablement un chantier.

Tachéomètres électroniques, fils ou rubans invar

On peut établir les mesures de distances avec certains tachéomètres électroniques bien étalonnés lorsque la précision du millimètre est suffisante ; ces mesures peuvent aussi, encore aujourd'hui, être basées sur



M.-L. LUCA

des fils ou des rubans invar si les distances ne sont pas trop importantes. La mesure des distances a toujours été comparativement le maillon faible des chantiers de métrologie, avec un modèle d'erreur bien moins favorable que celui de la mesure d'angles. Mais, comme il faut aussi quelques distances pour mettre à l'échelle des micro-triangulations, c'est une partie inévitable.

Les matériels de photogrammétrie

Ils ont beaucoup évolué et un secteur complet, la métrologie photogrammétrique, a été développé à partir de ceux-ci. Dans un premier temps, il s'agissait du « ré-emploi » de technologies classiques sur des chantiers particuliers (l'IGN a là aussi été pionnier avec son unité de travaux spéciaux photogrammétriques dès les années 1960) : contrôles de formes de grosses pièces de fonderie ou de chaudronnerie, mesure d'objets de patrimoine comme des statues, des éléments de bâtiments, etc. Puis, l'imagerie

numérique est arrivée et les développements qui ont suivi ont ouvert de nombreuses possibilités nouvelles, qui se sont avérées être tout à fait adaptées à des opérations de métrologie, tout particulièrement pour des ouvrages sur lesquels il n'est pas aisé d'aller disposer des cibles ou des réflecteurs.

Les scanners laser

Plus récemment, les scanners laser ont apporté leur contribution à certains chantiers en complément, ou en remplacement, de solutions photogrammétriques, car ils ouvrent la porte à des mesures presque en temps réel, sans avoir besoin de disposer des cibles ou des marqueurs sur l'ouvrage. Il faut rappeler que disposer des cibles n'est pas une opération neutre : outre la difficulté technique, et donc les coûts pour certaines configurations, il faut signaler leur impact psychologique, parfois difficile à gérer, lorsque il apparaît ainsi publiquement qu'un ouvrage est sous surveillance. ■

►► géantes en termes de précision. Les TS avaient été conçus comme une extension des capacités de l'IGN en matière de géodésie en vue d'explorer de nouveaux marchés et de valoriser les investissements de l'Etat dans ce secteur tout en rendant des services innovants.

Les décennies suivantes ont vu progressivement les choses changer dans plusieurs directions. On a assisté à quelques développements de matériels spécifiquement adaptés à la métrologie : centrages forcés mécaniques normalisés et industrialisés, centrages optiques de haute précision, appareils électroniques de mesure de distance spécifiquement destinés à la métrologie (très haute précision, courte portée).

La démocratisation de la haute précision

Les matériels « normaux » de géomètre ont intégré progressivement ces technologies permettant la haute précision, avec un impact de plus en plus modéré sur leurs prix. Les géomètres ont ainsi pu choisir d'acquérir pour leurs travaux courants des matériels, certes un peu plus chers, mais qui leur permettent occasionnellement de traiter des chantiers de métrologie, sans en faire leur spécialité. Cette démocratisation de la haute précision a beaucoup facilité l'ouverture de ce marché, initialement « de niche ».

L'activité de métrologie a été intégrée dans un nombre croissant de cabinets de géomètres-experts, au fur et à mesure de la croissance des débouchés. Certaines sociétés se sont même spécialisées dans ce domaine, intégrant en outre des techniques issues de la photogrammétrie. Les maîtres d'ouvrages ont, eux aussi, progressivement intégré les besoins futurs de métrologie de leurs bâtiments de plus ►►

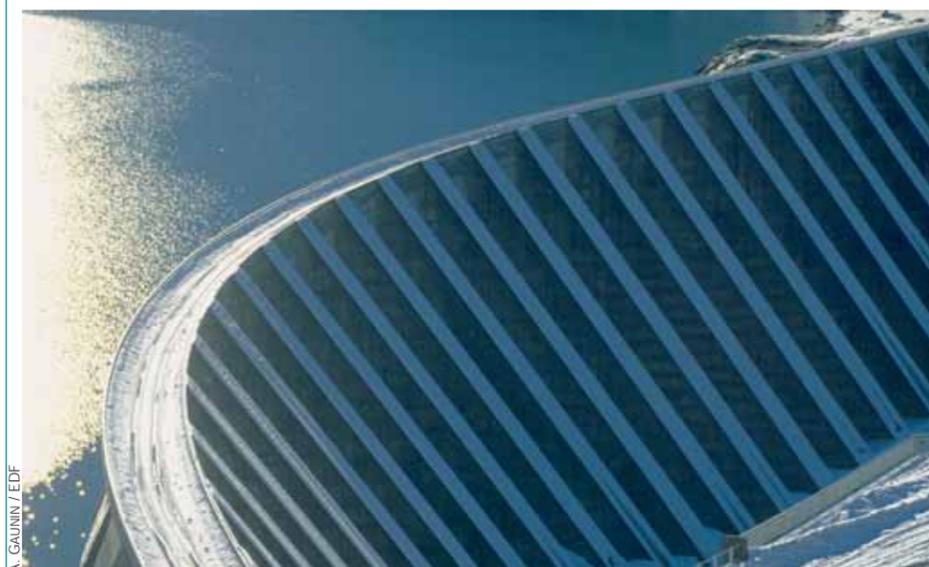


L. MANA

Les tours modernes de La Défense, l'antique pont du Gard et le barrage de Roselend, des ouvrages qui nécessitent une auscultation récurrente...



PHOTOIR



A. GAUJINI / EDF



SEMITCAR

Une foreuse de tunnel nécessite un positionnement d'une extrême précision.

en plus en amont de sa conception, et ont accepté d'y consacrer une dépense croissante.

Les tendances actuelles de la métrologie sont issues des possibilités offertes par les développements matériels (lire l'article page 32), très bien industrialisés, et par les moyens modernes de calcul et de communication de données. La métrologie aujourd'hui est très sollicitée pour fournir la géométrie des ouvrages, certes, mais aussi et surtout son évolution temporelle, avec parfois des fréquences de mesure se rapprochant du temps réel. L'exemple du métro d'Amsterdam est tout à fait typique, avec un ensemble de mesures sur toute une zone pouvant être affectée par des affaissements liés au chantier, et ceci chaque heure : plus de 70 tachéomètres motorisés visent en permanence plus de 5 000 réflecteurs depuis près de cinq ans ; un chantier emblématique des attentes actuelles des maîtres d'ouvrage dans ce domaine (lire aussi page 42).

Parmi les autres tendances, il faut noter l'importance de la métrologie comme ensemble de mesures de paramètres acquis en même temps que d'autres parfois

très différents (température, vitesse du vent, ensoleillement), mais aussi de nombreuses mesures *in situ* obtenues sur des capteurs locaux (jauge de contrainte, inclinomètres, etc.). Ce qui permet en théorie une connaissance très complète du « fonctionnement » intime de l'ouvrage face à des phénomènes externes. La logique est alors d'exploiter ces mesures par référence aux déformations attendues, issues de modèles de comportement établis par les bureaux d'études. Mais la masse de données acquises devient telle qu'il faut aussi développer un système expert, indispensable pour assister le maître d'ouvrage dans ce déluge de mesures.

Simuler les processus de mesure

La métrologie devient ainsi un des outils de ce système expert auquel elle participe, sans plus. La valeur ajoutée étant apportée lors de la synthèse des données acquises, il devient alors essentiel de savoir garantir la fiabilité et, plus simplement, la « qualité » des données au sens des normes Iso. Ceci requiert alors de fournir une véritable expertise lors de la

conception des processus de mesure, et il est désormais très fréquent que le client demande une simulation numérique à l'appui des descriptifs des solutions proposées. Du reste, pour l'entreprise exécutive, cette simulation est presque toujours nécessaire pour dimensionner correctement les mesures à effectuer.

Il est essentiel de mentionner le caractère critique que revêt actuellement le processus de maîtrise de la qualité en matière de métrologie : les enjeux des résultats des mesures sont souvent très importants compte tenu des incidences économiques d'un ouvrage dont les déformations sont jugées dangereuses. Dans de telles conditions, il faut s'assurer contre tous risques de fournir des faux résultats. Les clients demandent d'ailleurs de plus en plus souvent une certification de leur fournisseur et une copie des documents qualité est requise lors de la réponse aux appels d'offres.

Enfin, il faut souligner l'importance qu'a revêtu, dans le domaine de la métrologie, l'arrêté du 16 septembre 2003 relatif aux spécifications des levés (lire *Géomètre* n° 1999, décembre 2003). Ce texte permet désormais de spécifier de façon bien adaptée les levés de très haute précision, en utilisant la notion d'erreur interne et les calculs en conséquence. Le texte aide aussi à spécifier les modalités pratiques de contrôle et de recette technique de ces levés, et les textes d'accompagnement ont bien montré combien les matériels employés ne suffisaient pas à eux seuls à identifier la précision atteinte. Un même matériel, selon la procédure adoptée (avec donc des coûts de mise en œuvre différents), ne donne pas la même précision, sans même évoquer ici la plus ou moins grande adresse manuelle des opérateurs impliqués... ■

Le savoir-faire, investissement prioritaire des cabinets

Les marchés du domaine sont assez divers. Il serait d'ailleurs sans doute utile de disposer d'une étude de marché régulière afin d'orienter de façon efficace les investissements. De quelle nature sont-ils ? De matériels et de savoir-faire, trois sous-ensembles peuvent être définis.



Indispensable : la formation continue.

M.-L. LUCA

Matériel courant

Un ou plusieurs tachéomètres de haute précision, éventuellement motorisés. Particularité de cet investissement ? Il s'agit d'un matériel qui n'est pas spécialisé et qui peut bien évidemment servir à tous les travaux classiques d'un géomètre-expert. En matière de précision, qui peut le plus peut le moins, et un tachéomètre ultra-précis n'est pas plus compliqué d'emploi qu'un appareil plus courant, quand il est utilisé avec des procédures classiques. Il n'y a donc qu'un surcoût limité à amortir si les activités de métrologie n'assurent pas le plein emploi du matériel.

Matériel spécifique

Par exemple : centrales de mesures, logiciels d'acquisition, mais aussi matériels de centrages de haute précision et les accessoires nécessaires. Cet investissement peut s'élever à des montants non négligeables. En

revanche, il ne pourra guère être réutilisé sur des chantiers courants car il s'agit de matériels fragiles, de simples chocs d'apparence anodins pouvant faire perdre la qualité de leur centrage et donc leur précision.

Savoir-faire technique des personnels

Il s'agit d'une partie absolument fondamentale du dispositif permettant à l'entreprise de fournir une prestation de qualité. Ce savoir-faire est très particulier, peu répandu et pas nécessairement facile à acquérir. Les écoles d'ingénieur en géomatique fournissent en général un bon aperçu des problèmes à maîtriser, mais bien évidemment pas la pratique correspondante. Or, la métrologie est beaucoup affaire d'expérience, complétée d'une réelle virtuosité en matière de calculs, tant pour mener des simulations avant chantier que pour extraire le maximum d'éléments

des mesures réelles, pour évaluer la précision réellement obtenue et se mettre en position de pouvoir garantir les résultats. Il ne s'agit pas de savoir uniquement se servir de logiciels du marché, il faut aussi savoir exactement ce qui se passe à l'intérieur, ce qui est généralement difficile, sinon presque impossible, sauf pour des réutilisations de logiciels en *open source*. Idéalement, l'entreprise devrait disposer d'outils logiciels dont elle puisse garantir complètement le fonctionnement. En pratique, même si la programmation de compensations par moindres carrés n'est pas un exploit, on peut regretter que bien peu s'y risquent, ce qui conduit à ne disposer que de plus en plus rarement de l'ensemble de l'expertise requise dans l'entreprise, en s'en remettant de façon aveugle à des éditeurs de logiciels. Or, si l'expertise de ces derniers est rarement prise en défaut, on se trouve souvent en manque d'informations détaillées sur ce que fait réellement chaque programme. Sous couvert de confidentialité de développements industriels se cache souvent en réalité une certaine paresse en matière de communication, compliquée par de réelles différences de culture scientifique entre les experts ayant développé les logiciels et ceux les utilisant. On est parfois surpris de constater, dans le domaine de sciences pourtant extrêmement rigoureuses comme les mathématiques, les statistiques, ou simplement les différentes branches de la géomatique, à quel point les termes techniques sont difficiles à traduire et souffrent de véritables différences culturelles. Ces considérations rappellent que le savoir-faire technique des personnels est un investissement prioritaire, qu'il est d'ailleurs probablement la partie la plus onéreuse du dispositif, et aussi la partie la plus fragile. ■

TOUR D'HORIZON DES TRAVAUX

LES PLUS COURANTS

Michel Kasser, directeur de l'ENSG

La météologie est, par essence, une affaire de cas particuliers, c'est ce qui fait son intérêt. Mais, en même temps, c'est ce qui est à l'origine des risques encourus ; une réelle expertise technique de très haut niveau est donc toujours nécessaire, depuis la négociation technico-commerciale (il faut bien spécifier le besoin mais aussi bien évaluer les risques) jusqu'aux mesures et aux calculs finaux. Voici quelques éléments d'une liste non limitative des marchés actuellement significatifs.



O. ROCHARD

Les contrôles de routine de petits ouvrages d'art

L'exemple le plus fréquent est celui de ponts sur routes ou autoroutes. Il s'agit de cas d'emploi assez typiques de la topométrie classique du géomètre-expert, qui doit cependant être employée avec le plus de précision possible. Classiquement, un certain nombre de repères de nivelle-

ment sont installés ; en reprenant l'exemple du pont, ils sont placés sur le tablier, sur les piliers, sur les culées... Parfois, quelques repères sont installés loin de l'ouvrage pour servir de référence. On se pose alors la question – hélas sans fin – de la stabilité de cette référence ; un indice fort de réponse étant donné par la stabilité relative de plusieurs de ces repères, s'il y en a plusieurs (et un profes-

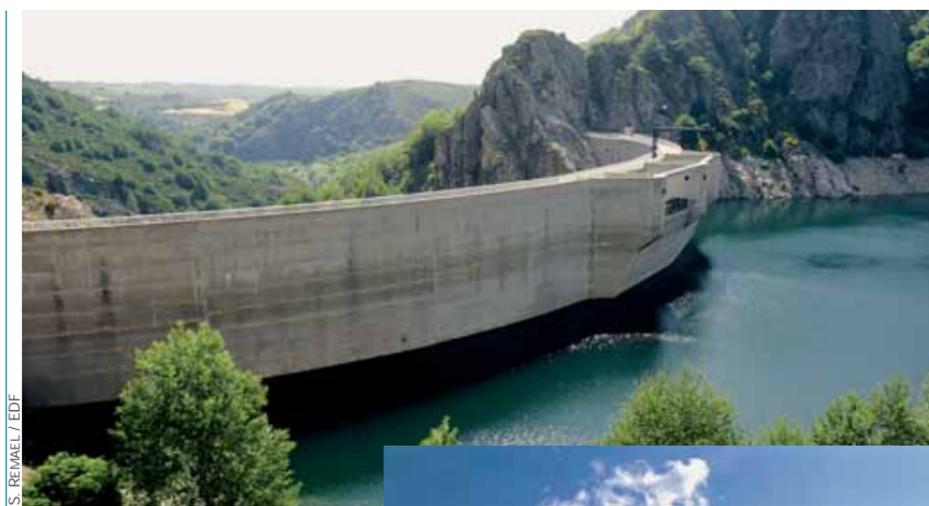
sionnel prudent ne répondra pas de cette stabilité s'il n'y a pas au moins deux repères). La technique normale étant ici celle du nivellement (dont la précision ultime reste impressionnante par comparaison avec tout autre méthode, même maintenant), l'emploi d'un niveau et de mires de haute précision en invar est nécessaire. Un certain savoir-faire est également indispensable, l'instrumentation moderne n'empêchant pas complètement toutes les fautes possibles, malgré les perfectionnements étonnants apportés par l'électronique et la lecture automatique : mires dont la nivelle est mal réglée (les mesures seront fausses et pourtant la fermeture altimétrique sera bonne), porte-mire négligent (mire tenue plus ou moins verticale, crapauds mal stabilisés), opérateur peu attentif (niveau mal réglé – ça arrive toujours, même avec les niveaux électroniques actuels – et inégalités significatives entre les portées). Prudence ; il s'agit de techniques ultra-classiques mais il faut les employer avec une vraie expertise, sinon la précision nominale du matériel n'est pas atteinte. Il n'est d'ailleurs pas rare de trouver des personnels non géomètres qui essayent d'utiliser eux-mêmes de tels matériels (qui ne sont pas tellement onéreux) : l'impression de sécurité qui se dégage est trompeuse et on pourra les surprendre à mal employer ces matériels, en toute bonne foi de leur part. On ne s'improvise pas géomètre...

Le suivi de remblais, de murs

Autre exemple, dans un type de chantiers assez ressemblants mais qui font intervenir des techniques différentes et moins classiques : le suivi de remblais, de murs en maçonnerie ou en terre armée. Ici, on peut parfois suivre l'altimétrie de repères, parfois aussi leur planimétrie selon le type de configuration, et l'emploi du tachéomètre est alors le plus indiqué compte tenu de l'accessibilité des points. A noter que, lorsque la matérialisation avec des repères pose problème (sols peu cohérents, difficultés d'accès), les levés au laser terrestre, ou au moins avec un tachéomètre capable de mesures de distances sans réflecteur, peuvent donner des résultats très satisfaisants. Quelques milliers de points avec un écart-type d'un centimètre peuvent permettre de déceler un mouvement d'ensemble sur un versant instable, un talus, un mur en terre armée, etc., sans matérialisation des points mesurés. De tels marchés sont généralement liés à des travaux pour des voies rapides nouvelles, avec beaucoup de remblais-déblais, mais aussi pour des routes dans des terrains avec des pentes fortes. Pour ce cas, comme pour le précédent, il pourra s'agir de marchés récurrents, se prolongeant sur plusieurs années, donc assez faciles à gérer puisque sans contraintes calendaires particulières.

Le contrôle de grands ouvrages routiers

Plus spécifique comme travail, le contrôle de ponts suspendus, de viaducs, ou autres grands ouvrages routiers assez largement déformables selon la charge, le vent, etc. Il s'agit de travaux beaucoup plus spéciaux, chaque cas étant particulier. Une ingénierie préliminaire, parfois très complexe,



S. REMAEL / EDF

doit être mise en œuvre pour optimiser les mesures à effectuer en fonction des besoins précis, pas toujours faciles à spécifier. Il est souhaitable d'être proche de la maîtrise d'ouvrage avant que l'appel d'offres ne soit rédigé, afin d'aider à sa rédaction. Sinon, la formalisation des besoins peut conduire à des spécifications irréalistes, ou inutilement précises, engendrant des coûts trop élevés pour ceux qui tenteraient de les respecter, sans parler de la distorsion de concurrence avec ceux qui ne les respecteraient pas en les « interprétant » à leur façon. Il y a donc une place pour des prestations de pure assistance à la maîtrise d'ouvrage. Là encore, ce type de chantiers peut être récurrent sur plusieurs années. En revanche, il n'est pas rare qu'il y ait des impératifs extrêmement forts de planification, pas toujours faciles à faire coexister avec les autres activités de l'entreprise. Par exemple pour un pont suspendu qui est soumis à des essais en charge, il est hors de question, au moment critique, de se trouver avec des « personnels clés » malades ou un matériel de mesure essentiel en panne... Bien entendu, de telles sujétions et de tels risques permettent en contrepartie des marges mieux rémunérées.



G. LEMARCHAL / EDF

Les ouvrages à hauts risques

Les ouvrages dont la sécurité est très critique et dont la déformation attendue est faible : barrages, centrales nucléaires. Ici encore, chaque cas est un cas d'espèce, mais la norme en la matière est d'être le plus précis possible et d'apporter une garantie absolue sur les résultats. Tous les moyens techniques possibles pourront être proposés, tant avec des méthodes topométriques qu'avec d'autres moyens annexes. Citons par exemple les méthodes utilisant l'interférométrie radar pour disposer d'une meilleure connaissance des mouvements des terrains environnants, et ainsi des zones où il est logique d'aller implanter des repères de référence. Dans de tels cadres, une certification est de plus en plus indispensable, tant les enjeux économiques liés à une mauvaise météologie peuvent être graves. En revanche, les calendriers d'exécution des mesures ne sont pas nécessairement très contraignants.

Le barrage de Puylaurent et la centrale nucléaire de Nogent-sur-Seine.



LEICA GEOSYSTEMS

Les technologies de pointe permettent une précision au dixième de micron.

Les installations industrielles

Lorsque des machines requièrent un positionnement très précis, lorsque des chemins de roulement doivent être parfaitement alignés, etc., que ce soit pour des installations initiales, ou pour des contentieux. Le Cern est un excellent exemple de ce type de cas, les besoins exprimés par les physiciens ayant toujours été extrêmement exigeants, avec des centaines de machines à positionner, parfois mieux qu'au dixième de millimètre, sur plusieurs kilomètres... Un extraordinaire challenge qui a été régulièrement réussi depuis plus de trente ans, avec des moyens expérimentaux et pionniers en la matière, qui ont ensuite été repris un peu partout dans le monde. Dans les milieux industriels «normaux», le vrai problème est à peu près toujours celui des spécifications réelles. La plupart du temps, elles sont exprimées par des personnes ayant une culture de mécaniciens, et ne sont pas vraiment réalistes pour des situations impliquant des dimensions de plusieurs dizaines, voire centaines de mètres. Dans ce registre, un recalage sur les termes techniques de l'arrêté de 2003 (lire *Géomètre* n° 1999,

décembre 2003) est de nature à bien faciliter les négociations. Ce sont des domaines où l'expertise est souvent difficile à expliquer, mais dans lesquels chaque cas est encore un cas d'espèce. Une excellente maîtrise de l'analyse d'erreurs est ici indispensable car il faut généralement pouvoir donner des conclusions opposables à des tiers, et ne donnant pas prise à des contestations ultérieures.

Les surveillances de surface pour des travaux souterrains

Métros, tunnels, tous travaux qui se programment de plus en plus souvent dans nos sociétés urbanisées, dans lesquelles le foncier devient tellement cher qu'il est préférable de passer en voirie souterraine. Ces chantiers mobilisent des financements considérables, avec des impacts sociétaux très complexes. Ceci engendre un besoin de rigueur et de tenue des délais en matière de déroulement du chantier, qui a lui seul justifie une métrologie soignée. En outre, le risque de voir tous les riverains réclamer la remise en état de leurs bâtiments pour la moindre fissure visible, et pas nécessairement liée au chantier,

rend hautement souhaitable le fait de pouvoir opposer des mesures objectives à toutes demandes. On arrive ainsi à un suivi géométrique en temps réel de milliers de points (lire l'exemple du métro d'Amsterdam page 42), éventuellement contrôlé par un organisme tiers afin de couper court à des demandes indues. Ces mesures permettent aussi au responsable du chantier de savoir à temps s'il se passe quelque chose d'imprévu dans le comportement des couches géologiques concernées, de petites déformations pouvant servir de précurseurs à des événements catastrophiques (fontis, effondrements...) qui entraîneraient au minimum des coûts importants, au pire des victimes. Cette métrologie très sophistiquée exige des financements importants, qui s'expriment volontiers comme un pourcentage du coût total de l'ouvrage. Alors qu'il y a vingt ans on ne dépassait que rarement 0,1 % du coût total en métrologie, actuellement certains chantiers atteignent 4 %, ce qui est signe de la maturité des relations entre le BTP et la métrologie. La mise au point et l'exploitation de dispositifs de mesure ne sont souvent pas suffisantes, il y a des réseaux de données à établir, un système d'information temps réel, des astreintes de surveillance, etc., qui rendent logique et très productive une association solide entre le géomètre-expert et un industriel connexe au BTP, chacun restant maître de son domaine d'expertise.

Le suivi de risques géologiques

Tant naturels (glissements de terrain) que d'origine anthropique (par exemple la déprise minière, suite à l'abandon de mines ou de carrières en fin d'exploitation). Les enjeux sont

la plupart du temps la protection de voies de communication, que les contraintes géographiques forcent à passer en contrebas de versants parfois dangereux, ou le contrôle à long terme de zones parfois habitées et sous lesquelles des galeries ont été abandonnées. Ces surveillances s'analysent très bien selon les modèles précédemment décrits, avec des contraintes moindres. Pour les glissements de terrain, la fréquence des mesures peut être très ralentie dans la plupart des cas et, pour les subsidences minières, il s'agit des mesures de nivellement, d'interférométrie radar, voire de mesures GPS, mais sans que le temps réel soit de mise. Les contraintes de chantier sont donc faibles, seule l'absolue maîtrise des erreurs reste indispensable. Ces types de risques sont généralement supervisés par une expertise issue de l'équipement (laboratoires des Ponts-et-chaussées en particulier), et le BRGM est également un opérateur très actif du domaine. Mais il est fréquent que les dispositifs de mesure géométrique soient mis en œuvre par des géomètres-experts ; il existe donc de réels marchés dans ce domaine.

Le suivi d'éléments sous contraintes

La mesure de déformations de pièces de grandes dimensions sous contraintes avec, pour exemple souvent cité, des mesures faites sur des ailes d'avion lors d'essais statiques ou dynamiques. En fait, ces situations se rencontrent aussi pour d'autres secteurs. Il s'agit de marchés très spécialisés et les points essentiels ici sont la maîtrise de la précision réelle et la capacité de mesurer en continu. Les résultats sont interprétés par les bureaux d'études, la seule valeur ajoutée apportée



G. GOBET / AFP

par le prestataire de service concerne encore sa capacité à garantir la valeur réelle de l'erreur sur la mesure, ce qui n'est pas un exercice toujours aisé dans les conditions concrètes de travail. Il est souvent demandé de réagir très rapidement, ce qui n'est bien évidemment pas propice à des réflexions approfondies, mais qui permet alors de valoriser l'expérience acquise.

La géométrie d'objets de grandes dimensions

La mesure de la géométrie détaillée de zones complexes, ou d'objets de grandes dimensions, où la mesure précise du «tel que construit» est critique. On rencontre ce genre de demandes par exemple dans des chantiers navals, lorsqu'un navire ou une plate-forme pétrolière est construit en plusieurs sections. Des mesures avant les opérations de raccordement sont alors indispen-

sables pour que l'aboutage se passe bien. On rencontre aussi ce cas lorsqu'il faut intervenir sur un volume limité dans lequel transitent de très nombreuses tuyauteries, par exemple pour en ajouter une. On se pose alors la question de savoir comment, dans un espace très encombré, il faut faire pour ajouter cet élément nouveau. Un cas extrême consiste même à traiter ce cas de figure dans un environnement hostile, par exemple une zone de centrale nucléaire où les rayonnements rendent quasi impossible un travail humain. Il s'agit alors d'effectuer toutes les mesures en utilisant un système robotisé ou piloté à distance. Les mesures géométriques détaillées de tels environnements deviennent assez difficiles à mener, mais elles se basent sur des techniques de métrologie classique, parmi lesquelles le levé laser est de plus en plus utilisé. ■

Assemblage des pièces de l'Airbus A320 à Toulouse.

Certains cabinets sont spécialisés dans les chantiers spectaculaires

Quand un cabinet de géomètres-experts développe l'essentiel de son activité autour de la métrologie industrielle, l'erreur est interdite.

De nombreux cabinets de géomètres-experts ont développé une activité de niche en métrologie, souvent avec un ou plusieurs clients qui, au fil des années, tissent des liens étroits avec le professionnel. C'est également le cas pour la surveillance d'ouvrages.

En revanche, d'autres ont développé une véritable spécialisation. Certaines sociétés se sont développées sur ce créneau, avec à la clé une présence très importante sur la plupart des grands projets industriels.

Pour Laurent Blanc, géomètre-expert DPLG, responsable la société Setis, installé à Grenoble, des activités en ce domaine (douze personnes dont trois ingénieurs), il faut en fait distinguer les activités de topométrie industrielle de

celles de la métrologie dimensionnelle. Si, pour les premières, il s'agit d'une mise en œuvre classique du métier de base du géomètre-expert, avec des précisions de l'ordre du millimètre, pour les secondes la précision est fréquemment de l'ordre du dixième de millimètre. «*Les deux activités sont réellement distinctes. C'est évidemment dans la métrologie industrielle que les exigences sont les plus grandes et surtout que les enjeux économiques sont les plus importants, et qu'il n'y a aucun droit à l'erreur*», explique-t-il. Les chantiers industriels nécessitent fréquemment une précision absolue. Assemblage de l'A380, centrales nucléaires, projet LHC du Cern, chantier Alma de radiotélescope au Chili, laser méga joule près de Bordeaux pour remplacer les essais nucléaires en Polynésie, autant de réalisations sur lesquelles Laurent Blanc et son équipe sont intervenus. Sur ce type de chantier, une seule personne est généralement détachée. L'important est de travailler en temps réel. «*Le géomètre-expert ou le contrôleur est*

intégré dans les process d'assemblage. Il intervient donc en binôme avec l'équipe de mécaniciens et donne ses consignes. L'ennui c'est que, très souvent, son intervention n'est pas intégrée dans les plannings, ce qui crée une pression supplémentaire.» Pas question de faire attendre une chaîne de montage, de stopper un haut-fourneau ou de bloquer une centrale nucléaire. «*Tout le monde sur un chantier nous attend : monteur, fraiseur, mécanicien. Nous n'avons pas le droit à l'erreur mais il nous faut aussi savoir dire stop. C'est une particularité de cette activité par rapport aux tâches plus classiques du géomètre-expert. Nous n'avons pas le temps de faire les corrections nécessaires au cabinet. Il faut agir immédiatement, sur le chantier.*»

Un fort investissement au départ

Setis, par exemple, travaille beaucoup avec EDF (Areva) sur les centrales nucléaires, étant associée à un programme national de remplacement des couvercles des cuves. Ce qui consiste essentiellement à guider les équipes techniques pour régler les rails de ces couvercles, le plus souvent en milieu sinon hostile du moins dangereux. Il faut aller vite, et ne pas se tromper, avec une précision en temps réel au dixième de millimètre... «*L'avantage de ce type de chantier c'est que ce sont nos outils qui vont vers la pièce à contrôler. Travailler sur site est beaucoup plus intéressant que de faire des essais en salle blanche.*»

Décrocher de tels marchés n'est pas chose facile. «*C'est l'association des outils classiques du géomètre-expert, par exemple le théodolite, et de l'informatique, qui nous permet d'intervenir. Mais les donneurs d'ordres ne s'attendent pas à nous avoir devant*



PHOTOS M. RAVELET

eux.» Cependant, le théodolite de base, si précis soit-il, ne suffit plus. Les grands marchés nécessitent des laser poursuite, avec un fort investissement de départ puisque l'entrée de gamme se fait à 100 000 euros (le double il y a quelques années). Mais ce type de matériel permet une mesure en temps réel très précise. Le laser suit un réflecteur intégré sur la pièce à contrôler pour dire instantanément si tout se passe comme prévu. Les inconvénients sont le poids, de l'ordre de 200 kg, et l'exigence d'un espace suffisant. «*En fait, sur un grand chantier, il n'y a rien d'acquis, aucune technique unique*», précise Laurent Blanc. Souvent il faut, au cas pas cas, s'adapter. La vidéo-grammétrie par exemple permet un contrôle au soixantième de seconde, en s'affranchissant des vibrations. Ce qui peut être un atout sur un sol instable. Il faut également les logiciels adaptés. «*Il en existe dans le commerce, mais ils ne peuvent pas tout résoudre. Par exemple, lorsque nous intervenons sur les couvercles des centrales nucléaires, nous avons développé notre propre logiciel pour permettre une action très*

rapide, en intégrant les données de dosimétrie pour éviter d'exposer les personnels.» Aller vite et respecter une précision de l'ordre du dixième de millimètre, tel est le challenge.

La base Iso, mais bien au-delà...

Sur un plan pratique, ce genre de dossier nécessite un fort travail en amont. Avec notamment une phase d'étude qui permet de bien cerner le projet, de définir les outils à y consacrer et les procédures à faire intervenir. Il faut souvent aider le donneur d'ordres pour qu'il exprime ses attentes, ses contraintes, sa demande de précision... Vient ensuite l'étude de faisabilité, parfois des tests grandeur nature sur certaines pièces. Lorsque le professionnel débarque sur le chantier, ce n'est donc que l'aboutissement de nombreuses étapes préalables. En métrologie industrielle, chaque chantier a sa particularité. Pour le projet LHC du Cern, il a fallu contrôler la géométrie des aimants avant de les

descendre dans le tunnel et de vérifier leur positionnement millimétrique. Pour le télescope au Chili, la précision demandée était un écart de forme d'un dixième de millimètre sur une parabole de 12 m de diamètre. A l'arrivée, l'écart n'était que de 37 microns... «*Ce qui est intéressant sur ces chantiers, c'est que, souvent, nous travaillons sur un prototype, et qu'il y a ensuite un retour d'expérience*», explique Laurent Blanc. Pour les grands chantiers industriels, quelles sont les garanties réclamées par les donneurs d'ordres? «*Pour notre part, nous ne sommes pas qualifiés Iso*» explique Laurent Blanc. «*Nos donneurs d'ordres nous l'imposent d'autant moins qu'ils ont souvent des exigences supplémentaires. Par exemple, pour nos chantiers avec EDF, nous sommes audités sur la base Iso mais bien au-delà, pour être habilités à travailler en milieu nucléaire. L'important ce n'est pas la norme de base, mais le fait de répondre exactement aux exigences de nos clients. C'est ce qui est passionnant au quotidien.*»

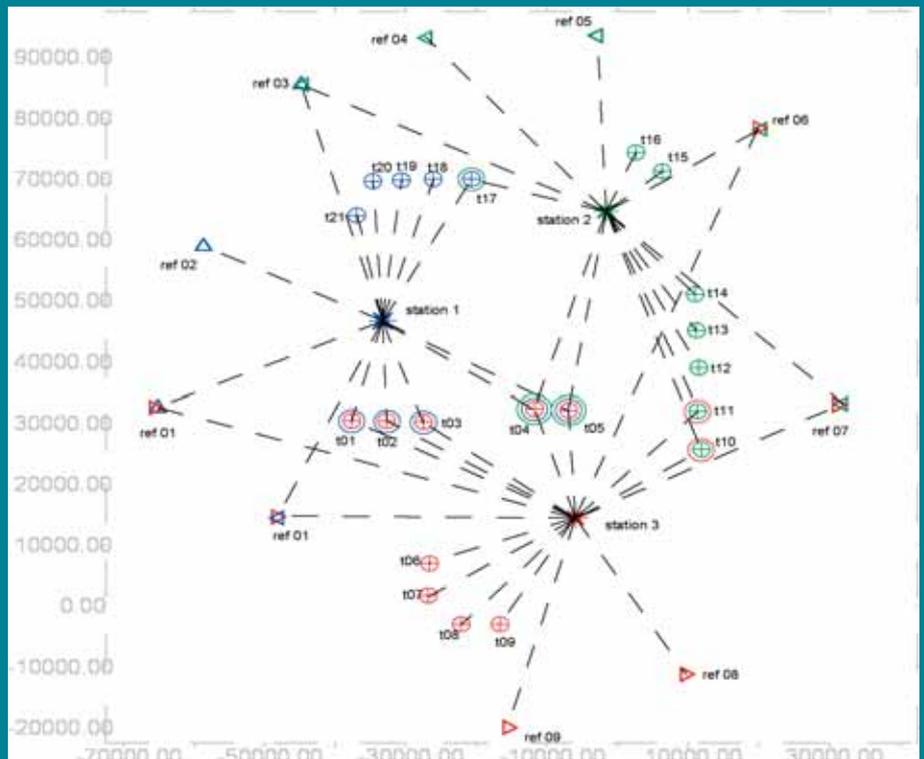
Michel Ravelet



La surveillance horaire des travaux du métro d'Amsterdam



DOCUMENTS SOLIDATA ET IGN

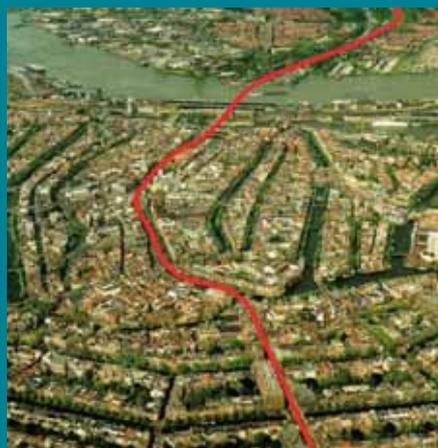


Après la Seconde Guerre mondiale, la ville d'Amsterdam (Pays-Bas) disposait d'un réseau de tramway bien conçu mais qui ne sortait pas des limites d'avant-guerre de la ville. La municipalité décida donc, comme c'était l'usage à l'époque dans beaucoup de pays d'Europe, de remplacer le tramway par un métro souterrain. Ce choix devait permettre de relier de manière efficace les banlieues au centre-ville. La première ligne ne fut inaugurée qu'en 1977 et c'est en 2004 que fut ouverte la dernière section.

Dans une ville déjà quadrillée par de nombreux canaux, la surveillance d'éventuels affaissements de terrain et l'auscultation des bâtiments de surface sont impératives. Les moyens mis en œuvre étaient donc importants (lire ci-contre).

Ci-dessus, une station totale motorisée et l'implantation de réflecteurs sur un immeuble.

La figure ci-dessus montre la répartition typique des figures élémentaires de surveillance, avec les cibles visées et les sites des stations totales : certaines cibles sont visées par deux stations, et un calcul complet en bloc par moindres carrés est mené à la fin de chaque cycle de mesures, c'est-à-dire chaque heure. Ceci permet d'informer avec très peu de délai les responsables du chantier si des mouvements inattendus apparaissent sur les bâtiments, et évite ainsi toute évolution néfaste liée au chantier. Une organisation informatique particulièrement étudiée permet tous les niveaux de gestion, depuis le suivi temporel de chaque point jusqu'à des synthèses plus ou moins complexes, avec bien entendu la totalité des plans d'implantation des réflecteurs immédiatement accessibles.



- Longueur du projet : 3,8 km ;
- 74 systèmes Cyclops (tachéomètres motorisés) ;
- 24 h / 24, 7 j / 7, 5 375 cibles ;
- 174 sondages (de 12 m à 74 m de profondeur) ;
- 1 422 inclinomètres et 741 extensomètres ;
- 86 PC ;
- 4 030 repères de nivellement ;
- Jusqu'à 75 cibles par station totale ;
- Distances de 3 m à 100 m.