

Mesures au laser tracker appliquées aux centrales hydroélectriques : évaluation des avantages et partage de techniques

Jean-François Normand, ingénieur, firma Voith Hydro Inc.
Dany Lessard, ingénieur, firma Hydro Expertise

Initialement publié et présenté pour CMSC

Résumé

Ce document aborde la question générale de l'utilisation des lasers de poursuite dans la construction et l'assemblage de centrales hydroélectriques sur site. Il présente les avantages, ainsi que parfois les limites de l'utilisation du laser tracker. Il apporte aussi des détails sur des applications hydroélectriques dans lesquelles le laser tracker peut être utilisé. Des exemples sont donnés, tirés de plusieurs projets pour lesquels Voith Hydro était impliquée dans la construction de nouvelles turbines et générateurs, ainsi que d'un projet de remplacement de roue de turbine et d'usinage des pièces encastrées de turbine. L'approche utilisée pour ces projets consista à acheter et à garder sur site un laser tracker pour toute la durée du projet, afin qu'il puisse être utilisé à tout moment, suivant le besoin. Les avantages ont été établis en comparant les mesures au laser tracker aux méthodes conventionnelles alternatives, tant au niveau du retour sur investissement, que du gain de temps et de la qualité des données et informations obtenues avec le système.

Cette étude communique aussi quelques techniques et méthodes utilisées sur site pour s'assurer de la précision des mesures. Dans certains cas, il fut nécessaire de démontrer sur site la précision de mesures de grandes dimensions et des tests simples ont été effectués à cet effet. L'utilisation du niveau intégré, dont la précision spécifiée est de 2 secondes d'arc, fut également intéressante. Pour certaines applications, nous avons besoin d'une précision de niveau inférieure à 2 secondes d'arc. Or, nous avons pu démontrer sur site que la précision de l'inclinomètre était inférieure à 2 s, donc parfaitement adaptée à notre utilisation. De nombreux exemples d'utilisation d'un laser tracker sont présentés, comme le levage d'une pièce imposante (un capot de turbine) avec une grue : un laser tracker suit le composant durant le levage et permet de contourner d'une autre pièce (un arbre) avec un dégagement minimal. La méthode utilisée est discutée dans ce document. Certaines des mesures ne sont pas prises avec le laser tracker, mais, pour un grand nombre d'entre elles, le laser tracker demeure l'outil idéal. Le retour sur investissement et les avantages d'ensemble pour un projet sont importants tant pour le client que pour l'entrepreneur.

Contexte de la présentation

Voith Hydro est un équipementier qui cherche constamment à se perfectionner et à améliorer la fiabilité de ses produits. Depuis 3 ans, Voith Hydro Canada et Hydro Expertise ont collaboré très étroitement avec les spécialistes de FARO pour développer des procédés et des systèmes de validation afin d'étendre l'utilisation des lasers de poursuite à l'installation de turbines et de générateurs de grande taille. Le développement de ces applications présente une part de risque qu'il convient de gérer en vérifiant strictement les résultats et la précision obtenue pour chaque étape du projet. Ce document présente certains points clés de cette aventure.

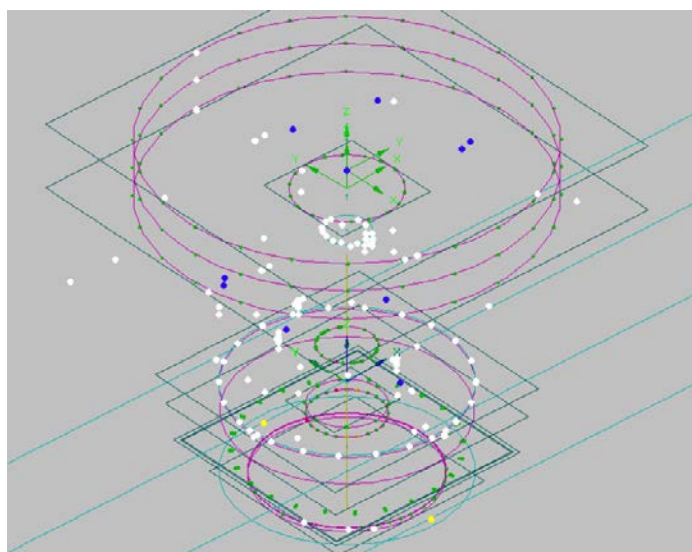
Description de l'instrument laser tracker



Le laser tracker de FARO est un appareil portable de haute précision pour la mesure de coordonnées tridimensionnelles (3D). En combinant un système laser de mesure de distance, deux encodeurs angulaires rotatifs, une station météorologique totalement intégrée et un système de mesure de distance absolue (TruADM), le système mesure la position d'un rétro réflecteur monté sur sphère (SMR) en temps réel jusqu'à 80 mètres, avec une précision de 0,015 mm à 2 m. Le TruADM permet aussi au faisceau laser d'être recapturé dans l'air, sans avoir à revenir vers la tête de mesure. L'appareil se calibre lui-même avec une commande automatique d'auto-compensation pour assurer rapidement une précision élevée. Le laser tracker est capable de mesurer des pièces et des machines pour une vaste gamme d'applications industrielles.

Applications du laser tracker dans les centrales hydroélectriques

L'utilisation des lasers de poursuites dans l'industrie hydroélectrique s'étend du support technique à l'installation et la rénovation de générateurs à turbine, en passant par les vérifications finales de l'usinage et le support méticuleux de l'AQ. Le contexte particulier des mesures dans les centrales hydroélectrique demande de l'attention et de la prudence, une haute précision étant nécessaire. Les opérateurs peuvent être confrontés à des vibrations dues aux machines en fonctionnement dans les usines existantes, à des environnements poussiéreux, à une utilisation prolongée des systèmes de coordonnées et à d'évaluation, à des machines de larges dimensions, ainsi qu'à la présence d'autres ouvriers sur le site. Les exemples suivants illustrent certaines applications du laser tracker dans l'industrie hydroélectrique.



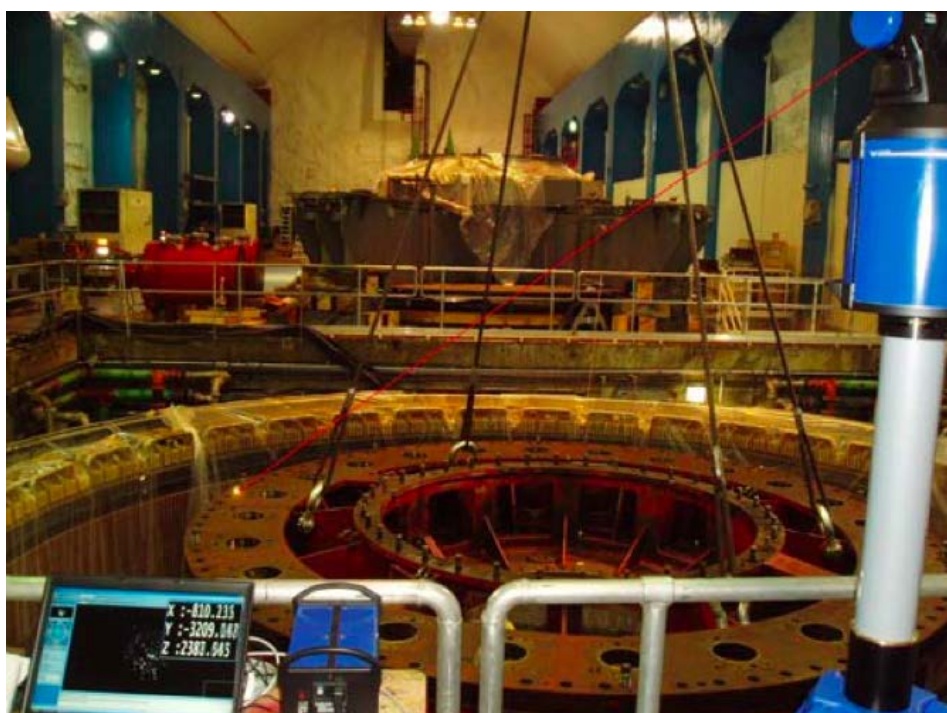
VÉRIFICATION DE L'ALIGNEMENT DU STATOR, DU BLOC DE POUSSÉE, DE L'ANNEAU INFÉRIEUR, DU CAPOT ET DE L'AVANT-DISTRIBUTEUR.

Lors de la dépose d'un générateur hydroélectrique à turbine, il est pratique de mesurer la position des éléments fixes et rotatifs afin de connaître les corrections devant être effectuées avant et durant le réassemblage. Dans la figure ci-dessus, les mesures prises sur une unité verticale sont représentées par des formes géométriques simples. Les trois cercles supérieurs représentent le stator mesuré à trois hauteurs, le plus petit cercle à la même hauteur représente le bloc de poussée qui supportait le rotor. Les mesures descendent jusqu'au fond de l'unité, avec les valeurs du capot, de l'avant-distributeur et des anneaux inférieurs. Les données pour toutes ces mesures sont rassemblées dans un seul fichier, sous forme de coordonnées de type « x, y, z », exprimées dans le même système de coordonnées. L'existence d'un seul fichier facilite l'analyse de certaines caractéristiques, comme la circularité des composants, leur centrage, leur planéité et l'inclinaison des plans.



INSTALLATION ET VÉRIFICATION DE PIÈCES ENCASTRÉES

Le laser tracker apporte des avantages conséquents pour la construction d'un nouveau générateur hydroélectrique. Servant à s'assurer que les pièces encastrées s'intégreront bien dans les autres composants installés comme les conduites forcées, cônes d'aspirateur et tuyaux, le laser tracker est utilisé pour l'assemblage, le positionnement et la mise à niveau de toutes les pièces encastrées (cône, blindage, avant-distributeur, bêche spirale, semelle de servomoteur), ainsi que pour centrer parfaitement l'unité et la positionner par rapport aux conduites forcées. Il permet aussi d'indiquer la découpe des pièces à évider, de vérifier le niveau, la circularité des assemblages et les marquages.



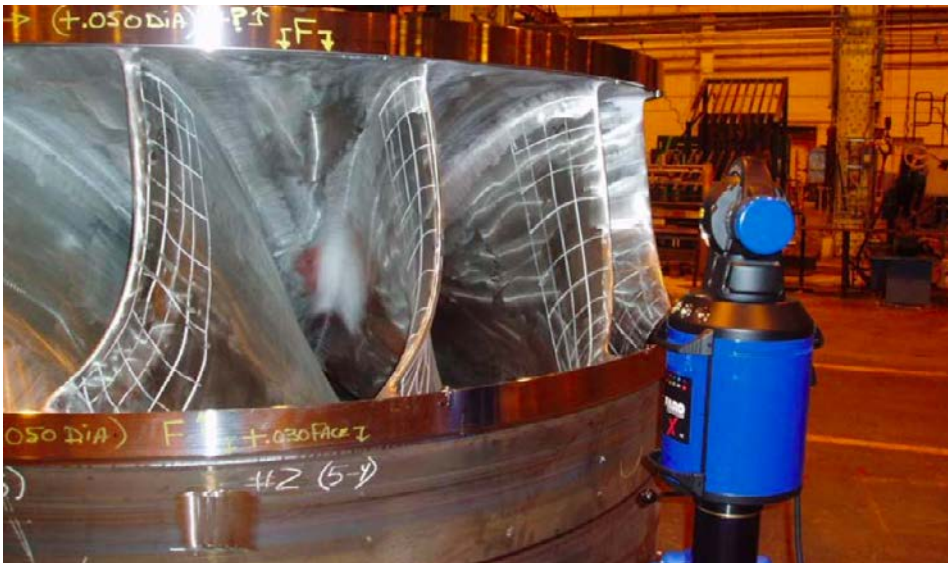
SUIVI DE LA POSITION D'UN COMPOSANT

Sur la figure ci-dessus, le capot de la turbine est en cours de levage et en train d'être enlevé de l'unité. Le laser tracker a servi à suivre la position du capot durant le levage. L'écart entre le diamètre interne du capot et de la bride d'accouplement de la turbine n'était que de 1,5 mm. Juste avant de s'engager dans la partie étroite, le levage a été arrêté et les mesures de deux rétroreflecteurs montés sur sphère (SMR) préalablement installés sur le capot ont permis de réajuster la position du capot. Ce dernier a ainsi pu être levé en toute sûreté sans toucher l'arbre. Une partie des travaux de préparation de cette opération a consisté à mesurer au préalable la position de l'arbre et à installer de deux paires de SMR sur le capot, les SMR de chaque paire étant montés sur des côtés opposés et à égale distance du centre du composant. Trois points de mesure sur le capot étaient au moins nécessaires pour suivre la variation de son inclinaison durant le levage. Après cela, un ou deux points de suivi uniquement permettaient de suivre la position. Deux points sont nécessaires lorsque qu'il existe un risque de rotation du composant.

INSTALLATIONS DE BARRES DE CALAGE ET D'EMPILEMENT STATOR

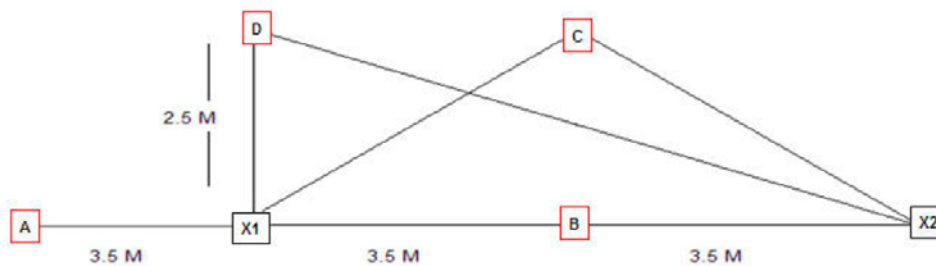


MESURE DE LA ROUE DE TURBINE DURANT ET APRÈS L'USINAGE :



Lorsqu'il s'agit de valider des valeurs d'ingénierie sur une roue, que ce soit pour de simples dimensions ou pour des profils complexes, le laser tracker est souvent utile. Il permet de mesurer avant et après l'usinage pour valider les dimensions, mais aussi pour obtenir l'approbation du département qualité. Les pièces peuvent être mesurées sur site pour assurer que les dimensions sont toujours exactes après le transport. Le laser tracker peut aussi être utilisé à des fins de rétro-ingénierie, pour mesurer une roue existante. Le laser tracker rend possible de mesurer des pièces complexes avec précision.

TESTS SUR SITE POUR LES GRANDES DISTANCES



	Résultats : Mesures X1 à X2 (mm)	Écart par rapport à la moyenne (mm)
Emplacement A	7175.010	0.009
Emplacement B	7175.015	0.014
Emplacement C	7174.986	-0.014
Emplacement D	7174.992	-0.009
Moyenne	7175.001	

Un cas requerrait de valider la mesure d'une grande dimension, d'environ 7 mètres, puisqu'elle ne coïncidait pas avec les résultats obtenus avec un micromètre. Une installation a été mise en place pour mesurer une distance de 7 mètres depuis différentes positions du laser, puis les résultats ont été comparés. Sachant que le laser tracker utilise différentes méthodes pour mesurer la distance lorsqu'il est aligné avec les deux points (système ADM) et quand il observe les points depuis le côté (ADM et mesure des encodeurs angulaires), obtenir des résultats pratiquement identiques depuis toutes positions du laser tracker, comme indiqué dans le tableau ci-dessus, a permis de rassurer l'opérateur et le client concernant la validité des mesures. La précision des mesures a été confirmée ultérieurement durant l'installation des composants, qui s'emboîtaient parfaitement avec les autres pièces. Il existe un test standard fourni avec le logiciel du laser tracker, nommé « Pointing compensation » (compensation de pointage), qui effectue un test similaire (ADM) pour différentes positions du laser tracker. Cette procédure de compensation détermine et corrige les erreurs de visée arrière et les erreurs des encodeurs angulaires. Une fois le test effectué, des mesures précises peuvent être prises depuis différentes positions.

VÉRIFICATION SUR SITE DE LA PRÉCISION DES MESURES DE NIVEAU

Pour facilement démontrer à un client ou à soi-même que le laser tracker fournit des mesures précises de niveau, on peut comparer les résultats à un autre instrument de précision reconnue, comme un niveau électronique. Pour l'un des projets situé en Colombie Britannique, nous avons mesuré l'inclinaison d'un bloc de poussée avec le laser tracker puis avec un niveau électronique. Le bloc de poussée est similaire à une bride d'accouplement et fait environ 3 mètres de diamètre. Le niveau électronique a été positionné de manière radiale dans 18 positions entre les trous des boulons de couplage. Mesurer l'inclinaison radiale dans 18 positions distribuées également a permis de calculer l'inclinaison du plan en résultant. Pour le laser tracker, on a mesuré un plan en utilisant aussi 18 points entre les trous de couplage. Nous ne nous attendons pas à avoir des résultats coïncidant si exactement pour chaque mesure, mais il était tout de même rassurant de voir des résultats aussi proches en sachant que ce composant et bien d'autres doivent être mis à niveau avec une tolérance de 0,02 mm/m durant le réassemblage. La précision spécifiée pour notre laser tracker est de +/-2 secondes d'arc, ce qui correspond à +/-0,0097 mm/m (1 s. d'arc = 0,004848 mm/m).

La précision spécifiée de +/-0,0097 mm/m est environ la moitié de la plus petite tolérance utilisée durant l'assemblage de générateurs hydroélectriques, soit 0,02 mm/m. Ainsi, afin de mettre à niveau un composant avec une précision de 0,02 mm/m nous devons être particulièrement attentifs sur le site afin d'obtenir les résultats attendus. Cela signifie qu'avant de prendre des mesures critiques, l'utilisateur doit s'assurer que les étapes (telles que le temps de préchauffage, l'auto-compensation, les vérifications angulaires et de niveau ont été effectuées. Le système de coordonnées utilisé doit aussi être récent. Après avoir pris des mesures de niveau sur un composant, une des manières de s'assurer de la validité des résultats est de mesurer à nouveau le niveau d'un des composants avec un appareil réinitialisé et un nouveau système de coordonnées. Ceci n'est généralement pas nécessaire, mais peut être utile pour enlever tout doute concernant des mesures critiques. Finalement, notre expérience a montré qu'en faisant attention nous pouvons efficacement mettre à niveau des composants avec une tolérance de 0,02 mm/m.

Autre application pour laquelle la plus grande prudence est nécessaire : lorsque nous utilisons en même temps des mesures à une hauteur basse et élevée, en particulier lorsque ces mesures sont utilisées pour centrer des pièces stationnaires. Les turbines hydroélectriques et les groupes générateurs peuvent souvent mesurer plus 15 mètres de hauteur et une petite erreur d'inclinaison du système de coordonnées de l'ordre de 0,01 mm/m crée une incertitude de 0,15 mm. Ainsi, avant de prendre ces mesures, il est important de s'assurer que le système de coordonnées est plan. Si l'utilisateur ne crée pas un nouveau système de coordonnées, il doit exécuter la commande de mesure de niveau (Measure Level) et lire les vecteurs « i, j, k » du plan de niveau ainsi créé avec 6 décimales. Par exemple, si le vecteur i ou j est égal à 0,000010, cela signifie que l'inclinaison de l'axe X ou Y est de 0,01 mm/m. L'utilisateur peut ensuite décider de continuer à utiliser le système de coordonnées actuel ou de le mettre à jour, suivant la précision requise. Une des erreurs fréquentes est de supposer que les drageoirs (références fixes) montés sur les murs ou sur les équipements environnants restent stables au cours du temps, assurant ainsi un système de coordonnées inchangé et précis. Le niveau du système de coordonnées doit être

révéréifié tous les jours ou avant chaque mesure critique, particulièrement si la prise de mesures dure une longue période de temps.

Sur site, nous avons également vérifié que le plan de niveau créé par le laser tracker était reproductible avec la commande de mesure de niveau (Measure Level). Ce test a été répété à titre d'expérience et est expliqué ci-dessous.

EXPÉRIENCE POUR DÉTERMINER LA PRÉCISION DU NIVEAU

Afin de déterminer la précision du niveau du laser tracker, nous avons conçu un test qui a été effectué à divers moments et emplacements avec différents lasers de poursuite, du même modèle qu'indiqué précédemment. Ce test est divisé en deux parties.

La partie A sert à valider la reproductibilité du niveau généré par le niveau de précision intégré à l'instrument.

La partie B consiste à répéter des mesures de hauteur sur deux points séparés d'environ 15 m, de manière similaire au peg-test utilisé habituellement pour la vérification optique de la précision du niveau.

Le premier test, la partie A, a été effectué deux fois avec deux lasers de poursuite différents. Le test consiste à créer 5 plans de niveau pour observer les variations entre chaque niveau. Après avoir créé un système de référence avec les 8 drageoirs situés autour de la zone de mesure, la tête du laser a été tournée de 180 degrés. Les drageoirs ont été mesurés à nouveau pour réutiliser le même système de coordonnées qu'avant la rotation, puis 5 nouveaux plans de niveau ont été mesurés. Ces derniers ont été comparés les uns aux autres pour mesurer les variations. L'inclinaison moyenne de ces 5 plans a été comparée à la moyenne des 5 plans obtenus avant la rotation. Cette vérification permettait de détecter toute influence de la position de la tête du laser, qui pourrait induire une erreur systématique sur le plan de niveau. Le même exercice a été répété avec la tête du laser tournée à 90 et 270 degrés. Le résultat de ces tests est résumé ci-dessous.

- En utilisant deux lasers de poursuite, un total de 40 plans de niveau ont été créés.
- Pour tous les groupes de 5 plans créés dans les mêmes conditions, la variation de l'inclinaison sur chaque axe est normalement inférieure à 0,006 mm/m (+/-0,003 mm/m). Seuls deux des plans ont montré une variation allant jusqu'à 0,010 mm/m (+/-0,005 mm/m), ce qui correspond à une reproductibilité du plan de niveau de moins de +/-1 s. d'arc.
- Les deux plans de niveau ayant la déviation par rapport à la moyenne la plus importante étaient les deux premiers plans, ceci suggérant qu'un temps de préchauffage du système plus long peut améliorer la précision.
- En comparant les groupes de plans de niveau avant et après la rotation de la tête du laser tracker, nous n'avons observé aucune influence significative de la position de la tête du laser tracker. Nous avons ainsi démontré qu'il n'existe aucune erreur systématique liée à la position de la tête du laser tracker durant la création du plan de niveau.
- Pour conclure, ce test permet d'affirmer que le laser tracker est capable d'établir une précision de plan de niveau de +/- 0,005 mm/m ou +/-1 s. d'arc. Cette valeur pourrait être améliorée moyennant de nombreux plans de niveaux, mais ce n'est pas nécessaire pour des applications où la tolérance d'inclinaison est de 0,02 mm/m ou plus.

Pour la partie B de l'expérience, 4 tests indépendants ont été effectués avec 3 lasers de poursuite différents. Les tests mesuraient la différence de hauteur entre deux cibles A et B séparées de 17 m. Comme pour le peg-test de niveau optique, le laser tracker a d'abord été placé au centre entre les cibles A et B, puis a été déplacé à une nouvelle position à 5,7 m de la cible A. La différence de hauteur a été remesurée. Ce test a été accompli 5 fois pour obtenir un total de 10 mesures. Pour chacune des 10 positions, un nouveau système de coordonnées a été créé en utilisant à chaque fois un plan de niveau créé par le niveau de précision intégré au laser tracker. La précision ou la reproductibilité des résultats est ainsi une bonne indication de la précision du plan de niveau et peut aussi inclure certaines erreurs de mesure qui ne sont pas forcément issues du plan de niveau mais d'autres sources liées à la distance, aux vibrations ou aux erreurs des encodeurs numériques.

LES 40 MESURES DES 4 TESTS SONT RÉSUMÉES CI-DESSOUS :

Différence de hauteur entre les cibles A et B								
	Test 1 - Différence de hauteur entre les cibles A & B (mm)	Écart par rapport à la moyenne (mm)	Test 2 - Différence de hauteur entre les cibles A & B (mm)	Écart par rapport à la moyenne (mm)	Test 3 - Différence de hauteur entre les cibles A & B (mm)	Écart par rapport à la moyenne (mm)	Test 4 - Différence de hauteur entre les cibles A & B (mm)	Écart par rapport à la moyenne (mm)
Position 1	114.57	0.01	59.25	0.02	106.973	0.04	8.22	0.05
Position 2	114.66	0.09	59.18	-0.05	106.927	0.00	8.18	0.01
Position 3	114.58	0.01	59.14	-0.09	106.948	0.02	8.20	0.03
Position 4	114.63	0.06	59.18	-0.05	106.869	-0.04	8.11	-0.05
Position 5	114.47	-0.10	59.25	0.02	106.869	-0.04	8.21	0.05
Position 6	114.61	0.04	59.31	0.07	106.91	-0.01	8.13	-0.04
Position 7	114.52	-0.05	59.31	0.08	106.929	0.01	8.17	0.00
Position 8	114.45	-0.12	59.29	0.06	106.915	-0.01	8.13	-0.04
Position 9	114.57	0.00	59.18	-0.05	106.988	0.05	8.20	0.03
Position 10	114.61	0.04	59.21	-0.02	106.894	-0.02	8.12	-0.05
Moyenne	114.57		59.23		106.92		8.17	

1) La distance entre les cibles A et B était fixée à 17 m pour tous les tests.
 2) * Les tests no. 3 et 4 ont été effectués en utilisant l'auto-compensation du laser tracker après chaque déplacement du laser, assurant une meilleure précision.

Nous observons que l'écart moyen maximal est de 0,12 mm durant le test n°1. Sur une distance de 17 mètres, cela représente une variation de 0,007 mm/m (1,4 s. d'arc), un résultat conforme au niveau de spécification de l'équipement, qui est de +/-2 s. d'arc. Il est important de remarquer que la variation entre les mesures diminuerait si toutes les mesures étaient prises dans le même système de coordonnées, mais ce test a été effectué en utilisant intentionnellement un nouveau système de coordonnées pour chaque position. L'une des façons de réduire les erreurs et d'augmenter la reproductibilité fut d'auto-compenser le laser de poursuite et de vérifier le niveau à chaque position, exactement comme pour créer un nouveau système de coordonnées. Avec cette étape supplémentaire de précaution, la variation maximale mesurée pour les tests n°3 et 4 fut de +/-0,05 mm, ce qui représente pour 17 mètres une variation de +/-0,003 mm/m ou +/-0,6 s. d'arc.

De tous les tests, partie A et B, nous concluons qu'avec un minimum de précautions nous pouvons avoir confiance que la référence de plan de niveau issue du laser tracker est bien en dessous de 0,005 mm/m (1 s. d'arc). Nous pouvons mettre à niveau des composants en toute confiance avec une tolérance de niveau aussi basse que 0,02 mm/m. Mesurer à nouveau le niveau d'un composant avec un appareil différent permet aussi de facilement renforcer notre confiance dans le niveau du composant. Cette technique est aussi très rapide, par rapport aux expériences précédentes.

Partage des techniques, des bonnes pratiques et des conseils

Obtenir une bonne précision exige un protocole rigoureux. La configuration du laser tracker est probablement l'étape la plus importante du processus de mesure. Le laser tracker requiert un temps de préchauffage et cette étape est aussi très importante. Nous avons observé que le laser devient plus précis après avoir été mis en route pendant plus d'une heure.

Les mesures peuvent être précédées de multiples calibrations et vérifications : auto-compensation, vérification de la précision angulaire, compensation de pointage, test intermédiaire de l'ADM, vérification du niveau. La vérification angulaire et l'auto-compensation doivent être effectuées au moins une fois par jour, avant les mesures, sur le volume complet de la pièce à mesurer. L'auto-compensation peut être effectuée plus souvent si une meilleure précision est requise.

Si vous reprenez un système de coordonnées existant, assurez-vous de vérifier quelques points pour confirmer le repositionnement de l'appareil dans le système de coordonnées précédent. Mesurez le niveau et comparez-le avec les valeurs précédentes pour vous assurer que le repositionnement est correct.

La vérification des paramètres du programme, comme les réglages de la sonde, les valeurs de contrainte, le taux d'acquisition, etc., permet d'assurer de bons résultats et des mesures précises.

Il est hautement recommandé de noter toutes les valeurs de calibrations, étapes et opérations de mesure dans un bloc-notes, mais aussi de nommer les points de manière à faciliter l'analyse finale.

Gardez les drageoirs (références fixes) propres avant chaque mesure pour limiter le risque d'erreur. De même, terminez la mesure par une référence connue. Ne tenez jamais pour acquis la précision ou l'exactitude des valeurs. La vérification régulière de la précision est une bonne pratique.

Évaluation des avantages et des limitations

Les avantages du laser tracker sont évidents dans de nombreuses applications : il réduit non seulement la durée de mesure, mais améliore aussi la précision des mesures dans la plupart des cas. Avec le laser tracker, il est également possible de mesurer divers composants dont la mesure serait autrement impossible, comme par exemple de vérifier le profil complexe d'une pale de turbine, ou de vérifier avec une grande précision la planéité d'une surface sur site. Le nombre de points de mesure est supérieur à celui des méthodes traditionnelles et des numérisations peuvent être effectuées.

Comme tout outil, cet instrument a aussi ses limites. Pour les grands groupes générateurs et turbines hydroélectriques, la portée maximum de 160 mètres est parfois un facteur limitant. Il peut être nécessaire de déplacer plusieurs fois le laser pour effectuer l'opération de mesure dans sa totalité. Les vibrations réduisent la portée, ce qui peut être un problème lorsque d'autres groupes environnants sont en route et produisent du courant. Mais ces limites peuvent être circonscrites en sélectionnant des emplacements adéquats pour les instruments ou en utilisant des supports absorbant les vibrations.

Il se peut que l'utilisation du laser tracker ne soit pas intéressante pour toutes les applications. Par exemple, pour contrôler l'alignement du système d'arbre d'un groupe hydroélectrique, il suffit de vérifier la rotation et d'utiliser un micromètre et un niveau électronique pour contrôler la verticalité. Il ne paraît pas très utile d'essayer de modifier la méthode pour utiliser un laser tracker. Cependant, le laser de poursuite demeure le meilleur outil disponible pour de nombreuses autres applications.

Retour sur investissement et autres avantages tangibles

Analyse coût-bénéfice du laser de poursuite FARO par projet :

Projet	Description	Alternative par des méthodes conventionnelles	Gain heure-homme %	Gain de chemin critique
GMS # 3 : projet d'amélioration	Mesure de la ligne de base de l'unité au démantèlement	Théodolite, corde à piano, micromètre & niveau optique	75 %	Significatif
GMS # 3 : projet d'amélioration	Alignement du palier de butée	Corde à piano, micromètre & niveau optique	50 %	Modéré
Rév. 5 : nouvelle construction	Alignement de composants encastrés : coude, cône, bêche spirale, blindage inférieur et supérieur	Théodolite, corde à piano, micromètre & niveau optique	40 %	Significatif
Rév. 5 : nouvelle construction	Fabrication et alignement du châssis et du cœur du stator	Corde à piano, micromètre & niveau optique	60 %	Significatif
Rév. 5 : nouvelle construction	Alignement du distributeur : capot, anneau inférieur, servomoteurs et bagues d'usure	Corde à piano, micromètre & niveau optique	30 %	Significatif
Rév. 5 : nouvelle construction	Alignement de la ferrure inférieure et du palier de butée	Corde à piano, micromètre & niveau optique	50 %	Significatif
Rév. 5 : nouvelle construction	Alignement de la ferrure inférieure	Corde à piano, micromètre & niveau optique	10 %	Significatif
Rév. 5 : nouvelle construction	Vérification et installation de la roue et de l'arbre de turbine	Corde à piano, micromètre & niveau optique	10 %	Modéré
EM 1-A : nouvelle construction	Alignement de composants encastrés : Coude, cône, bêche spirale	Théodolite, corde à piano, micromètre et niveau optique	40 %	Significatif
EM 1-A : nouvelle construction	Fabrication et alignement du châssis du stator	Plateforme et échafaudages, corde à piano & poutre de soutien	60 %	Significatif

Avantages
Amélioration des marges, grâce à la hausse de productivité découlant de la qualité de la technologie utilisée, c.-à-d. significativement moins d'heures dépensées qu'avec des instruments de chantier, comme un micromètre et de la corde à piano.
Diminution des coûts de main d'œuvre grâce à la limitation des installations de plateformes et d'échafaudages pour l'installation de cordes à piano.
Meilleurs taux de détection des défauts chez les fournisseurs utilisant le laser de poursuite FARO (fabrication de roue de turbine et de palier), donc moindre besoin de correction
Meilleurs taux de détection des défauts au montage, donc moindre besoin de correction. Subvention fédérale de Recherche & Développement
Postes de coût
Investissement initial, coûts de mise en place, entretien, calibration, accessoires, usure et mise à jour du logiciel FARO, coûts de formation, autres coûts

Retour sur investissement : synthèse	
Coût du capital utilisé	10,00 %
Valeur actuelle nette sur 5 ans sur 3 sites différents par an	\$1'102'324,47
Retour (en années)	0.92

REMARQUE :

- Progrès dans la gestion des changements : bénéfices estimés de 50 % du potentiel à 100 % sur deux ans.
- Coût de formation basé sur les tarifs FARO et sur le transfert de connaissances en interne pour agrandir l'équipe utilisatrice d'un technicien par an.
- Coûts de l'entretien de l'équipement, du transport, et de la calibration & certification annuelles diminuant après 2 ans en développant des procédures internes pour effectuer ces opérations sur site.
- Coûts des mises à jour et des accessoires, principalement le remplacement des sondes & drageoirs et en supposant une mise à jour du logiciel tous les 5 ans.
- Crédits de R&D du gouvernement fédéral pour la première année de mise en place.
- Gain sur le calendrier global et sur les activités du chemin critique, non démontré de manière tangible, mais ayant un impact significatif sur la satisfaction client.

Conclusion

Notre expérience nous permet d'affirmer que le laser tracker est capable d'établir une précision de plan de niveau de +/-0,005 mm/m ou +/-1 s. d'arc. En se fondant sur ces résultats et sur notre propre expérience, nous concluons que nous pouvons utiliser efficacement le laser tracker pour la mise à niveau de composants, avec une précision largement supérieure à la tolérance la plus rigoureuse de l'industrie hydroélectrique, qui est de 0,02 mm/m.

Nous concluons en disant que les avantages globaux de l'utilisation d'un laser v sont très significatifs, à la fois pour le client et pour le fournisseur. Le laser tracker est un outil polyvalent, permettant des mesures de très haute précision, qui améliore nos capacités de mesure par rapport aux méthodes conventionnelles.

Remerciements

Nous souhaitons remercier spécialement André Charbonneau de Voith Hydro, Yan Milot de Hydro Expertise et le personnel de Weir Power and Industrial à Montréal pour avoir participé aux tests effectués sur le laser de poursuite dans le cadre de la préparation de ce document. Un grand merci à Gilles Demers de FARO pour son assistance sans faille durant ces dernières années.

@ www.faro.com



FARO
9, rue des Trois Sœurs, BP 65110
Villepinte | 95975 Roissy CDG
Cedex, France

☎ +33 1 48 63 89 00
✉ +33 1 48 63 89 09
info@faro-europe.com