

Cadran solaire géant sur le barrage de Castillon : La topographie au service de l'astronomie

■ Sandra BERNI - Stéphane BOSCHER

2009, année mondiale de l'astronomie, célèbre le 400^e anniversaire de la première utilisation de la lunette astronomique par Galilée. De nombreuses manifestations ont été organisées afin de partager avec le public l'intérêt pour cette science et de favoriser l'accès à de nouvelles connaissances. Deux astrophysiciens, Denis Savoie⁽¹⁾ et Roland Lehoucq⁽²⁾, ont proposé à EDF la réalisation d'un cadran solaire sur la voûte d'un barrage.

EDF a accueilli avec enthousiasme ce projet. La Division Production Hydraulique a mis en place une équipe projet réunissant de nombreux services de EDF ainsi que des acteurs régionaux comme le Conseil Général des Alpes-de-Haute-Provence, le Parc Naturel régional du Verdon et la Communauté de communes du Moyen Verdon. Côté EDF, le Centre d'Ingénierie Hydraulique, le groupement d'usine de Castillon, l'Unité de Production Méditerranée et DTG⁽³⁾, ont travaillé en étroite collaboration avec Denis Savoie et Roland Lehoucq pour réaliser ensemble un cadran solaire inédit tracé sur le parement aval du barrage de Castillon, dans les Alpes du sud. Le service Ingénierie Topographie d'EDF-DTG a été largement impliqué dans ce projet, du relevé du barrage à l'implantation finale du cadran.

MOTS-CLÉS

Cadran solaire, lasergrammétrie, astronomie, barrage voûte, implantation topographique, énergie

Un cadran hors du commun

Le projet d'associer un barrage à la mesure du temps a tout de suite séduit EDF. Après quelques mois de recherche, le barrage de Castillon, situé dans les Gorges du Verdon a été retenu, car il s'avère à bien des égards, le meilleur site. L'emplacement géographique et l'orientation sud-est de ce barrage voûte garantissent un bon ensoleillement. De plus, il est situé dans une région très touristique, au cœur du Parc Naturel du Verdon et est facilement accessible par le grand public.

Contrairement à la majorité des cadrans solaires, il n'était pas possible pour des raisons techniques de poser un style (ou gnomon) afin de marquer le passage de l'ombre sur les lignes horaires. En effet, il aurait fallu accrocher un mât de plus de vingt-cinq mètres en haut du barrage ! Denis Savoie et Rolland Lehoucq ont eu l'idée lumineuse de se servir de l'ombre du parapet projetée sur la voûte pour marquer les heures. Pour

une heure donnée, la tangente à l'ombre serait tracée et cette tangente serait valable toute l'année. C'est l'ombre du barrage sur lui-même qui indique l'heure. Gérard Baillet, grâce à une modélisation 3D réalisée à partir des valeurs théoriques de la voûte et l'utilisation du logiciel POV-RAY confirma que l'on pouvait généraliser ces enveloppes à toutes les heures.

Le cadran solaire tracé sur le parement d'un barrage voûte est à plusieurs titres une première mondiale. D'une part, le cadran présente des dimensions exceptionnelles (200 m par 100 m). D'autre part, ce type de projet n'a jamais été réalisé auparavant.

Rélevé complet de la voûte

Pour calculer les lignes horaires – enveloppes des ombres – les astrophysiciens devaient s'appuyer sur la géométrie telle que construite de la voûte. Les plans d'exécution définis-

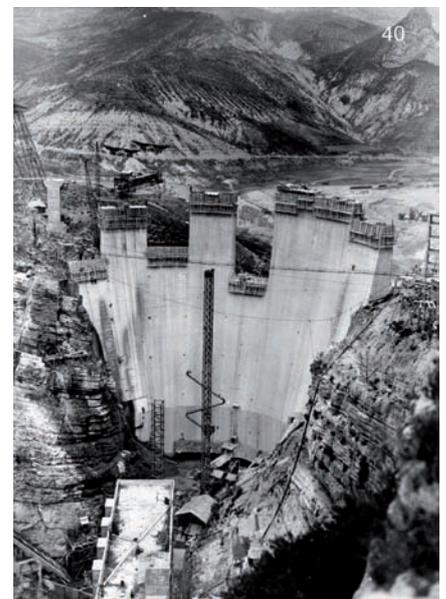


Figure 1. Vue aval du barrage et de l'usine pendant la construction – photo décembre 1947.

saient la forme théorique des parements amont et aval mais aucun relevé de l'ensemble du parement n'avait été réalisé depuis la fin de la construction du barrage. Sachant que les techniques de coffrage utilisées pendant la construction entre 1942 et 1948 (figure 1)

(1) Directeur du département Astronomie du Palais de la découverte.

(2) Astrophysicien, au Service d'Astrophysique du CEA de Saclay.

(3) Unité de mesure et d'expertise au service de la production électrique.



Figure 2. Le laser terrestre statique (Riegl LMS Z420i) en station, positionné en rive droite du parement aval du barrage de Castillon.

pouvait générer des écarts entre cinq et dix centimètres, il était indispensable d'effectuer un relevé de l'existant et de quantifier ces écarts pour le calcul du cadran solaire. Le service Ingénierie Topographie de EDF est intervenu fin février 2009 pour déterminer les éléments nécessaires aux calculs des lignes horaires : le relevé complet de la voûte ainsi que son intégration dans l'environnement, l'orientation du barrage, la position et le détail de la corniche.

Les outils topographiques mis en œuvre pour le relevé ont été les suivants : le laser terrestre statique (Riegl LMS Z420i), 4 GPS Leica statiques, une station totale (TCRP) Leica. Le scanner laser Riegl (figure 2) ayant une longue portée de plusieurs centaines de mètres, il a été possible en 8 stations d'établir un relevé complet des 13000 m² de voûte avec une densité d'au moins un point tous les 10 cm sur le parement aval et d'au moins un point tous les 5 cm sur la corniche. Deux points fixes au niveau du barrage ont été rattachés au système Lambert 93 par GPS statique pour la planimétrie et au système IGN 69 pour l'altimétrie. La lasergrammétrie a été complétée par un relevé classique par tachéomètre laser sans réflecteur pour marquer les lignes de ruptures de pente pour la partie

corniche. Les relevés obtenus s'inscrivent dans une précision de l'ordre du centimètre.

Les données ont été traitées avec le logiciel RISCAN PRO (figure 3), le nuage de points a été nettoyé des points parasites correspondants à la végétation et aux crinolines d'accès aux pendules, et échantillonné avec une densité d'un point tous les 10 cm. Deux nuages de points ont été ré-

échantillonnés, un nuage avec un point tous les 0.50 m et un nuage avec un point tous les 1.00 m pour laisser aux astrophysiciens le choix de la densité du nuage utilisé dans les calculs.

Le relevé complet de la voûte a permis la détermination par la méthode des moindres carrés du centre du cercle de couronnement aval à la cote 880. A partir des données relevées et du plan d'exécution tracé pour la construction, il a aussi été possible de déterminer l'orientation de l'axe de symétrie du barrage par rapport au Nord Lambert 93. Mais pour le calcul d'un cadran solaire, c'est l'orientation du barrage par rapport au Nord Géographique qui importe. Pour le barrage de Castillon, la différence entre le nord géographique (direction du pôle nord



Sur la voûte du barrage, l'ombre incurvée de la corniche.

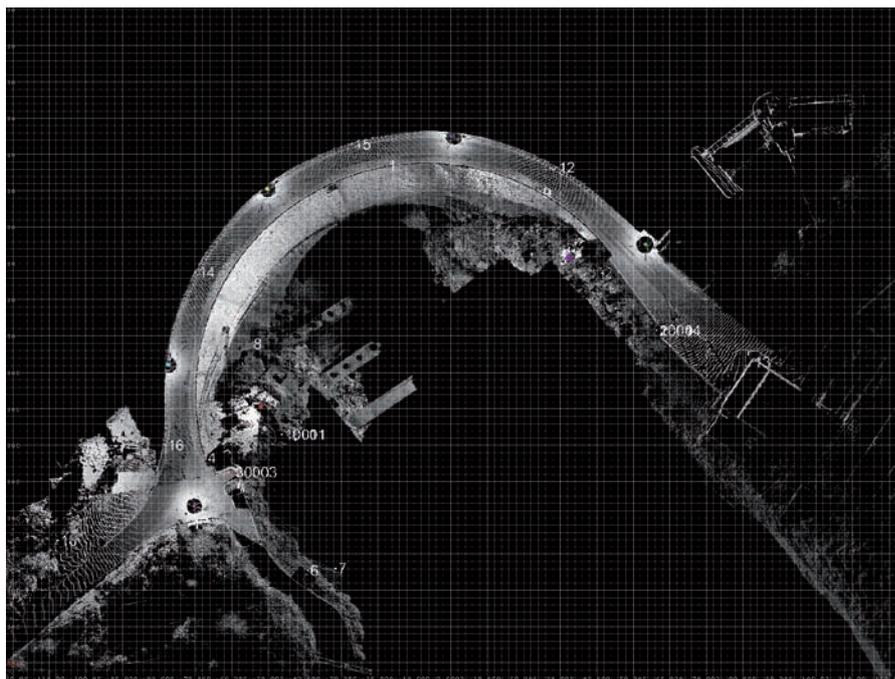


Figure 3. Nuage de points traité avec le logiciel RISCAN PRO - vue de dessus et vue de l'aval du barrage.



géographique, donnée par l'image des méridiens) et le nord de la projection Lambert 93 (dont la direction est donnée par l'axe des Y de la projection) correspond à un angle de -2.56° . Cet angle est appelé convergence des méridiens, il varie suivant le type de projection utilisée et l'éloignement du point par rapport au méridien origine de la projection. La déclinaison gnomonique, qui correspond pour ce cadran à l'azimut de l'axe du conoïde, est de $-13,99^\circ$. La déclinaison gnomonique est comptée positivement depuis le Sud vers l'Ouest (de 0° à 180°), et négativement vers l'Est (de 0° à -180°). Le barrage de Castillon regarde légèrement vers le Sud-Est, ce qui explique pourquoi les lignes horaires ne sont pas réparties de manière symétrique sur la voûte.

Pour compléter l'ensemble des données fournies aux astrophysiciens, une coupe de la corniche a été établie (figure 4). Cette corniche est composée d'un parapet et d'un tore dont les dimensions et la position par rapport à la voûte peuvent avoir un impact direct sur les calculs des lignes horaires.

Notons que le barrage "bouge" au fil du temps, principalement sous l'effet de deux phénomènes : la différence de température entre l'été et l'hiver ainsi que la hauteur de la cote de retenue.

Globalement, d'après les mesures régulières de DTG, le barrage se dilate de ± 2 cm, cela n'a donc aucune conséquence sur la précision du cadran solaire.

Calcul des lignes horaires

L'ensemble des données fut livré aux astrophysiciens mi-mars afin qu'ils puissent calculer les futures lignes horaires à implanter. Les contraintes de temps étaient très fortes puisque l'installation du cadran nécessitait a minima deux mois et que le cadran devait être prêt pour le solstice d'été.

Le calcul des lignes horaires dépendait directement des données géométriques fournies en entrée. Les coefficients des équations définissant le parement ont été ajustés pour être au plus près de l'existant et pour permettre une résolution analytique du problème. Après ajustement, le modèle défini par les équations s'écarte en moyenne de 2,4 cm de la surface réelle, preuve de la grande qualité d'exécution lors de la construction du barrage. Des processus itératifs de calculs ont été réalisés pour générer les enveloppes. Une série de calculs déterminait l'ensemble des ombres possibles sur la voûte pour une heure donnée afin d'obtenir la tangente commune à toutes ces ombres.

La géométrie complexe de l'encorbellement ajoutait une contrainte supplémentaire à la résolution de ce problème : sous le parapet se dessinait une portion de tore, et ces deux éléments pouvaient conjointement générer une ombre sur le parement. Pour chaque ligne horaire, il a fallu déterminer qui, du parapet ou du tore, projetait son ombre sur le parement. Si l'ombre du parapet se projette sur le tore, alors c'est l'ombre du tore qui se projette sur la voûte. Si le tore est dans l'ombre du parapet, alors c'est l'ombre de ce dernier qui se projette sur la voûte. Toutes les lignes, sauf deux, dépendent exclusivement pour leur fonctionnement de l'ombre du parapet. La ligne 11h, la plus proche de la corniche dépend entièrement de l'ombre du tore. Quant à la ligne de midi, c'est soit l'intersection des ombres du tore et du parapet, entre mi-octobre et fin février, soit l'ombre du tore.

Les coordonnées des lignes horaires furent transmises au service Topographie avec une densité d'un point tous les mètres pour l'implantation.

Vérification et implantation des lignes horaires

Avant de réaliser l'implantation complète des lignes horaires, soit environ 300 mètres de lignes à tracer sur le parement, différents contrôles furent opérés pour valider les calculs réalisés.

Un premier contrôle "virtuel" fut effectué par Gérard Baillet, qui a modélisé le barrage en 3D avec POV-RAY et créé une animation 3D retraçant l'ombre sur le barrage à différentes heures.

Un deuxième contrôle fut de vérifier si pour un point donné du barrage, il était possible de prédire l'heure exacte du passage de l'ombre. Les angles des fenêtres d'accès aux dispositifs d'auscultation étaient des points caractéristiques idéaux car faciles à repérer sur le parement. Leurs coordonnées ont été extraites du nuage de points et

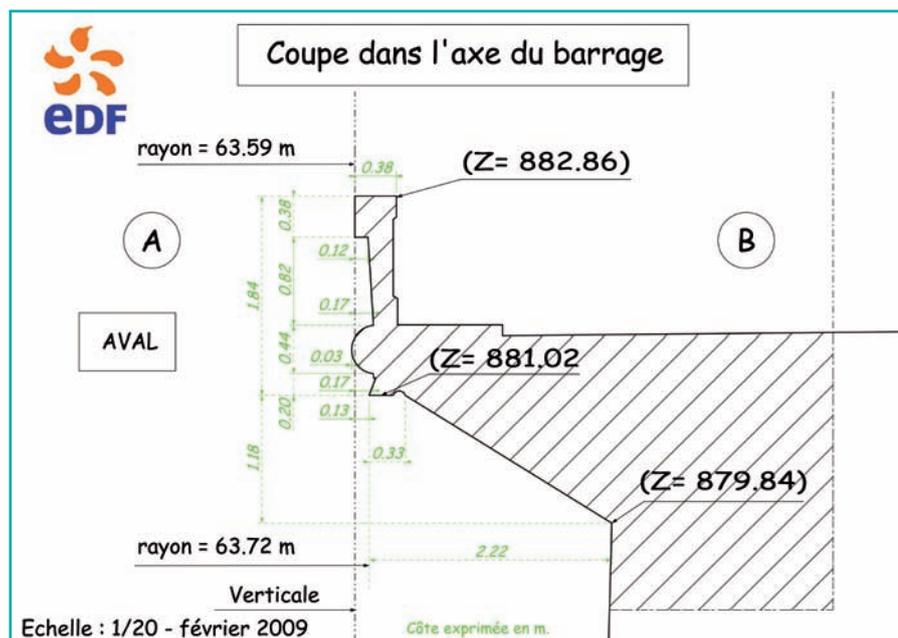


Figure 4. Coupe dans l'axe du barrage.



Figure 5. Implantation topographique des lignes horaires depuis chaque rive du barrage.



l'instant t où l'ombre devait passer était calculé. Un observateur situé sur le barrage était alors chargé de prendre une série de trois photos (5 minutes avant, à l'instant prévu et 5 minutes après) afin de vérifier si l'ombre passait bien sur le point à l'heure prévue. Cette démarche a permis de valider le modèle utilisé pour les calculs.

Finalement, avant l'implantation, les points fournis aux topographes ont été aussi importés dans le nuage de points origine pour s'assurer de la bonne superposition des lignes horaires sur la voûte.

Le service Ingénierie Topographie devait réaliser l'implantation dans un temps très court. Mi-avril, deux équipes ont été constituées avec deux tachéomètres positionnés, un en rive droite et l'autre en rive gauche aval de la voûte (figure 5). Sur la voûte, deux travailleurs acrobatiques se déplaçaient à l'aide de cordes pour inscrire tous les mètres les points d'implantation des lignes horaires indiqués par le pointeur laser (figure 6). Des écarts de l'ordre de quelques centimètres furent enregistrés entre



Figure 6. Traçage des lignes horaires par un alpiniste.

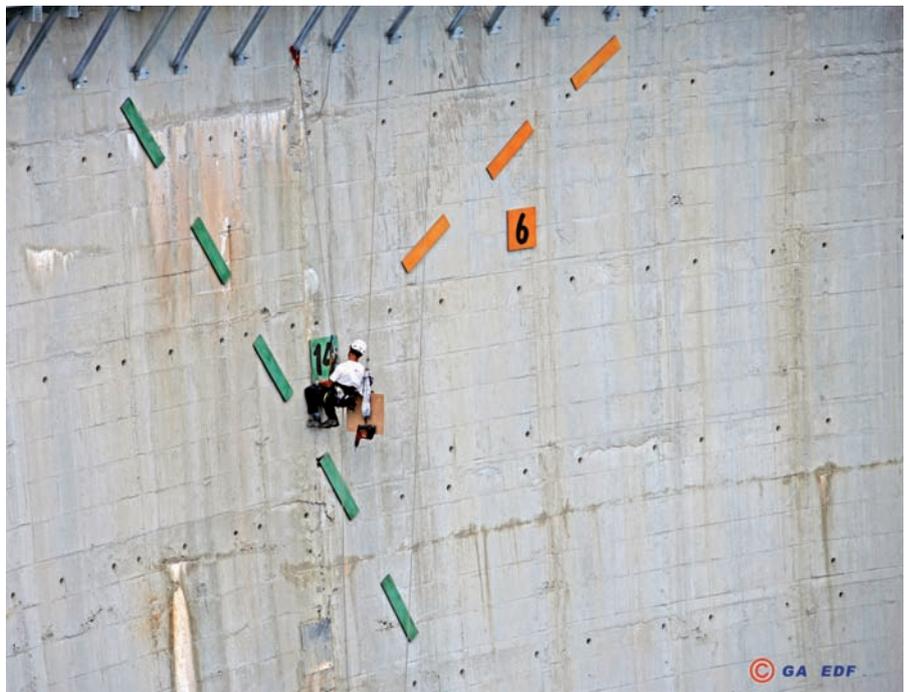


Figure 7. Fixation des plaques de lave émaillée.

les coordonnées des points implantés et les coordonnées calculées des lignes. Ces écarts correspondaient à la différence entre le modèle calculé et la position réelle du parement mais étaient sans conséquence sur la lecture du cadran. Les 300 mètres de lignes furent matérialisés de manière provisoire par des chaînettes de chantier rouges et blanches.

Grâce aux chaînettes, un dernier contrôle avant la matérialisation définitive des lignes fut opéré in situ fin avril.

Deux lignes seulement présentaient des anomalies : sur la zone où se projetait l'ombre pour 11h et 12h on pouvait constater des discontinuités importantes, ce qui engendrait une erreur de 4 minutes sur la lecture du cadran. Un modèle local a été recalculé pour repositionner ces lignes et le service Topographie est intervenu une seconde fois pour finaliser l'implantation des lignes horaires. Après ces quelques réajustements, la matérialisation définitive de ces lignes pouvait commencer.



Figure 8. Les eaux turquoise du lac de Castillon.

Travaux : rénovation, conformité et embellissement

Le projet du cadran solaire s'est inscrit dans le cadre d'une opération de rénovation programmée des accès aux dispositifs d'auscultation et de la pose d'une nouvelle passerelle. Les premiers travaux sur la voûte ont commencé dès le mois de mars avec le nettoyage du parement aval par l'équipe de travailleurs acrobatiques, dépose des anciennes passerelles et crinolines, et la mise en sécurité des accès aux barrages : sécurisation des abords, garde-corps et signalisation. Les lignes horaires ont ensuite été matérialisées. Le choix des couleurs, ocre pour le matin et vert pour l'après-midi et des matériaux a été fait en concertation avec les architectes du Parc naturel du Verdon pour s'intégrer au mieux dans l'environnement. Le cadran solaire est fabriqué en lave émaillée. 275 m de plaques de 1 m de long, 20 cm de large et 2 cm d'épaisseur, ainsi que les plaquettes pour les heures sont scellées dans le parement du barrage et matérialisent de manière durable les lignes horaires (figure 7). EDF, qui a accueilli et financé le projet,

a installé des panneaux explicatifs dans un local destiné au public offrant une vue remarquable sur le barrage. Ces panneaux expliquent aux visiteurs comment lire l'heure sur ce cadran si particulier et notamment comment passer du temps solaire au temps légal (voir encadré ci-contre).

Conclusion

L'inauguration de ce cadran solaire a eu lieu le 20 juin 2009 en présence de nombreuses personnalités. Ce rassemblement aura aussi été l'occasion de fêter le 60^e anniversaire de la mise en service de l'usine de Castillon, dont la construction fut achevée en 1948 par André Coyne (1891-1960). Il fut rappelé que les aménagements hydroélectriques d'EDF sur le Verdon jouent un rôle important dans la gestion multi-usages de l'eau : l'alimentation en eau potable, l'irrigation agricole et le développement économique du territoire. Sur le Verdon, les lacs turquoise formés par les barrages ont largement contribué au développement des activités touristiques (figure 8). Le cadran solaire fait dorénavant partie du parcours décou-

PRINCIPE DU CADRAN SOLAIRE

Le parapet du barrage projette une ombre sur la voûte. Pour une heure donnée, l'ombre est toujours tangente à une même droite, tout au long de l'année. Ces tangentes définissent les traces horaires. Pour convertir le temps solaire indiqué par le cadran solaire en temps légal des montres, trois corrections sont nécessaires :

Le temps solaire n'est pas uniforme

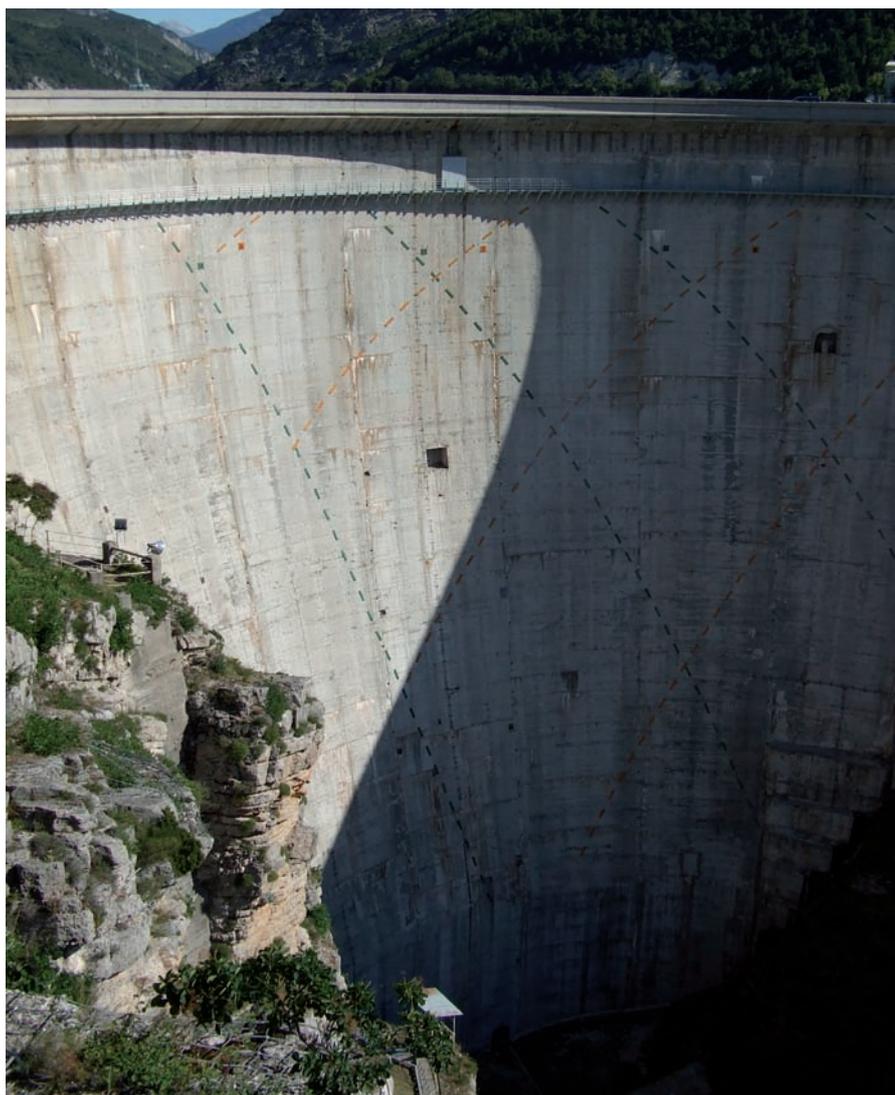
En raison de l'inclinaison de l'axe de rotation et de la variation de la vitesse de la Terre, le temps solaire vrai indiqué par les cadrans solaires n'est pas uniforme. En fait, la position de la Terre par rapport au Soleil n'étant pas exactement la même 24 heures après, il s'ensuit que l'on doit ajouter au temps solaire une première correction appelée "équation du temps".

La longitude par rapport à Greenwich

Depuis 1911, la France a rattaché son heure au méridien international de Greenwich (Temps Universel), de sorte que l'on doit systématiquement retrancher du temps solaire la longitude du lieu, soit ici 26 minutes 09 secondes.

L'avance sur le Temps Universel

En 1916 a été créée l'heure d'été. Depuis 1976 le rajout d'une heure sur l'année fait que nous sommes en avance de deux heures en période "heure d'été" et d'une heure en période "heure d'hiver" sur le Temps Universel.



©EDF

Figure 9. Inauguration 20 juin 2009 - 8h00 solaire - 9h35 à la montre.

verte des cadrans solaires de la Communauté de communes du Moyen Verdon et contribue à l'enrichissement touristique de cette région. Une exposition en plein air, sur place, vient détailler cet ouvrage et expliquer le principe des cadrans solaires et des barrages hydrauliques.

Fidèle à la tradition, le cadran a une devise : "L'énergie se renouvelle avec le temps". Ce cadran hors normes tant dans ces dimensions que dans sa précision, apporte aux visiteurs l'heure solaire grandeur nature, le temps de l'ensoleillement naturel, de 6 heures du matin à 18 h le soir avec une précision de 2 minutes (figure 9). C'est une nouvelle fonction donnée à cet ouvrage, une innovation très esthétique, qui attirera sans doute encore plus de monde dans cette belle région. Pour le

service Ingénierie Topographie de EDF, ce fut une occasion unique de montrer son savoir-faire. Ce projet fut motivant et enrichissant : l'implication du service dans ce projet favorisa de nombreux échanges avec les astrophysiciens, le Centre d'Ingénierie Hydraulique et le groupement d'usine de Castillon et l'emploi de tous les instruments topographiques couramment utilisés en fit un projet techniquement très intéressant. Du relevé de la voûte à l'implantation finale des lignes, le service a pu étape par étape participer à la réalisation de ce cadran solaire unique. ●

Références

[1] Cadran Info N°20 - Octobre 2009 - *Le cadran solaire du barrage de Castillon* - CCS (Commission des Cadrans Solaires) Denis SAVOIE

LE BARRAGE DE CASTILLON EN QUELQUES CHIFFRES

Hauteur maximale au-dessus du terrain naturel : 100 m

Longueur : 200 m

Capacité du réservoir : 149 000 000 de m³

Une retenue de 500 hectares

Castillon fait partie des 5 grands ouvrages exploités par EDF dans la vallée du Verdon avec Chaudanne, Sainte Croix, Quinson et Vinon

La production de l'usine de 82 millions de KWh équivaut à la consommation résidentielle annuelle de 33 800 habitants.

EXPOSITION TEMPORAIRE AU PALAIS DE LA DECOUVERTE

Si vous souhaitez en savoir plus, vous pouvez visiter l'exposition temporaire "A l'heure des barrages" au Palais de la Découverte à Paris, du 2 février au 27 juin 2010. Des photographies et des maquettes illustrent ce projet.

[2] L'ASTRONOMIE - Février 2010 - *Le cadran solaire du barrage de Castillon* par Denis SAVOIE

[3] Cadran Info N°19 - Mars 2009 - *Cadran solaire sur barrage* - CCS (Commission des Cadrans Solaires) Gérard BAILLET.

Contacts

Sandra BERNI et Stéphane BOSCHER
Service Ingénierie Topographie d'EDF-DTG, Lyon
sandra.berni@edf.fr
stephane.boscher@edf.fr

Denis SAVOIE
Palais de la Découverte, Paris
denis.savoie@palais-decouverte.fr

ABSTRACT

The dial is built on the Castillon Dam (Alpes de Hautes Provence, France). And it's not only the largest of the world, the sundial's design is original too. Designed by Denis Savoie and Roland Lehoucq and financed by EDF. The sundial was inaugurated on summer solstice 2009 (the astronomical year).

Le réseau de propagation du projet CLIC Analyse des données de l'expérience du TT1

■ Thomas TOUZÉ

Le CLIC⁽¹⁾ est un projet d'accélérateur de particules, proposé par le CERN⁽²⁾, en vue d'aller au-delà des portes de la physique des hautes énergies que le LHC⁽³⁾ [1] devrait ouvrir. Il s'agit d'un collisionneur linéaire d'électrons et de positrons, d'une longueur totale de 48 km. Ces deux types de particules cheminent le long de deux linacs⁽⁴⁾ respectifs, longs de 24 km, puis entrent en collision l'un contre l'autre au centre de la machine, le point d'interaction. Ce projet en est au stade des études de faisabilité qui doivent être achevées à la fin de l'année 2010.

Les faisceaux de particules du CLIC ont comme dimensions, au niveau du point d'interaction, 44 μm en longitudinal, 45 nm en transversal et 0.9 nm en vertical [3]. Pour assurer la dynamique de tels faisceaux, le CLIC requiert des tolérances d'alignement sur ses composants qui sont extrêmement précises. Le préalignement actif est la dernière étape de l'alignement du CLIC avant celui fait par rapport au faisceau lui-même. Il est qualifié d'actif au sens où la phase de repositionnement des composants suit leurs mesures. Les tolérances du préalignement sont de 10 μm le long d'une fenêtre coulissante de 200 m [1]. Pour répondre à ce défi lancé depuis vingt années, la stratégie proposée par les géomètres du CERN repose sur le réseau de propagation, à partir duquel les composants du CLIC sont préalignés [1]. Dans cet article vont être présentées les recherches effectuées pour démontrer l'aptitude de ce réseau à répondre aux spécifications, ainsi que les derniers résultats de sa validation expérimentale.

■ MOTS-CLÉS

Topométrie de précision, alignement d'accélérateur de particules, nivellement hydrostatique, fils tendus, CERN, CLIC.

Le réseau de propagation

Chacun des deux linacs du CLIC, enterrés à une profondeur allant de 100 à 300 m, est long de 24 km et est composé d'environ 10 000 modules de 2.1 m (les 3 km restants sont dédiés au Beam Delivery System afin de focaliser le faisceau avant le point d'interaction) [2]. A l'issue du préalignement actif, les modules doivent former sur 200 m une ligne droite selon une tolérance à trois sigma de 10 μm . La chaîne métrologique du préalignement du CLIC doit donc avoir comme incertitude de mesure 3.3 μm le long d'une fenêtre coulissante de 200 m. Afin que ce document soit univoque, l'incertitude de mesure est considérée comme l'erreur entre la vraie valeur et la mesure elle-même. Elle dépend de la justesse et de la précision (voir la figure 1).

- (1) Compact Linear Collider
- (2) Organisation Européenne de Recherches Nucléaires
- (3) Large Hadrons Collider
- (4) Linear Accelerators

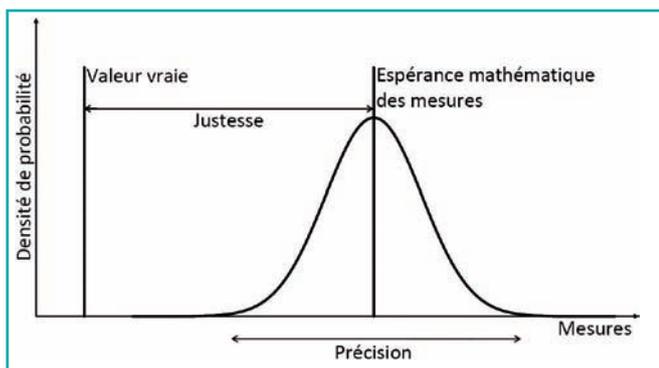


Figure 1. Incertitude de mesure.

Pour répondre aux spécifications du préalignement du CLIC, l'idéal serait de disposer d'une ligne droite de référence tout le long du projet et à partir de laquelle les positions des modules sont définies. Une telle référence n'existe pas sur une telle distance. La solution proposée consiste en la création d'un réseau de propagation, basé sur des références d'alignement d'une longueur de l'ordre de 200 m qui se succèdent avec recouvrement et dont l'orientation est déterminée avec redondance [1] (voir la figure 2).

■ Présentation du réseau

Quel système de mesures est susceptible d'être utilisé dans le réseau de propagation du CLIC ? Tout d'abord, il doit s'agir d'un système sur de longues distances, pouvant aller au-delà de 200 m. Ensuite, il doit avoir une incertitude de mesure micrométrique. Enfin, il est nécessaire de pouvoir mesurer un nombre n de points au même instant. Aujourd'hui, à notre

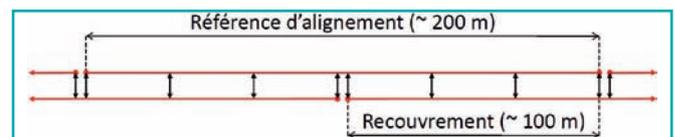


Figure 2. Schéma du réseau de propagation.

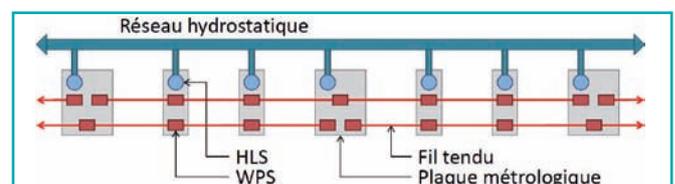


Figure 3. Capteurs du réseau de propagation.

connaissance, aucun système d'alignement ne répond à ces trois critères. Toutefois, il en existe un qui en est très proche, en l'occurrence le fil tendu mesuré par des capteurs WPS⁽⁵⁾ [10]. Pour assurer le recouvrement, les capteurs sont placés sur une plaque métrologique calibrée (voir la figure 3). Ainsi les positions relatives entre les capteurs d'une même plaque sont connues avec une incertitude de quelques micromètres en fonction de la CMM⁽⁶⁾ utilisée lors de la calibration (3 μm dans le cas du CERN). Les mesures par rapport aux fils tendus peuvent être couplées à des systèmes de nivellement hydrostatique HLS⁽⁷⁾ afin d'ajouter de la redondance dans la direction verticale. Les systèmes HLS sont basés sur le principe des vases communicants. Les mesures, capacitives, permettent de déterminer des dénivelés à une précision de 1 μm .

■ Les systèmes de coordonnées

Qu'il s'agisse d'un WPS ou d'un HLS, chaque capteur possède un système de coordonnées qui lui est propre et à partir duquel ses mesures sont définies. Ainsi un WPS fournit les distances transversales et verticales du point mesuré du fil à son zéro. Ces lectures sont les coordonnées du fil dans ce système. La justesse du capteur correspond alors à la qualité de la définition de ce système de coordonnées par rapport à des références externes qui sont mesurables. Les WPS produits par Fogale Nanotech ont présentement une justesse donnée à 50 μm . Pour atteindre les spécifications du préalignement du CLIC, il est nécessaire de l'améliorer d'au moins un facteur dix.

Pour ce faire, un système de centrage forcé sur trois billes de précision, basé sur le principe "trait, point, plan" [7], ainsi que le banc de calibration idoïne [8], ont été conçus (voir la figure 4). A partir des trois billes est construit un repère euclidien. La calibration consiste à déterminer les

trois translations et les trois rotations définissant le zéro et les axes du WPS par rapport à ce repère. Dès que le banc sera achevé, la justesse des WPS pouvant être atteinte par ce dispositif sera



Figure 4. Centrage forcé des WPS.



Figure 5. Plaques métrologiques.

connue. L'objectif est qu'elle soit en dessous de 5 μm . Les alésages des capteurs sont fixés sur des plaques métrologiques calibrées (voir la figure 5). Les points mesurés des plaques sont les centres des billes des supports de capteurs et ceux de prismes sphériques de topométrie de précision, de diamètres 1.5" et 3.5". Grâce à cette calibration, il est possible, non seulement de définir un système euclidien de coordonnées pour chaque plaque et chaque alésage de capteur qu'elle supporte, mais aussi les paramètres de transformations entre chacun de ces repères, sous la forme de matrices de translation et de rotation.

Par le biais des paramètres de transformation issus de ces calibrations, il devrait être possible de connaître les coordonnées des points mesurés par les capteurs WPS et HLS dans le repère euclidien des plaques avec une incertitude micrométrique. Mais pour pouvoir aligner les modules du CLIC à partir du réseau de propagation, encore faut-il définir les fils tendus et les réseaux hydrostatiques dans un repère général et ce, avec une incertitude sur 200 m qui soit micrométrique.

■ Stratégie pour une justesse micrométrique

La solution proposée pour répondre à cette question repose sur le repère euclidien général au projet CLIC et à la façon de déterminer les paramètres de transformation des plaques métrologiques à ce dernier (voir la figure 6). Dans un premier temps, avant même que les réseaux de capteurs n'interviennent, les plaques métrologiques sont mesurées par des méthodes usuelles à l'alignement d'accélérateurs de particules. Dans le cas du CLIC, cette étape est désignée sous l'appellation de préalignement mécanique. Son incertitude est de l'ordre de 0.1 mm sur 100 m [1]. Trois points par plaque, correspondant aux centres des trois prismes de topométrie de précision intégrés aux calibrations de ces dernières, sont mesurés ainsi. Ces points étant connus dans les repères de la plaque et du CLIC, il est possible d'effectuer un ajustement, par la méthode des moindres carrés, pour calculer la transformation d'un repère à l'autre. Les points mesurés des fils tendus et des surfaces d'eau sur chaque plaque métrologique sont désormais connus avec l'incertitude du préalignement mécanique.

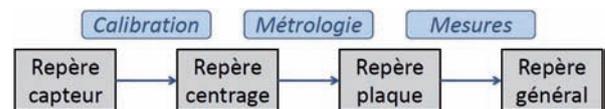


Figure 6. Enchaînement des systèmes de coordonnées.

Ces paramètres de transformation peuvent être améliorés du fait que d'autres lois régissent les points mesurés par les WPS et les HLS. En effet, par définition, ceux-ci appartiennent à des fils tendus et des surfaces d'eau. En admettant que les fils et les surfaces d'eau soient modélisables, alors un ajustement des coordonnées de ces points peut alors être effectué par moindres carrés. Si les modèles mathématiques sont suffisamment pertinents, c'est-à-dire s'ils prennent en compte tous les systématismes susceptibles de compromettre la justesse souhaitée, les résidus après l'ajustement ne

(5) Wire Positioning System

(6) Coordinates Measuring Machine

(7) Hydrostatic Levelling System Transfer



devraient alors être composés que de deux termes, à savoir l'erreur de positionnement, due à l'incertitude de mesure du préalignement mécanique, et l'erreur aléatoire fonction de la précision du capteur. Finalement, les résidus sur l'ensemble des capteurs d'une plaque métrologique permettront de calculer les corrections sur les paramètres de transformation du repère de cette dernière au système euclidien général.

Les résultats du TT1

L'expérience du TT1⁽⁸⁾ a pour but la validation du recouvrement des fils dans le réseau de propagation du CLIC. Elle a été conçue et installée en 2006. Elle a subi de nombreuses mises à jour dont la plus importante est l'installation des alésages à centrage forcé des WPS en fin 2008. Le TT1 peut être considéré comme une maquette du réseau de propagation longue de 140 m (voir la figure 7). L'expérience est composée de sept plaques métrologiques en invar, à peu près équidistantes, sur lesquelles sont installés des capteurs WPS et HLS appartenant respectivement à des fils de 49 m, 91 m ou 140 m et à un unique réseau hydrostatique.

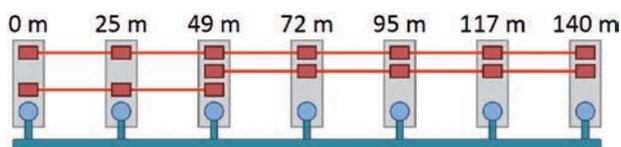


Figure 7. Disposition des capteurs au TT1.

La stratégie décrite au paragraphe précédent ne peut pas encore être démontrée en totalité. Comme les capteurs WPS n'ont pas encore été calibrés, les résidus après la modélisation des fils et de la surface d'eau ne peuvent être interprétés afin de corriger les paramètres des plaques. En d'autres termes, il n'est pas encore possible de s'atteler au calcul de la justesse de l'expérience du TT1. Ainsi au cours de ce paragraphe, l'accent sera mis sur la détermination de la précision de cette installation. Pour ce faire, les modèles utilisés restent simplifiés tout comme le repère général du tunnel qui n'est pas euclidien mais suit la courbure de la Terre. Les coordonnées approchées ont été calculées par les méthodes usuelles de topométrie de précision. Le levé du tunnel a été effectué avec un tachéomètre étalonné Leica TDA 5005, un niveau Wild NA2 et un laser tracker Leica LTD. La précision du réseau obtenu est de 0.2 mm dans les directions longitudinales et transversales du tunnel et 0.1 mm en vertical [9].

Modèle et résultats des HLS

Comme le repère général du TT1 suit la courbure de la Terre, la surface d'eau est considérée dans ce système comme un plan. Du fait de l'effet des marées terrestres qui font, d'une part, varier la distance au centre de la Terre de 30 cm deux fois par jour et qui, d'autre part, modifient la valeur du potentiel de pesanteur de l'ordre de $\pm 3 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ selon la même période, ce plan oscille dans le temps autour de l'horizontale passant par son isobarycentre C (x_c, y_c, z_c), d'un angle β (voir la figure 8). Soit M (x, y, z) un point quelconque de ce réseau hydrostatique.

(8) Transfer Tunnel number 1

La coordonnée altimétrique z de ce point dépend de son abscisse x , des coordonnées de C et de l'angle d'inclinaison β (voir l'équation 1).

$$z = z_c + \beta \cdot (x - x_c) \quad (1)$$

Un ajustement par la méthode des moindres carrés a été effectué sur les sept points du réseau d'eau du TT1, mesurés par les capteurs HLS, toutes les dix minutes du 22 juillet au 23 août 2009 inclus soit pendant trente-trois jours. Les paramètres ajustés sont l'altitude z_c de l'isobarycentre du réseau et l'angle β d'inclinaison de la surface d'eau. Cet angle varie d'une crête à l'autre de $\pm 1.2 \times 10^{-7}$ rad ce qui correspond à un déplacement de $\pm 8.4 \mu\text{m}$ aux extrémités du réseau hydrostatique (voir la figure 9).

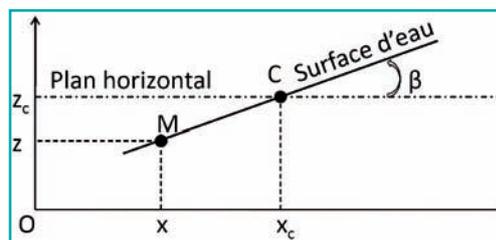


Figure 8. Modélisation de la surface d'eau.

Les résidus obtenus à l'issue de cet ajustement sont compris entre $\pm 60 \mu\text{m}$. Cependant, si ces valeurs sont relativement élevées, cela tient au fait qu'elles contiennent l'incertitude de mesure du réseau métrologique déterminé par les méthodes usuelles de topométrie de précision. Des séries

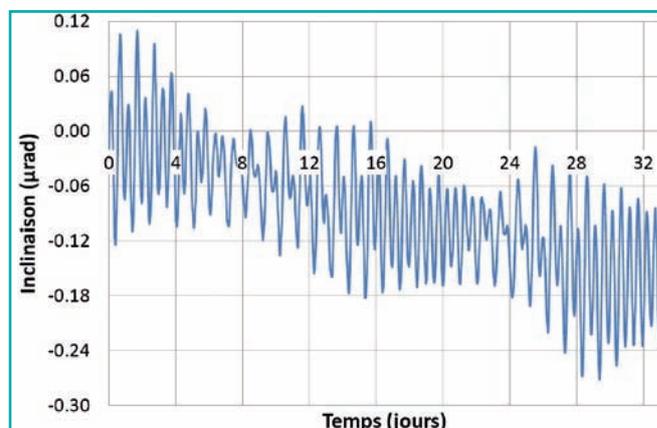


Figure 9. Inclinaison du réseau hydrostatique.

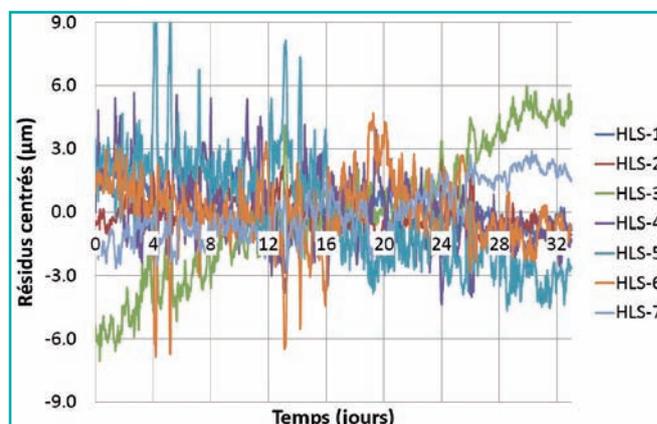


Figure 10. Résidus centrés après modélisation.

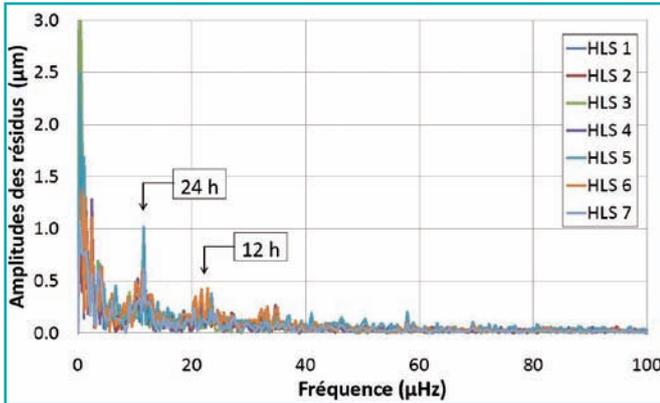


Figure 11. Spectre des résidus centrés.

de résidus correspondant à chaque capteur, sont déduites de leurs moyennes respectives. Les résidus centrés (voir la figure 10) sont obtenus ainsi. Ils ont un excellent comportement. Leur écart-type global est de $1.9 \mu\text{m}$.

Est-il possible pour autant d'affirmer que la précision du réseau hydrostatique du TT1 pendant cette période est de $1.9 \mu\text{m}$? Pour ce faire, des tests sur les résidus centrés ont été effectués, notamment une transformée de Fourier rapide (FFT) dans le but de s'assurer que l'ajustement de l'angle β suffisait pour compenser les phénomènes périodiques dus aux marées (voir la figure 11). Il subsiste un pic de $1 \mu\text{m}$ d'amplitude correspondant à une période de 24 h. Cependant il est plus probable qu'il soit dû aux variations périodiques quotidiennes de la température qu'aux marées. La période typique des marées est semi-diurne (12 h). L'amplitude du signal correspondant à cette période dans les résidus est inférieure à $0.4 \mu\text{m}$, c'est-à-dire dix fois moindre que la précision recherchée.

Les résidus normés, les w_i , au nombre de 33264, sont calculés à partir des résidus centrés et de leur écart-type. Ils ont été comparés à la loi normale centrée réduite (voir la figure 12). La distribution est d'autant plus satisfaisante que le test du χ^2 apporte un excellent résultat (voir l'équation 2) et ce, quel que soit le niveau de confiance choisi.

$$n = 33264$$

$$\sum_{i=1}^n w_i^2 = 33263.0 \quad (2)$$

$$\mathbb{E}(\chi_n^2) = n$$

A la vue des résultats après modélisation du réseau hydrostatique du TT1, il n'y a pas de systématisme détectable dans les résidus normés. La précision des mesures de ce réseau pendant ces trente-trois jours d'observation peut être considérée comme égale à $1.9 \mu\text{m}$.

■ Modèle et résultats horizontaux des WPS

Les données des capteurs WPS sont dissociées en deux parties concernant, respectivement, les modélisations horizontales et verticales des fils tendus. Lorsqu'un fil tendu est projeté sur un plan horizontal, une ligne droite est obtenue [5] (voir la figure 13). L'équation modélisant le fil en horizontal

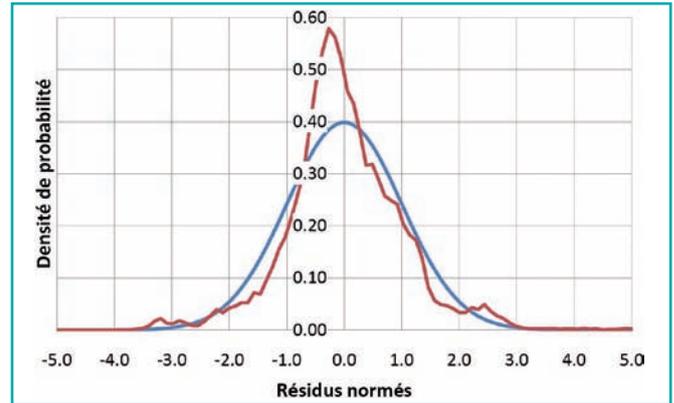


Figure 12. Distribution des résidus normés.

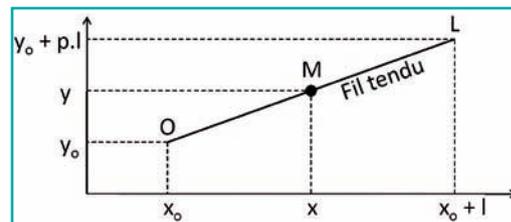


Figure 13. Modélisation horizontale du fil.

dépend des coordonnées du point d'origine $O(x_0, y_0, z_0)$ et du coefficient directeur p . A partir des coordonnées des points mesurés des fils tendus, un ajustement par moindres carrés est effectué, selon l'équation 4, sur les paramètres y_0 et p , et ce, pour chaque enregistrement.

$$y = y_0 + p.(x-x_0) \quad (3)$$

Les résidus obtenus à l'issue de cette modélisation, pour les fils de 91 m et de 140 m, sont compris entre $\pm 0.25 \text{ mm}$. Tout comme ceux des HLS en vertical, ce résultat est cohérent par rapport à la précision du réseau métrologique du TT1 dans sa direction transversale. A partir des moyennes des résidus sont déduits les résidus centrés (voir la figure 14). Leurs écarts-types sont, respectivement pour les fils de 91 m et de 140 m, de $0.9 \mu\text{m}$ et de $1.4 \mu\text{m}$.

Pour s'assurer de l'absence de systématismes, les résidus normés sont comparés à la loi normale centrée réduite (voir la figure 15) et un test du χ^2 est effectué. Le résultat est identique, à la décimale près, à celui fait sur les résidus des HLS. L'hypothèse de normalité est donc confirmée [4], prouvant ainsi l'absence de systématisme dans les résidus normés. La précision horizontale des fils tendus au TT1 au cours de ces trente-trois jours d'observation est, en considérant le plus élevé des deux écarts-types obtenus, de $1.4 \mu\text{m}$. Aucun systématisme n'est détectable dans les résidus normés.

■ Modèle et résultats verticaux des WPS

En vertical, un fil tendu est modélisé par une équation de chaînette, c'est-à-dire un cosinus hyperbolique fonction de la tension, de l'accélération de la pesanteur et de la masse linéaire [6]. Selon une excellente approximation, ce modèle peut être approché par un polynôme du second degré s'affranchissant de ces précédents paramètres au profit de la dénivelée h et de la flèche f , correspondant à l'écart maximal

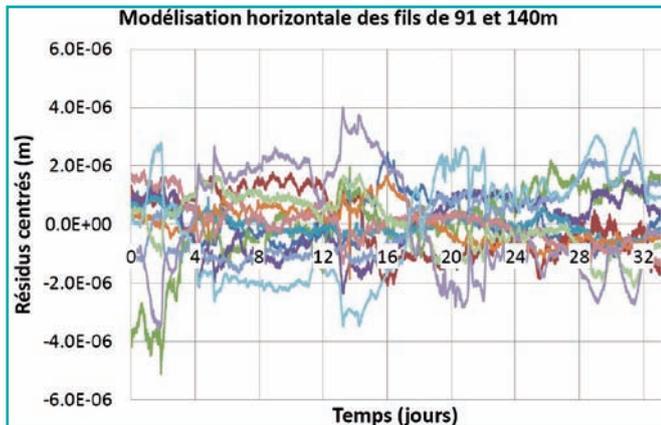


Figure 14. Résidus centrés après modélisation.

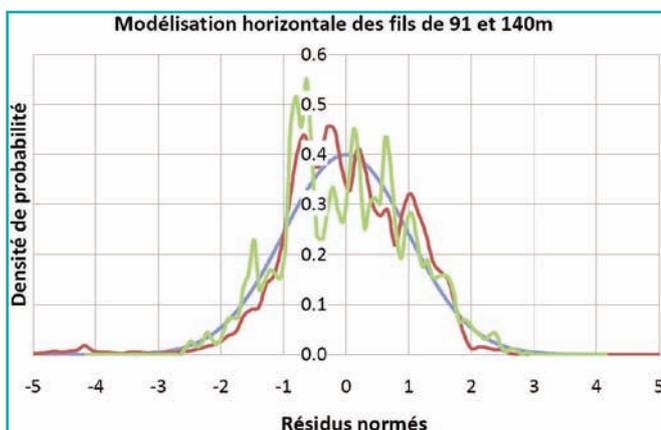


Figure 15. Distribution des résidus normés.

entre la droite formée par les deux extrémités du fil et le fil lui-même [5] (voir l'équation 4 et la figure 16). Les autres paramètres pris en considération dans ce modèle sont l'abscisse x_0 du point d'origine du fil et sa longueur l .

$$z = z_0 + \frac{4f}{l^2} \cdot (x - x_0)^2 + \frac{h - 4f}{l} \cdot (x - x_0) \quad (4)$$

Les paramètres ajustés par moindres carrés, à partir des coordonnées des points mesurés du fil suivant ce modèle, sont l'altitude du point d'origine z_0 , la flèche f et la dénivellée h . Les flèches ajustées des fils de 91 m et de 140 m (voir la figure 17) varient de $\pm 12 \mu\text{m}$. Cela est dû aux importantes variations de l'humidité relative dans le tunnel TT1. Quand l'humidité augmente, le fil se charge accroissant ainsi sa masse linéaire dont dépend la flèche. Le facteur de corrélation entre l'humidité relative et les flèches ajustées sont pour les deux fils de 90 %. Les flèches varient donc, certes, mais l'étude des résidus montre que cela n'empêche pas pour autant de modéliser les fils en vertical.

La valeur des résidus obtenus avec les fils tendus en vertical sont, encore une fois, parfaitement en accord avec la précision du réseau métrologique, qui est de 0.1 mm dans cette dimension. Ainsi le résidu le plus élevé atteint en valeur absolue 0.11 mm. Une fois leurs moyennes respectives déduites, les résidus centrés ont aussi un excellent

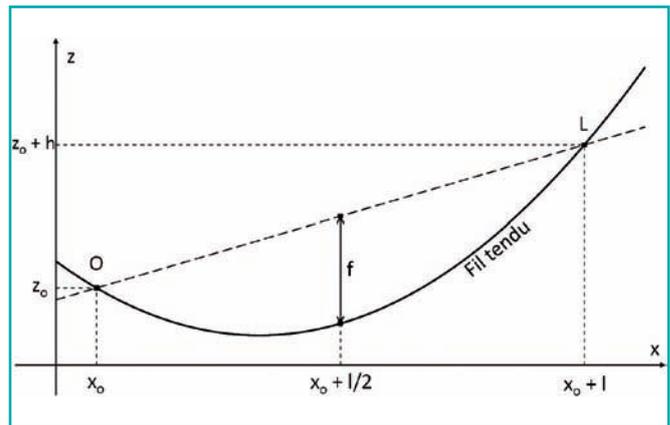


Figure 16. Modélisation verticale du fil.

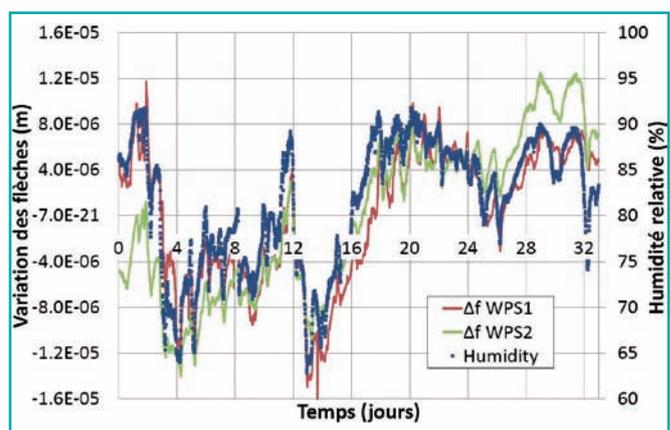


Figure 17. Variations des flèches et humidité.

comportement (voir la figure 18). Leurs écarts-types sont, pour les fils de 91 m et de 140 m, respectivement de $0.5 \mu\text{m}$ et de $1.6 \mu\text{m}$.

En observant plus attentivement les résidus centrés (voir la figure 18), ceux d'un capteur semblent dériver presque linéairement par rapport aux autres de $10 \mu\text{m}$ au cours des trente-trois jours d'observation. Comme le capteur HLS situé sur la même plaque métrologique observe également ce phénomène (voir la figure 10), il est exclu que celui-ci soit dû à la méthode de traitement des données. Il s'agit bel et bien d'un déplacement local observé identiquement par deux systèmes de mesures basés sur des principes physiques différents, et non d'une erreur systématique. Il prouve la capacité du réseau de propagation de dissocier les mouvements globaux des références d'alignement, des déplacements localisés, les premiers ne compromettant pas la précision d'alignement le long d'une fenêtre coulissante, contrairement aux seconds.

Calculés à partir des résidus centrés et de leurs écarts-types, les résidus normés des deux fils en vertical sont comparés à la loi normale centrée réduite (voir la figure 19) et subissent un test du χ^2 . Le résultat du test est lui aussi identique à celui des HLS, prouvant la normalité des résidus normés. Aucun systématisme significatif n'est détectable dans ces résidus. La précision atteinte en vertical par les fils tendus est, dans le pire des cas, de $1.6 \mu\text{m}$.



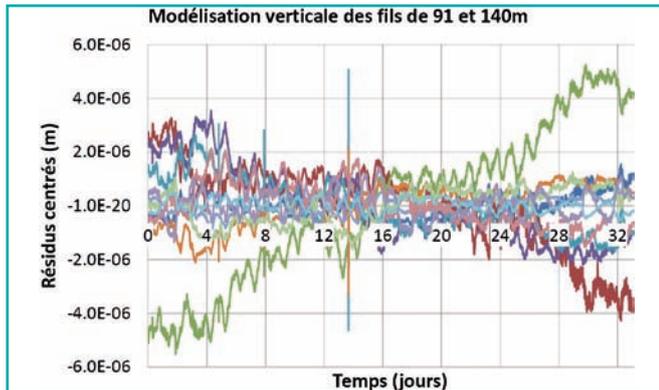


Figure 18. Résidus centrés après modélisation.

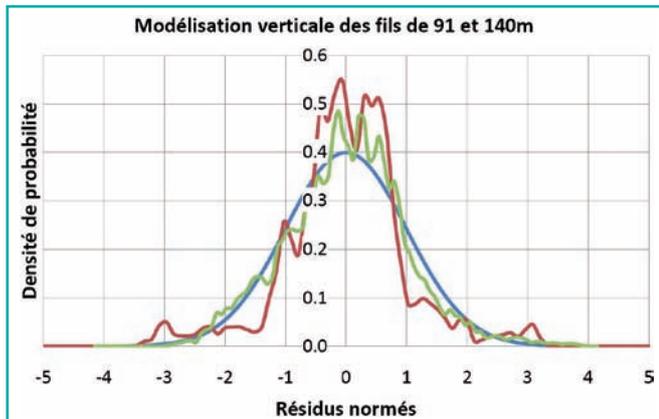


Figure 19. Distribution des résidus normés.

Conclusion

La capacité du réseau de propagation du CLIC à préaligner les modules dans les tolérances requises dépend de la gestion de l'ensemble des incertitudes de mesure. Chaque étape de la chaîne métrologique doit être étudiée de manière exhaustive afin de ne laisser la place à aucun systématisme susceptible de compromettre la justesse recherchée. Ainsi la méthode décrite dans ce document a pour but l'enchaînement rigoureux des systèmes de coordonnées, de celui des capteurs au repère euclidien général. Dans ce cadre, il serait pertinent d'améliorer les tests de normalité des résidus par le calcul du critère d'Abbe ou un test de Kolmogorov [4].

Cependant cette quête de la justesse micrométrique est vaine si elle ne s'accompagne pas de la précision. Ce sont ces deux composantes de l'incertitude de mesure qui sont nécessaires au préalignement du CLIC pour déterminer les positions des modules selon les spécifications. S'il reste encore un long chemin à parcourir, les résultats présentés dans ce document représentent tout de même une étape décisive. La précision atteinte expérimentalement au TT1 sur 140 m est de $2 \mu\text{m}$, et ce sur une période de trente-trois jours avec des variations hygrométriques importantes. Pour plus de rigueur, il reste cependant à la traduire en termes de répétabilité et reproductibilité. Quand la calibration des capteurs WPS aura été faite, il s'agira de s'atteler à la justesse. Cela consistera essentiellement à modéliser le plus exactement possible les fils tendus et les surfaces d'eau. Enfin, une fois que ces modèles seront validés expérimentalement au TT1, il faudra

les simuler tout le long du projet CLIC pour en étudier la propagation des erreurs. En effet, ce sont ces simulations, et non de simples valeurs quantitatives de la précision et de la justesse, qui valideront, dans les études de faisabilité, la capacité de la stratégie de préalignement du CLIC à assurer la dynamique du faisceau de ce projet [10]. ●

Contact

Thomas TOUZÉ

doctorant en sciences de l'information géographique, Université de Paris-Est, CERN BE/ABP, CH-1211, CERN Genève 23.

Thomas.Touze@cern.ch

<http://clic-alignment.web.cern.ch/clic-alignment/>

Références

- [1] F. Becker, W. Coosemans, R. Pittin and I. Wilson. *An active pre-alignment system and metrology network for CLIC*. CLIC note 553, CERN, 2003.
- [2] G. Riddone et al. *Technical specification for the CLIC two beam module*. European Particle Accelerator Conference, 2008.
- [3] H. Braun et al. *CLIC 2008 parameters*. CLIC note 764, CERN, 2008.
- [4] Y. V. Linnik. *Méthode des moindres carrés*. Dunod, 1962.
- [5] H. Mainaud. *Une nouvelle approche métrologique : l'écartométrie biaxiale. Application à l'alignement des accélérateurs de particules*. PhD thesis, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 1996.
- [6] D. Timoshenko and H. Young. *Engineering mechanics : statics, Volume 2*. McGraw-Hill Book Company Inc., 1937.
- [7] T. Touzé. *Calculs relatifs au projet de centrage forcé des capteurs WPS de Fogale Nanotech*. EDMS document 996885, CERN, 2009. <https://edms.cern.ch/file/996885/1/WPS-centrage-force.pdf>
- [8] T. Touzé. *Premier bilan du banc de calibration du zéro des WPS de Fogale Nanotech à centrage forcé*. EDMS document 996886, CERN, 2009. <https://edms.cern.ch/file/996886/1/WPS-Banc-Calibration.pdf>
- [9] T. Touzé. *Première modélisation des réseaux de capteurs au TT1*. EDMS document 1012014, CERN, 2009. <https://edms.cern.ch/file/1012014/1/tt1-first-model.pdf>
- [10] T. Touzé, H. Mainaud-Durand and D. Missiaen. *Propagation error simulations concerning the CLIC active prealignment*. Particles Accelerator Conference, 2009.
- [11] XYZ n° 116

ABSTRACT

The CLIC project is one of the candidates of particles accelerator, proposed by CERN, for the post LHC physics. Because of the high sensitivity of the CLIC beam dynamics, its components require very tight alignment tolerances which are, concerning the active prealignment, $10 \mu\text{m}$ along a 200 m sliding window. The answer proposed by the CERN survey team to such a challenge is based on the propagation network. It consists of building a straight reference by overlapping measurements systems, such as stretched wires, according to which the components are prealigned. This paper also describes the last results of the TT1 facility, designed in 2006 to validate this strategy.