

Métrie dimensionnelle

# Un marché haute technicité

# Répondre aux nécessités des industriels

Le géomètre dispose de toute une panoplie de matériels qui permettent souvent d'obtenir une extrême précision. Mais, sans une analyse approfondie, ces outils seuls ne permettent pas de se lancer facilement dans des activités de métrologie industrielle. Lorsque la précision nécessaire descend au millimètre et parfois bien en deçà, il est vrai qu'il faut une solide expérience et une grande rigueur intellectuelle afin d'aider le donneur d'ordre à préciser à la fois ses besoins et sa demande. Mais l'industrie a parfois besoin de très grandes précisions et les gammes d'erreurs tolérées, ainsi que les dimensions concernées, font que le géomètre peut très bien traiter certaines de ces demandes. Et il se rend extrêmement utile, car il en va de la sécurité des processus et de la qualité des produits du client. Son œil peut être un atout précieux, car certes il sait mesurer, mais en plus il a l'habitude de tenir compte de multiples facteurs externes, tant techniques qu'humains, qui impactent directement l'adéquation des résultats obtenus aux attentes du client industriel concerné. La métrologie dimensionnelle peut donc être un domaine d'action extrêmement intéressant pour les géomètres qui se plongent dans cette activité.

*Le géomètre peut jouer un rôle très important en métrologie dimensionnelle dans le domaine de l'industrie et des ouvrages d'art. Il sait notamment déterminer les besoins précis d'un donneur d'ordre aux prises avec un problème urgent à traiter.*

MICHEL KASSER  
professeur de géodésie (HEIG-VD, Suisse)

Dans le secteur de la métrologie dimensionnelle, le géomètre joue un rôle très important. Expert de la mesure, son rôle peut devenir essentiel pour déterminer les besoins exacts d'un donneur d'ordre, face à un chantier et à des étapes bien identifiées, avec sa connaissance des matériels existants.

## L'étude des besoins des donneurs d'ordre

La métrologie dimensionnelle (mesure des dimensions) est par exemple au cœur des métiers de la mécanique, et pour autant ne concerne en général pas que le géomètre: pour une montre mécanique de luxe, il s'agit de maîtriser le micron, voire mieux, sur un espace de quelques centimètres. Pour le géomètre, quelle est la zone de mesures qu'il est intéressant d'analyser? Celle des objets allant de quelques mètres à quelques hectomètres. Les géomètres utilisent en effet des

appareils qui sont souvent bien plus précis que ce qui est requis pour les travaux courants, et ils ont donc souvent les moyens techniques pour s'intéresser à ce domaine de mesures, même s'ils ne s'en servent pas toujours. Et quelle est la gamme de précisions qui est concernée?

Typiquement, tout ce qui s'approche des limites imposées par l'environnement normal de travail, donc entre quelques centièmes de millimètre et le millimètre. Il faut en effet considérer que, même dans un environnement favorable, les effets des variations incontrôlables de la température de l'air créent une barrière de précision de l'ordre de 1 ou 2 ppm. De ce fait, il n'est pas envisageable de garantir mieux que 0,2 mm sur une distance de 100 m, et diverses autres considérations montrent qu'une telle valeur est même extrêmement difficile à atteindre.

Quand il s'agit de dimensions importantes, le géomètre est souvent très bien outillé pour



HEXAGON

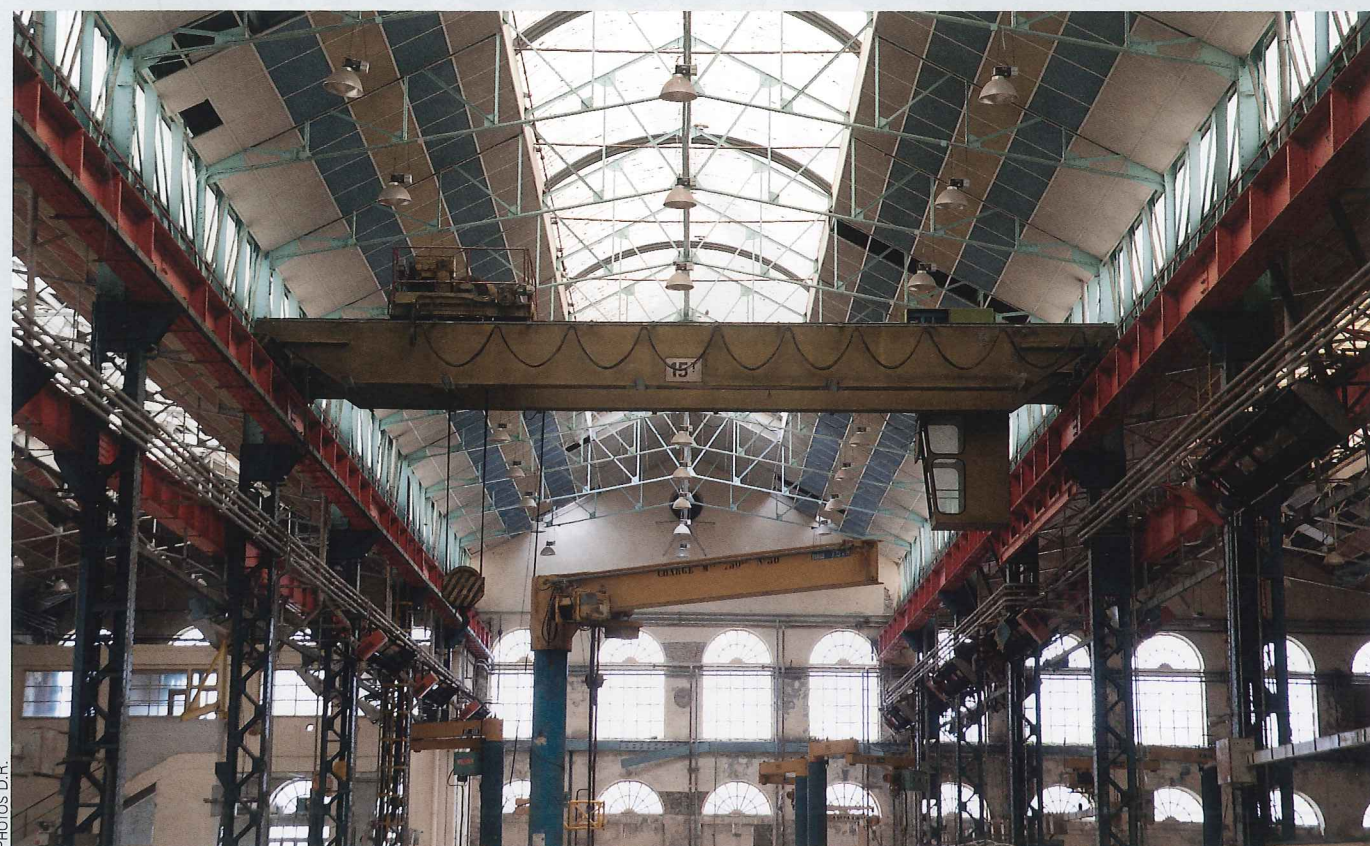
intervenir. Mais dispose-t-il du vocabulaire adapté? C'est, souvent un domaine où règne une grande incompréhension. Le géomètre est formé à la mesure, et surtout à l'expertise de sa précision effective, obtenue grâce aux redondances souvent importantes de ses processus, et à l'aspect presque toujours indirect de ses mesures. Ainsi, il livre fréquemment des coordonnées, obtenues de manière très indirecte par des mesures d'angles, de distances, de temps de parcours d'une onde depuis un satellite, etc. Mais c'est l'un des seuls domaines techniques où cette culture peut être considérée comme normale. Lorsqu'on se rapproche des professionnels de la mécanique,

les mesures directes des grandeurs sont la base, et l'expertise métrologique est bien plus simplifiée: on mesure au millimètre, au dixième, au centième... Et ceci crée un environnement où la vraie valeur de la précision réellement requise est difficile à trouver. Les géomètres ont l'habitude de devoir interpréter les besoins de leurs clients, qui souvent demandent « le millimètre » ou « le centimètre » sans trop envisager l'implication financière, par exemple d'une précision de 3 cm réellement nécessaire et suffisante dans un cas bien identifié, par rapport à une demande pour « le centimètre », sans même parler de ce qui est imaginé par le donneur d'ordre,

plutôt écart-type ou plutôt tolérance? Et si tolérance, alors à quel seuil? Cet approfondissement a été formalisé dans l'arrêté de septembre 2003 sur les précisions des levés, mais beaucoup reste encore à faire dans ce domaine vis-à-vis des donneurs d'ordre. Il est donc prudent, lors des interventions dans le domaine de la métrologie dimensionnelle, de prévoir une phase préliminaire d'approfondissement très poussé des vraies spécifications en matière de précision, sauf à s'exposer à des situations délicates à gérer ensuite. Ces problèmes ne sont pas l'apanage des professionnels de la mécanique, car on en rencontre au moins autant avec ceux du génie civil. ■

Machine de mesure tridimensionnelle (MMT) à bras horizontal d'Hexagon.

# Les types de chantiers envisageables



PHOTOS D.R.

En tenant compte des précisions atteignables, quels sont les types d'objets pour lesquels un géomètre-expert peut envisager des mesures ?

La liste n'est pas exhaustive, elle va des constructions par exemple en acier ou en béton dont de petites variations de géométrie peuvent traduire une évolution critique, jusqu'à des objets industriels de plusieurs dizaines de mètres :

- hélices de navire ;
- grandes pièces de chaudronnerie dans l'industrie nucléaire ;
- voilures d'avions lors de tests de fatigue et de déformations

sous contraintes ;

- grands objets fabriqués séparément et appelés à être combinés en un seul, comme des sections de navires construites sur des sites différents, ou des sections de fuselages et de voilures d'avion ;
- éléments de façades complexes dans des bâtiments ;
- matériels industriels dont les positionnements relatifs ont un caractère critique, comme des turbines ou des lignes d'arbres dans des centrales hydroélectriques, thermiques ou nucléaires, ou des ponts roulants, etc.

Il y a donc ici deux grands types d'interventions possibles : celui des mesures ponctuelles

sur des cibles bien définies, répétées ou non, plutôt éligibles à des instrumentations topométriques classiques, et celui des mesures de surfaces complexes, qui sont souvent traitées par des méthodes impliquant des scanners laser ou de la photogrammétrie. En outre, et compte tenu de la similitude des contraintes et des spécifications rencontrées, il faut inclure dans le périmètre des mesures industrielles tout ce qui touche aux ouvrages d'art. Essentiellement dans le domaine routier et autoroutier mais aussi dans la production d'électricité, on a construit depuis un demi-siècle une quantité impressionnante d'ouvrages en béton et,

pendant longtemps, aucun protocole de suivi du vieillissement de ces ouvrages n'avait été prévu. Les maîtres d'ouvrages concernés ont progressivement pris conscience de la nécessité de vérifier périodiquement que le comportement sous l'effet des charges limites restait conforme aux calculs initiaux. Mais les mesures à effectuer dans de tels cas sont souvent beaucoup trop onéreuses pour pouvoir être renouvelées fréquemment, de sorte que la grande majorité de ces ouvrages ne reçoit actuellement aucun contrôle géométrique, mais une simple inspection visuelle périodique. Une métrologie différenciée fait

partie des évolutions recherchées actuellement, avec à un premier niveau une méthodologie bon marché consacrée à détecter d'éventuelles anomalies sans les mesurer en détail. A un second niveau, beaucoup plus coûteux, une métrologie complète « normale » de l'ouvrage, mais avec une certitude élevée de l'effectuer à bon escient. Les besoins vont aussi dans le domaine de la rétro-ingénierie et du « tel-que-construit », domaine classique mais remis au cœur de l'actualité avec la popularisation récente de la notion de BIM dans le domaine du bâtiment. L'enjeu est de disposer d'une description géométrique détaillée et

aussi exacte que possible d'un ensemble complexe, en vue d'interventions ultérieures. Ces interventions peuvent être des inspections ou des remplacements de pièces, et il est alors nécessaire de savoir si tel ou tel équipement pourra manœuvrer dans l'espace existant, et si une nouvelle pièce aura les dimensions voulues pour s'adapter sans problèmes sur les pièces restantes. En particulier, ces aspects deviennent critiques si on doit faire intervenir un robot, par exemple pour des zones qui deviendront plus tard dangereuses, irradiées ou en environnement chimique ou bactériologique à risque élevé. ■

Parmi les chantiers de métrologie industrielle figure la mesure des voilures d'avions lors de tests de fatigue et de déformations sous contraintes.

Page de gauche : pont roulant de quinze tonnes dans la nef chaudronnerie, ateliers des Capucins à Brest.



# Les méthodes de mesure

Pour traiter des chantiers de métrologie dimensionnelle, il y a deux grands types de problèmes techniques à résoudre : ceux liés aux matériels et ceux liés au savoir-faire. Les deux sont aussi essentiels l'un que l'autre.

Une des bases de l'outillage du géomètre en ce domaine, est le tachéomètre. On peut en effet oublier les GNSS dans la plupart des cas, car, sur des distances de l'ordre de la centaine de mètres, les précisions obtenues sont bien moins intéressantes. Tout au plus pourra-t-on y avoir recours pour des mesures à caractère cinématique, par exemple pour suivre des oscillations d'un tablier de pont échantillonnées à 10 ou 20 Hz, car, malgré le manque de précision (difficile d'obtenir mieux que 5 mm à cette cadence), il n'y a guère d'autre possibilité. Mais dans les autres cas, le tachéomètre est très performant et permet beaucoup de choses. Parmi les matériels actuellement sur le marché, c'est surtout la fonction mesure

d'angles qui fait la différence, les appareils précis à 1 mgon sont les plus courants et bien moins onéreux que ceux dont la précision instrumentale se rapproche de 0,1 mgon. Mais, dans bien des cabinets de géomètre, « pour le cas où », on a un appareil haut de gamme, essentiellement parce qu'il permet aussi et sans aucun problème d'effectuer des mesures courantes. Il peut donc trouver son plein emploi, même si sa précision ultime n'est pas souvent sollicitée.

Pour ce qui est de la fonction de mesure de distances, la quasi-totalité des tachéomètres du marché affichent une précision de 1 mm, et les plus précis vont jusqu'à 0,3 mm. D'autres matériels bien plus spécialisés et coûteux existent (les trackers), mais ce ne sont pas des matériels destinés aux géomètres (lire plus loin). Que faut-il retenir du modèle d'erreurs accessible ? Tout d'abord la forte dissymétrie engendrée par la mesure de distances. Le long de la visée, on a une précision de l'ordre du millimètre. Transversalement, avec une précision de 0,2 mgon, l'erreur instrumentale est de l'ordre de 0,15 mm

50 m, sept fois plus faible. Ceci conduit à privilégier la mesure d'angles comme ossature de la métrologie recherchée, et à accepter que la figure puisse avoir une précision de l'ordre de 0,2 ou 0,3 mm sur les points déterminés, mais ceci modulo un facteur d'échelle général assez mal mesuré. Cette hétérogénéité devrait logiquement conduire à d'autres types d'exploitation des résultats, par exemple en utilisant des tenseurs de déformation ; mais ce n'est pas souvent le cas. Le matériel de nivellement direct est l'autre outillage de base. Les matériels ont évolué, les niveaux ont intégré depuis près de vingt-cinq ans la lecture automatique à codes-barres. L'horizontalisation automatique des meilleurs niveaux a permis d'atteindre la précision des niveaux à bulle de première classe. On peut donc mesurer avec une précision purement instrumentale de l'ordre de 0,01 mm, ce qui reste la meilleure précision que le géomètre peut obtenir en opération de routine. De ce fait, tant que c'est la composante verticale qui est analysée, l'outillage est tout

trouvé, avec les limitations bien connues : points visés à la même hauteur que le niveau, besoin d'un éclairage des mires, etc. Mais le niveau numérique considéré comme un simple capteur parmi d'autres peut être assez facilement modifié, par exemple avec une motorisation lui permettant de viser séquentiellement toute une série de points, matérialisés par des tronçons de mires (qui peuvent être découpés dans une mire pliante, le point de fixation étant proche de l'axe de visée afin d'éviter les effets de dilatation thermique) fixés sur différents points. C'est une solution moins complète certes, mais aussi bien moins onéreuse et nettement plus précise qu'un tachéomètre motorisé visant une série de prismes pour détecter des subsidences.

## Tromper le système de lecture

On peut aussi « tromper » le système de lecture, qui n'accepte que la mire code-barres spécifique orientée verticalement et qui exige que le boîtier soit correctement bullé, avec divers dispositifs optiques simples. Par exemple, avec un pentaprisme classique (équerre optique), la visée peut ainsi partir verticalement, pour suivre le mouvement horizontal d'un tronçon de mire fixé à la verticale au-dessus de l'appareil. Ou encore, avec un prisme de Dove orienté à 45°, l'appareil voit verticale une mire horizontale et on peut suivre ainsi un déplacement horizontal, toujours avec cette résolution de l'ordre de 0,01 mm. Au-delà du niveau lui-même, les mires interviennent elles-aussi directement dans la précision des résultats ; une

Ci-dessous, utilisation d'un interféromètre laser pour étalonner une mire de nivellement. Le prisme de Dove, posé devant le niveau, lui fait voir verticale la mire horizontale, ce qui permet ce type de mesure d'un déplacement horizontal.



## L'utilisation des tachéomètres en métrologie

Les aspects intéressants des tachéomètres employés pour la métrologie reposent sur les évolutions de leurs fonctions de base.

Tout d'abord leur motorisation, puis leur pointé automatique (ATR), et l'ajout d'un système imageur. A noter aussi que la fonction mesure de distances, permettant bien souvent de mesurer aussi sans prisme, s'est enrichie d'une variante de mesure très rapide qui s'apparente à celle d'un scanner laser. C'est ainsi qu'on peut demander à un tachéomètre de mesurer séquentiellement toute une série de réflecteurs afin de suivre leurs positions dans le temps, la seule contrainte étant que ces points soient visibles depuis l'appareil. La précision atteignable est certes hétérogène entre les composantes longitudinale et transversale, mais en mesure de mouvements verticaux, elle est surtout limitée par la précision angulaire et par les performances de l'ATR, ce qui donne accès à quelques dixièmes de millimètre dans les quelques décimètres aux environs de l'appareil. Les mesures sans réflecteur donnent accès à d'autres types de mesures si le millimètre est suffisant, par exemple la mesure de la

flexion d'une grande pièce sous contraintes (aile d'avion, pont roulant, etc.) si l'on peut installer l'appareil de manière à ce que la direction de la visée soit proche de celle du mouvement à mesurer.

Enfin, l'utilisation de l'image intégrée au tachéomètre n'en est qu'à ses balbutiements dans son emploi métrologique ; il est en effet possible de compléter les mesures angulaires par des mesures extrêmement précises, de type photogrammétriques ou encore liées à des algorithmes de vision par ordinateur, au sein même des images acquises. C'est l'exemple du pointé automatique sur une cible non réfléchissante de forme connue, des déformations en cisaillement par corrélation diachronique (lire page 43), de la modélisation 3D répétitive automatisée à partir d'images acquises continuellement par deux tachéomètres avec acquisition d'images, etc.



La station totale Trimble S8 (ci-contre) et la multistation MS50 de Leica Geosystems (ci-dessus).

►► mire à ruban invar est nécessaire pour éviter la plus grosse partie des effets de dilatation thermique. L'ordre de grandeur à garder à l'esprit est que la plupart des matériaux courants ont un coefficient de dilatation linéaire de l'ordre de 0,01 mm par degré et par mètre; c'est en particulier le cas pour un tronçon de mire en fibre de verre ou en métal courant. Pour l'invar, l'effet est dix fois moindre et peut ainsi être souvent négligé. En évoquant ce phénomène, il faut aussi rappeler qu'un écart de température de 10° avec la

d'observation du chantier s'étale sur plusieurs heures. L'objet mesuré a en effet toutes les chances d'avoir changé de dimensions en cours de route: pour un tablier de pont, cela peut être contrôlé par les mouvements sur les joints de dilatation, mais pour d'autres objets, il peut n'y avoir aucune indication aussi simple qui soit disponible. En complément de ces outils de base, il y a tout le reste du matériel nécessaire à une métriologie de haute précision. En particulier tout ce qui

l'embase et l'axe optique, le socle du tachéomètre est conçu avec une certaine tolérance qui porte sur l'écart entre le pied de l'axe principal et le dispositif de centrage. Lorsque cette tolérance est inconnue, on peut quand même travailler, mais il faut: – opérer avec une position fixe du socle de l'appareil lors de mises en station successives (repérage de la position d'une des vis calantes par exemple); – ajouter une inconnue lors du calcul de compensation. Certains centrages forcés permettent néanmoins d'éliminer entièrement ces erreurs instrumentales pour des instruments très particuliers, comme les lunettes nadiro-zénithales qui permettent de remonter un point matérialisé au sol sur de grandes hauteurs, la lunette pouvant tourner dans son socle. Certains tachéomètres disposent d'un plomb optique qui est directement dans la partie qui tourne autour de l'axe principal, ce qui permet d'éviter l'effet lié au décentrement du socle, évoqué précédemment.

### Des accessoires de visées avec spécifications

Parmi les difficultés liées aux centrages, il faut aussi considérer les spécifications des accessoires de visées, comme les prismes et les cibles. Ceux-ci sont commercialisés avec certaines tolérances et, lorsque ces tolérances sont très petites, les prix montent en flèche. Par exemple, certains réflecteurs de haute précision pour trackers sont creux (trois miroirs plans orthogonaux) montés dans des sphères métalliques, le centre du coin de cube étant au centre de la sphère à quelques microns près. Un tel réflecteur coûte

vingt fois plus qu'un réflecteur courant avec une monture en plastique moulé, dont la tolérance sera garantie à 2 mm près. Ceci n'interdit pas définitivement d'exploiter des réflecteurs bon marché, mais il faudra avoir conscience de la présence de ce type d'excentrement et penser à les introduire comme inconnues supplémentaires dans les calculs. Et, pour les prismes classiques, une autre série de difficultés est liée aux variations du centrage apparent lorsque la visée est inclinée par rapport à l'axe du prisme. Pour un prisme courant de 4 cm de diamètre d'entrée, une visée inclinée de 30° crée une erreur de mesure de distance de l'ordre de 0,1 mm et une erreur de visée angulaire qui correspond à un décalage latéral apparent de 1 mm. Clairement, les assemblages de prismes (dits omnidirectionnels) sont à proscrire puisque, en permanence, plusieurs coins-de-cubes sont actifs pour une direction donnée, ce qui conduit à des imprécisions de mesures pouvant dépasser le millimètre. Ces éléments sont d'ailleurs clairement mentionnés dans les spécifications de ces matériels, qui sont parfaitement adaptés aux travaux courants, mais pas aux travaux de haute précision. Parmi les matériels annexes spécifiquement adaptés à des chantiers de métriologie, on dispose depuis les travaux pionniers du Cern (Organisation européenne pour la recherche nucléaire) de toute une gamme de potences, de trépieds et de centrages basés sur le contact entre une partie fixe cylindrique ou conique et des accessoires sphériques garantissant une remise en position à l'identique de tous les accessoires sur une station donnée, avec une précision

allant de 0,1 mm à 0,01 mm selon les fournisseurs. Mais ils représentent un investissement important. Parmi les matériels annexes, il existe diverses solutions pour mesurer des distances avec une très grande précision pour une mise à l'échelle de petits réseaux triangulés, pour lesquels les mesures de distances des tachéomètres sont insuffisantes. Dans ce domaine, il faut citer les barres de parallaxe ou stadia, avec deux cibles portées par une barre en invar, séparées par une distance bien connue. La mesure au tachéomètre de l'angle horizontal sous lequel est vue cette paire de cibles permet une mise à l'échelle nettement meilleure que celle donnée par la mesure de distances du tachéomètre sur des réseaux pluri-décimétriques. Dans certains cas, on a encore recours, malgré l'ergonomie particulièrement médiocre de cette méthodologie, à une mesure de longueur avec un fil invar, car cette méthode donne une grande fiabilité et une excellente précision (1 ppm). Divers matériels ont été imaginés pour rendre ces mesures moins contraignantes, mais elles restent une solution de dernier recours compte tenu de leur difficulté de mise en œuvre. La résolution quasi-complète du problème des distances sur de tels chantiers a été apportée par l'emploi de « trackers ». Ces appareils combinent des mesures d'angles de la meilleure précision possible, celle des tachéomètres haut de gamme, avec un procédé de mesure de distances de

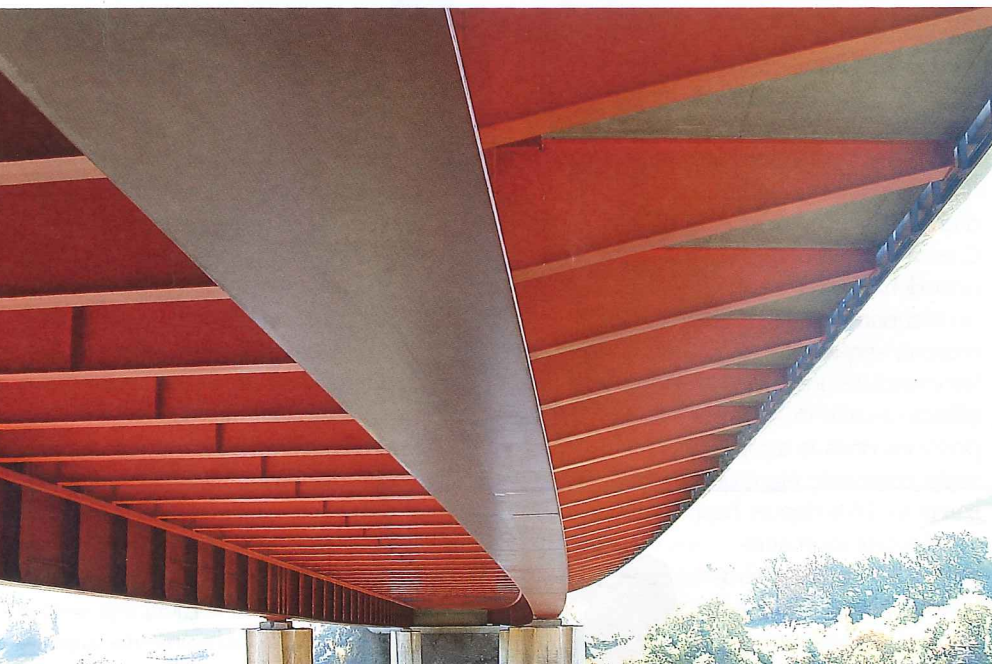
très haute précision, utilisant généralement la technologie du Mekometre inventée par K.D. Froome et R.H. Bradsell dans les années 1960, développée ensuite par Kern puis reprise par Leica. Ce dispositif, très complexe à mettre en œuvre, permet une mesure de distances avec une résolution de l'ordre de quelques microns, sans aucune erreur instrumentale mesurable. Il en résulte que, sur les distances évoquées dans ce dossier, la mesure de distance est limitée au niveau de 1 ppm seulement par la connaissance de la température de l'atmosphère, la mesure d'angles est légèrement moins précise (2 à 5 microradians). Ainsi, sur des distances allant jusqu'à une centaine de mètres, on peut rester autour d'une précision de l'ordre de 2 ppm, soit quelques centièmes de millimètre à 10 m, et quelques dixièmes de millimètre à 100 m. Ce type de matériel ressemble beaucoup à un tachéomètre ultra-précis, mais n'est pas destiné nominale-

ment aux géomètres: ce marché est celui des mécaniciens, avec un prix qui est deux à trois fois celui



Prisme réflecteur monté dans une sphère, précision 0,1 mm.

Ci-dessous, AT 401 de Leica-Hexagon et Laser Tracker de Faro.



Tablier mixte du viaduc de la Planchette (autoroute A75).

température d'étalonnage change environ de 1 mm les dimensions d'une pièce de 10 m. En métriologie dimensionnelle, il faut donc être attentif à l'évolution thermique d'un objet en cours de mesure, par exemple dans une halle non thermostatée ou en plein air. Pour un tablier de pont, l'inertie thermique du béton rend difficile la connaissance de sa vraie température moyenne lorsque la température de l'air change, et ceci complique beaucoup le regroupement de mesures en un tout cohérent si la durée

concerne les centrages, car il est très facile de perdre toute la précision de mesure d'excellents appareils en ne les peaufinant pas. C'est l'exemple du tachéomètre: idéalement, le centrage des cibles, des prismes et de l'axe principal du tachéomètre devrait pouvoir tomber au même endroit lorsqu'on stationne un même point. Pour remonter un point au sol jusqu'à l'embase, une canne de centrage permet de garder 0,01 mm si le repère est suffisamment bien défini, et un plomb optique 0,1 mm s'il est bien réglé. Mais entre



➤ d'un tachéomètre haut de gamme. Auparavant, lorsqu'ils devaient mesurer à quelques microns près des pièces de plusieurs mètres, ils ne pouvaient utiliser que des MMT (machines à mesurer tridimensionnelles), extrêmement lourdes et coûteuses à installer et à opérer, avec une

précision

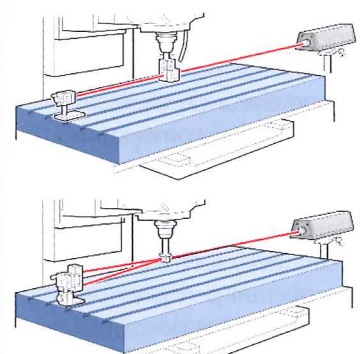
atteignable de l'ordre du micron. Ces MMT restent employées, mais de façon plus rare actuellement, et uniquement pour la très haute précision, compte tenu du coût très élevé déjà de la machine elle-même, et peut-être même surtout des aménagements requis (car la stabilité thermique en est critique) et de son installation. Outre leurs prix considérables, les MMT ont une portée limitée, rarement plus d'un mètre cube, et ne conviennent donc pas aux pièces de grande dimension. Mais entre les MMT et les trackers, il existe divers bras articulés permettant des mesures à quelques centièmes de millimètre dans un rayon allant jusqu'à 3 m. Ici, l'opérateur va venir au contact de l'objet à mesurer, et la mesure s'apparente à une petite polygonale entre le socle de l'appareil et la pointe de

Ci-dessus, machine à mesurer tridimensionnelle (MMT) Hexagon.

En bas, bras articulé FaroArm.

touche, avec des angles mesurés dans chaque rotule et les distances matérialisées par les différentes sections articulées. Enfin, il faut rappeler que l'outil de métrologie le plus précis, mais également parmi les moins souples d'emploi, est l'interféromètre laser, dont les performances n'ont guère varié depuis la mise sur le marché du Hewlett-Packard 5528 dans les années 1970, avec une résolution de 0,01 micron et une portée d'environ 50 m. Les performances réelles sont essentiellement limitées (comme toujours...) par la connaissance de l'indice de réfraction de l'air (de l'ordre de 1 ppm en situations courantes), ce qui rend peu utile la résolution de 0,01 micron (significative sur une distance de seulement 1 cm!) et même celle de 1 micron (significative sur seulement 1 m). Ce type de matériel effectue des mesures incrémentales, et non pas absolues, et donc ne supporte pas une interruption du faisceau en cours de mesure. De ce fait, il est employé avec un dispositif

permettant de faire coulisser le réflecteur matérialisant le point mesuré le long d'un axe, ce qui est un des éléments qui en limite les cas d'emploi. En revanche, on a pu utiliser le principe de cet interféromètre pour mesurer toutes sortes de grandeurs linéaires, toujours sur des distances n'excédant guère quelques mètres, donc pas seulement de simples longueurs : rectitude d'un rail ou d'un guidage, planéité, petits angles, etc. Son emploi reste une norme pour étalonner les mouvements d'une machine-outil ou pour qualifier diverses fabrications mécaniques de très haute précision.



Utilisation de l'interféromètre HP / Agilent 5528A en mesures linéaires, et en mesures de rectitude.



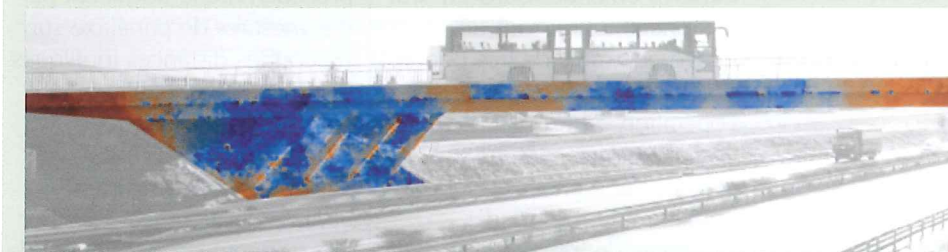
Ce type d'interféromètre a été utilisé intensivement dans certaines métrologies très exigeantes, à l'image de celle développée au Cern pour l'alignement des plus grands accélérateurs de particules jamais construits. Historiquement, les observations topométriques de base y ont été obtenues par triangulation, mises à l'échelle à l'aide de fils invar de longueurs adaptées aux figures élémentaires très répétitives nécessaires pour aligner les différents matériels, et ces fils invar ont été systématiquement mesurés sur un interféromètre laser, garantissant une échelle stable durant les décennies successives de travaux. Plus récemment, l'AT 401 a été très largement utilisé, et toutes ces mesures ont toujours été basées sur des centrages forcés de précision voisine de 0,01 mm.

La gamme d'outillage actuellement disponible en mesures dimensionnelles est donc très large. La mesure au tachéomètre précis y apparaît comme un cinquième niveau, après les MMT, les bras articulés, les interféromètres laser et les trackers, qui sont plus précis mais beaucoup plus onéreux et avec des rayons d'action moindres, voire considérablement moindres.

En ce qui concerne les bras articulés et les trackers laser, les industriels ont réussi à augmenter considérablement leurs domaines d'action en les équipant avec des scanners laser de grande précision et à courte portée (scanners à mesure de parallaxe, précision pouvant atteindre 0,1 mm, voire mieux). Ces scanners peuvent être fixés au bout du bras de mesure d'un bras articulé, permettant de lier avec précision le référentiel de mesure du scanner avec celui du socle du bras articulé.

Ainsi, il devient possible ➤

## La photogrammétrie



Essais sur un pont d'autoroute à Grandson, janvier 2015. 1 pixel = 1 cm. Les couleurs superposées à l'image montrent les déformations verticales entre une image obtenue peu avant, sans aucun véhicule, et celle-ci.

Parmi les outils de métrologie dimensionnelle, il faut évoquer la place très particulière de la photogrammétrie, dont on évoque régulièrement l'évolution actuelle, très rapide, des domaines d'action. Elle apporte des solutions intéressantes dans deux domaines distincts : les MNS (modèles numériques de surface), concrétisés par des nuages de points, et les mesures de déformations surfaciques fournies par la corrélation diachronique d'images.

En fourniture de MNS pour définir une surface éventuellement très complexe, la photogrammétrie est bien identifiée depuis fort longtemps. Récemment, la totalité du processus de traitement est devenue automatisable, ce qui a beaucoup contribué à de nombreuses nouvelles applications, soutenues par une acquisition faite avec des appareils très bon marché, des logiciels peu onéreux voire en open-source, et des temps de calcul encore longs mais sans impact sur les coûts. Donc une toute nouvelle équation économique.

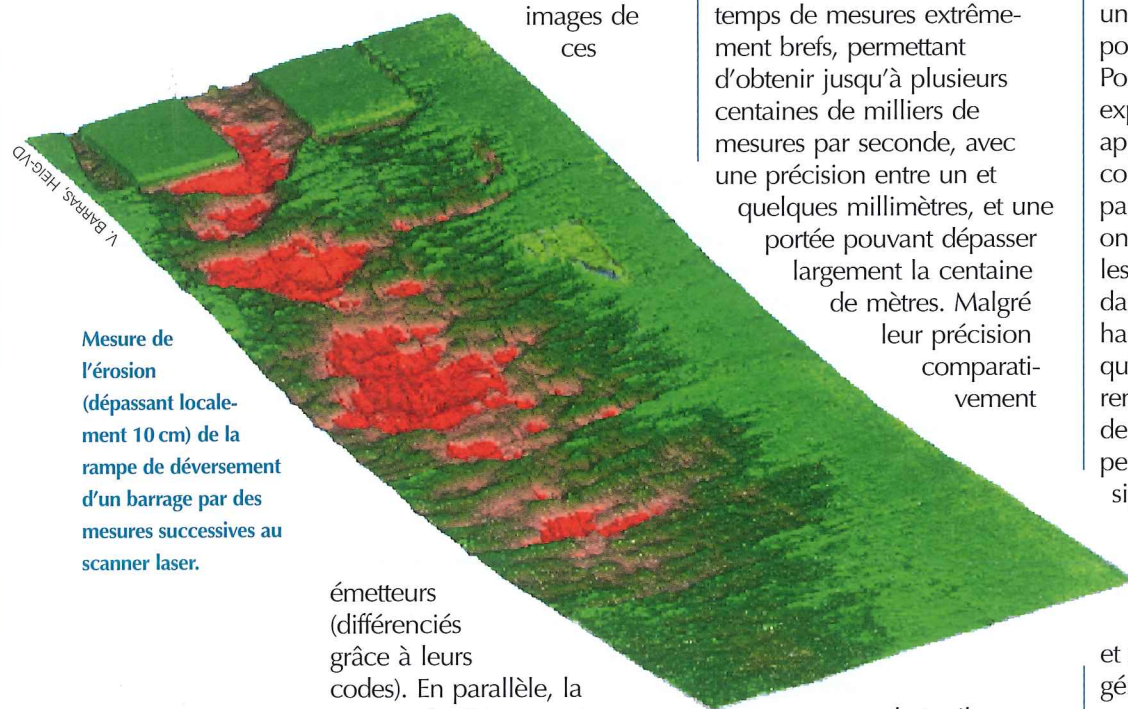
Il n'y a pas de réelle limitation en précision, sauf à dire qu'on obtient en routine une précision de détermination de l'ordre de 0,1 pixel, sachant que le pixel peut avoir sensiblement la dimension que l'on veut obtenir, compte-tenu des choix existants en matière d'optiques, et de la possibilité de régler la distance à l'objet mesuré dans une très grande gamme. Ainsi, des images sous microscope peuvent donner un modèle 3D avec des précisions de l'ordre de 0,1 micron si besoin est... Autre aspect important : l'acquisition des images est sensiblement instantanée, ce qui rend possible la métrologie d'un objet qui se déplace, ou qui se déforme. Si la déformation est rapide, le temps effectif d'acquisition peut être aussi

court que 0,1 ms, soit la durée de l'éclair d'un flash si l'on peut se retrouver dans un environnement peu éclairé. En revanche, le procédé ne peut être employé sur des surfaces non diffusantes, ce qui peut être une limite forte dans certains cas. Sur une surface en métal poli par exemple, il y a toujours la possibilité de saupoudrer du talc, ou une poudre quelconque acceptable par le donneur d'ordre. Ce qui peut représenter une complication.

En corrélation diachronique, les traitements photogrammétriques permettent de détecter sur des mouvements surfaciques perpendiculaires à l'axe de visée, avec des précisions qui atteignent 0,01 pixel; là encore, avec la possibilité d'atteindre à peu près n'importe quelle précision par le jeu des optiques et de la distance à laquelle on s'installe par rapport à l'objet. L'exemple du petit pont autoroutier de Grandson (illustration ci-dessus) pour lequel l'effet d'un autobus d'environ 10 tonnes donne une flexion instantanée atteignant 2,5 mm, avec une précision de l'ordre de 0,1 mm. Ce type de métrologie conduit à des coûts extrêmement réduits, de moins de deux heures d'ingénieur au total (acquisition, traitement et mise en forme des résultats), avec un investissement en matériels et logiciels très faible. Il doit même pouvoir être encore diminué en cas de mesures enchaînées sur toute une série de ponts.

Ces mesures ont un caractère instantané; il est possible de suivre une déformation relativement rapide en exploitant soit des images en rafale (jusqu'à dix images par seconde actuellement), soit des images vidéo (mais alors la taille de pixel augmente, et la précision baisse d'autant).

de mesurer une surface gauche en déplaçant le scanner dans toutes sortes de positions, et en combinant les mesures obtenues dans un seul référentiel, fournissant un nuage de points de très bonne précision. Avec les trackers, l'opération est un peu plus complexe mais tout aussi efficace : le scanner est tenu à la main, il comporte des émetteurs de lumière codée, et une caméra du tracker analyse continuellement les positions relatives des images de ces



Mesure de l'érosion (dépassant localement 10 cm) de la rampe de déversement d'un barrage par des mesures successives au scanner laser.

émetteurs (différenciés grâce à leurs codes). En parallèle, la mesure de distance est effectuée sur un réflecteur et, connaissant les positions relatives des émetteurs et du réflecteur, on en déduit la position et l'orientation du scanner dans le référentiel du tracker, en conservant pratiquement la précision nominale du tracker. Ainsi, en temps réel, on peut là encore stocker dans un même système de référence les millions de points acquis par le scanner et obtenir un nuage de points très dense sur n'importe quelle surface gauche, même très complexe. Les scanners laser apportent un service original dans bien

des domaines de la topométrie, et ils peuvent aussi être employés en métrologie. Certains d'entre eux, évoqués précédemment, travaillent par des mesures de parallaxe sur de courtes distances (quelques décimètres) où ils offrent une précision pouvant être meilleure que 0,1 mm. Les autres scanners, bien connus des géomètres, fonctionnent sur le principe de mesures électroniques des distances, comme sur les tachéomètres, mais avec des temps de mesures extrêmement brefs, permettant d'obtenir jusqu'à plusieurs centaines de milliers de mesures par seconde, avec une précision entre un et quelques millimètres, et une portée pouvant dépasser largement la centaine de mètres. Malgré leur précision comparativement

modeste, ils peuvent être utilisés dans certaines situations, par exemple pour suivre des mouvements d'une surface diffusante (pas de métal poli !) lors d'un cycle de déformations, à l'image d'une aile d'avion ou d'un tablier de pont sous l'effet d'une charge test, d'un barrage lors d'un cycle de remplissage, etc. Toutes sortes de situations dans lesquelles des mesures ponctuelles, obtenues par des méthodes topométriques classiques, seront sans doute plus précises mais vont créer un échantillonnage insuffisamment représentatif de

l'ouvrage. La valeur statistique de quelques centaines de millions de points répartis sur tout l'ouvrage sera en effet très élevée, et ne pourra pas laisser dans l'ombre une section de béton en train de se détériorer parce que les ferrillages rouillent à l'intérieur, et, de ce fait, occupent une position critique sur l'échelle des risques induits. Le scanner pourra aussi apporter des réponses très intéressantes pour le suivi de l'érosion de surfaces très exposées, comme une rampe de déversement pour un barrage. Pour l'ensemble des méthodes exposées, les limitations apportées par les effets des conditions naturelles, et en particulier de l'atmosphère, ont déjà été évoquées. Il faut les avoir présentes à l'esprit dans tout chantier de très haute précision, d'autant qu'elles ne sont pas nécessairement très intuitives. Les effets de la réfraction en particulier peuvent poser des difficultés significatives. Lorsqu'on est proche du sol, et même à l'intérieur d'un bâtiment, il faut s'intéresser aux gradients thermiques et se rappeler qu'ils sont généralement perpendiculaires aux parois et pas spécialement verticaux, ce qui peut se traduire par des déviations horizontales des rayons lumineux (réfraction « latérale »). Certaines ambiances industrielles présentent en outre des anomalies thermiques importantes, que ce soit près d'une machine, ou à cause de flux d'air liés à une ventilation forcée ; dans ces conditions, il peut s'avérer difficile d'en éviter les effets. Le chantier devra être alors organisé pour se donner les moyens de détecter ces situations, en exploitant une redondance renforcée dans la géométrie de mesure.

Enfin, il faut encourager les géomètres à se lancer dans des marchés de métrologie dimensionnelle, car ils ont souvent les capacités pour le faire. S'il ne faut certainement pas sous-estimer les difficultés d'analyse des besoins réels du donneur d'ordre avant le chantier, en revanche ce domaine est généralement très intéressant, car il conduit à traiter des situations à chaque fois différentes pour lesquelles la routine est rarement de mise. Avec la possibilité de valoriser une formation et une profession qui sont, bien plus qu'ailleurs, liées à l'inventivité et à l'expertise capitalisée. C'est une branche d'activité qui mérite d'être entretenue. Mais il s'agit bien souvent de secteurs où les demandeurs connaissent peu les géomètres, et ils sont souvent prêts à réinventer de manière « sous-optimale » leur métier : il faut donc s'y faire connaître.

### Contrats longue durée

Il est bien difficile de savoir à l'avance quel est le problème que peut se poser à un moment donné un industriel dans le domaine de la mesure dimensionnelle, problème que le géomètre pourrait l'aider à résoudre de façon économique. Ce n'est en effet jamais sur ses difficultés qu'une entreprise communique, et en outre ses équipes techniques ont, même en interne, des hésitations, voire des pudeurs, à souhaïter le recours à un expert externe, car c'est ressenti comme un aveu de faiblesse et non comme une démarche rationnelle. Pour accéder à ces marchés, les phases de renseignements sont essentielles. Mais, une fois que le périmètre d'action est identifié, il peut s'agir de contrats de longue durée et donc économiquement très intéressants. ■

## Le savoir-faire

Au-delà des matériels nécessaires pour la mise en œuvre d'une métrologie optimisée, il faut être bien conscient du savoir-faire nécessaire. Les compétences de l'équipe technique portent sur quelques grands aspects.

### L'ingénierie de conception globale

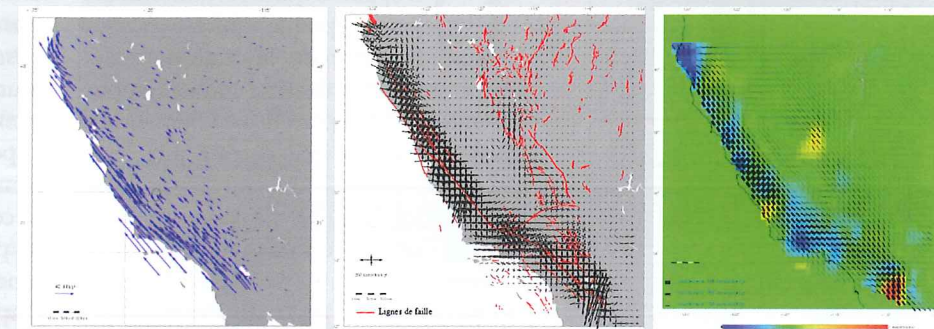
Un point évident mais qui requiert une vue d'ensemble à jour sur l'éventail des solutions possibles compte tenu des matériels disponibles à un moment donné. C'est là que se joue l'essentiel de la compétitivité économique et cette étape peut être grandement confortée par des simulations numériques préalables qui, dans certaines circonstances, sont même requises par le donneur d'ordre lors de la réponse à l'appel d'offres. Il reste contraignant de maintenir ses connaissances à jour dans ce registre compte-tenu de la rapidité de certaines évolutions technologiques, soit que des solutions nouvelles apparaissent, soit que des outils particulièrement adaptés disparaissent du marché (rentabilité insuffisante d'un marché de niche, ou défaillance d'une entreprise occupant une position singulière sur le marché).

### Le niveau d'expertise de l'équipe technique

Sa capacité notamment à maîtriser les centrages de haute précision, les procédures qui pèsent directement sur la qualité des mesures, les contrôles intermédiaires qui permettent de valider une série de mesures sur le terrain, et la capacité de concilier en temps réel les exigences techniques du chantier et les imprévus externes lors des mesures.

### Les solutions de calcul adoptées

Les calculs topométriques sont souvent menés en 2D, en séparant altimétrie et planimétrie, ce qui est franchement sous-optimal dans la plupart des chantiers de métrologie. Quelques outils 3D ont néanmoins été développés et sont disponibles, comme Géolab, Comet (ESGT), Trinet (Suisse), etc., avec des diffusions très variables. Au sein de ces outils, on peut accéder à toute une batterie de tests statistiques, utilisables également lors d'une phase de simulations, préparatoire au chantier, et qui permet de donner un haut niveau de garantie au client. Mais, dans ce registre, il reste encore pas mal de développements possibles, en particulier pour les mesures de déformations, pour lesquelles la représentation sous forme de tenseurs est susceptible de faciliter beaucoup l'interprétation, en évitant par exemple le problème des choix arbitraires de points ou de directions fixes.



Utilisation des tenseurs de déformations pour interpréter des mouvements de déformations, ici d'origine tectonique sur la bordure ouest des Etats-Unis. (1) Champ de vecteurs fournis par les stations GNSS, (2) représentation sous forme de tenseurs régulièrement répartis, (3) décomposition des tenseurs selon deux thèmes : compression-dilatation (couleur de fond) et cisaillement maximum (traits donnant son orientation, et son intensité selon l'épaisseur du trait). Les tenseurs permettent une interprétation très complète de la grande richesse des mesures brutes.