

ÉTUDES DES MÉTHODES OPTIQUES ET MÉCANIQUES POUR LE TRANSFERT DU RÉSEAU GÉODÉSIQUE EN SURFACE AU RÉSEAU SOUTERRAIN, DANS LE CADRE DU PROJET CLIC AU CERN

Société d'accueil : CERN
PFE présenté par : Pierre HUGON
Directeur (directrice) du PFE : Thomas TOUZÉ
Correcteurs : M. LEDIG
M. FERHAT



Introduction

La vocation du CERN est la découverte des constituants élémentaires de la matière et la compréhension des lois de l'univers, en étudiant la collision de particules. Pour cela, le CERN utilise des accélérateurs de particules ainsi que des détecteurs. Des faisceaux de particules sont amenés à grandes énergies par l'intermédiaire d'accélérateurs pour ensuite entrer en collision entre eux. Les détecteurs permettent d'enregistrer des données, suite aux collisions, dans le but d'étudier les lois de l'univers. Actuellement l'accélérateur de particules en fonctionnement est le LHC (Large Hadron Collider). L'objectif du groupe de géomètres (Survey) est de pouvoir aligner les composants des accélérateurs et de vérifier leur positionnement au cours des expériences. Le futur accélérateur est déjà à l'étude, celui-ci est nommé CLIC.

La particularité du prochain accélérateur CLIC est d'être un accélérateur linéaire d'électrons et de positrons, composé principalement de deux linacs (linear accelerators) de 21 km pour atteindre une longueur totale de 48 km. Cet accélérateur est envisagé par le CERN en vue de compléter le LHC (Large Hadron Collider) en 2025. Au point d'interaction des faisceaux, l'énergie sera de 3 TeV (Téra électron Volt) alors que pour le LHC l'énergie maximale est de 7 TeV. Toutefois il faut relativiser, même si l'énergie de collision sera moins importante que dans le LHC, ceux ne sont pas les mêmes types de collisionneur, le CLIC est un collisionneur de leptons alors que le LHC est un collisionneur de hadrons.

L'objectif du groupe Survey, pour le projet CLIC, est un pré-alignement des composants du CLIC à 10 μm de précision sur la longueur d'une fenêtre glissante de 200 m. Ce pré-alignement sera réalisé à l'aide de systèmes de nivellement hydrostatique (HLS, Hydrostatic Levelling System) et de mesures d'écartométrie par rapport à des fils tendus (WPS, Wire Positioning System).

Ce projet de fin d'études (PFE) entre dans le cadre des recherches sur la faisabilité du projet CLIC. Le but est de mener une étude sur les méthodes optiques et mécaniques pour le transfert du réseau géodésique en surface au réseau souterrain, que l'on désigne par le terme "descente de verticale". Cette étape s'effectue généralement par des puits verticaux, avec des profondeurs variables. Dans le projet CLIC ces puits auront une profondeur variant entre 75 et 140 m. Pour atteindre la précision d'un pré-alignement à 10 μm sur une fenêtre glissante de 200 m il est nécessaire de disposer d'un solide réseau géodésique souterrain. L'objectif de ce projet est de pouvoir confirmer la faisabilité d'une précision planimétrique de 2 mm sur ces profondeurs, lors de descentes de verticale, afin de l'appliquer au projet CLIC. En bas de chaque puits des points sont descendus, le réseau est ensuite densifié par un ajout de points de cheminement dans les tunnels reliant les puits.

1) Etude de l'art

On peut lister les méthodes existantes en deux grandes familles, une pour les méthodes mécaniques et l'autre pour les méthodes optiques ; les autres étant regroupées dans la rubrique "divers procédés".

Les méthodes mécaniques

Pour les méthodes mécaniques on peut recenser différentes techniques :

- Le fil à plomb

Une masse pesante, libre de tout mouvement, est suspendue à un fil maintenu en sa partie supérieure, la direction que prend celui-ci correspond à la verticale vraie au lieu où se trouve le solide pesant. Le fil à plomb est utilisé dans le but de transmettre au fond du puits, les coordonnées du point d'attache du fil situé au sommet du puits.

Lors des levés on place des stations sur le haut du puits pour faire un relèvement sur les fils et déterminer leurs coordonnées dans un repère connu. Une fois la position des fils connue sur la partie supérieure du puits, il faudra disposer des stations en bas du puits pour effectuer à nouveau un relèvement sur les fils. Lors de nos expériences au puits PM32, la précision obtenue avec six fils à plomb est de 0,1 mm sur 65 m de profondeur.

- Lanceur à billes

L'idée est de lâcher une bille sans vitesse initiale, pour ensuite recueillir le point d'impact au fond du puits. Pour réaliser ce type d'expérience il faut disposer d'un appareillage spécial, car il est important de réaliser le lâcher sans la moindre impulsion latérale sur les billes. Les billes sont toutes calibrées et homogènes pour que la répétabilité de l'expérience soit bonne. La précision attendue avec ce dispositif est de l'ordre de 1 mm à 46 m de profondeur.

- Pendule inversé ou fil à flotteur

Ces dispositifs fonctionnent à l'inverse d'un fil à plomb. Dans ce cas c'est un flotteur immergé qui tend le fil verticalement au-dessus du point d'attache, sous l'influence de la poussée d'Archimède. Ce système est très utilisé dans l'auscultation de barrage. L'avantage de ce système est que le fil matérialise une verticale stable. La précision obtenue avec ce dispositif est similaire à celle des fils à plomb.

Les méthodes optiques

Avant d'exposer les méthodes optiques, il est important de préciser qu'au-delà d'une profondeur de 200 m, la réfraction rend les procédés optiques aléatoires.

- Tachéomètre muni d'un oculaire coudé

A l'aide d'un oculaire coudé il est possible de viser au zénith afin de réaliser un relèvement spatial 3D. Lors de nos expériences au puits PM32, la précision obtenue est de 0,2 mm sur 65 m de profondeur.

- Pentaprisme (prisme pentagonal)

C'est un prisme de section pentagonale, celui-ci est placé devant l'objectif, il permet de réaliser des visées zénithales ou nadirales. La précision attendue avec un pentaprisme pour une descente de verticale est de 1,2 mm à 100 m de profondeur.

- Lunette nadiro-zénithale

C'est une lunette permettant des visées soit au nadir, soit au zénith. La précision attendue est de l'ordre de 0,5 mm à 100 m de profondeur.

Les divers procédés

- Procédés magnétiques

Les procédés magnétiques permettent uniquement de fournir une orientation souterraine. Pour que ces procédés fonctionnent correctement, il est important que l'environnement soit amagnétique. La précision de ces procédés varie de 6 à 200 mgrad.

- Procédés gyroscopiques

Le gyroscope permet de déterminer par voie directe la direction du nord géographique, ce qui permet de fournir une orientation souterraine. Il est très souvent couplé avec un théodolite (gyro-théodolite). La précision attendue est de l'ordre de 1 à 10 mgrad.

Suite à l'étude des différentes méthodes existantes pour les descentes de verticales, il a été choisi de comparer une méthode mécanique avec des fils à plomb et une méthode optique avec un tachéomètre muni d'un oculaire coudé.

2) Expérience au puits PM32

Les expériences de descentes de verticales ont été effectuées au puits PM32 (diamètre 7,1 m) qui est situé dans un hangar, protégé ainsi des intempéries. Il est à noter que le puits n'est pas adapté à la descente de verticale, ce qui a compliqué la mise en place des expériences. Nous avons décidé de comparer une méthode optique et une méthode mécanique. Pour la méthode optique nous disposions des prismes posés sur des alésages coniques sur des plaques fixées sur la margelle, que nous visions depuis des stations disposées sur le haut et le bas du puits. Pour la méthode mécanique nous avons utilisé des fils à plomb. A cause des problèmes d'environnement du puits nous avons dû créer un dispositif permettant que l'origine du fil soit confondue avec le centre du réflecteur de la méthode optique. Cela permet de déterminer les coordonnées planimétriques du fil en haut du puits. On suppose que le fil est parfaitement rectiligne donc les coordonnées planimétriques du fil sont identiques en haut et en bas du puits. En bas du puits nous faisons un relèvement sur les fils. Les plombs munis d'ailettes sont plongés dans un bain d'huile. Nous avons effectué deux fois la méthode mécanique avec des poids de 5 et 2,5 kg, afin de détecter si un changement de poids influençait les résultats. Le choix de la masse des poids a été déterminé à l'aide d'un calcul de résistance de matériaux, en prenant en compte un coefficient de sécurité de l'ordre de 3. Nous avons placé un réseau de points à la surface et en bas du puits. Nous comparons les coordonnées obtenues sur les références en bas du puits avec les deux méthodes. Pour toutes les expériences mises en place au puits PM32, il a fallu concevoir des dispositifs et des stratégies de sécurité, il a fallu adapter le matériel topographique à ces exigences cela fut un travail intéressant et innovant.

3) Résultats et analyse

Avant de mener les expériences nous avons essayé de quantifier les phénomènes perturbant les fils à plomb. Cela inclut l'attraction newtonienne de la paroi qui attire le plomb en direction de celle-ci. On a estimé que le déplacement possible du fil à plomb dû à la paroi est de l'ordre du micron. Nous avons également examiné l'influence des courants d'air dans le puits, car même la ventilation coupée, il persistait un courant d'air résiduel. Pour cela nous avons réalisé un lâcher de ballons gonflés à l'hélium pour observer à l'œil si les ballons subissaient des perturbations. Suite à cela, les ballons ne semblaient pas être influencés lors de leur montée. Nous avons essayé quand même de quantifier à l'aide de formule d'aérodynamique le déplacement du fil à plomb dû à un courant d'air. On a pu conclure que l'influence d'un faible courant d'air est négligeable.

Après avoir pris la précaution qu'aucun phénomène physique ne venait perturber les fils à plomb, nous avons pu effectuer les calculs à l'aide du logiciel LGC (Logiciel Général de Compensation), qui est un logiciel interne et développé au CERN.

Lors de l'étape du calcul, nous avons choisi la pondération couramment utilisée par les géomètres du CERN pour les visées aux conditions normales (c'est-à-dire toutes les visées excepté celles effectuées au zénith). En revanche, pour les visées optiques au zénith nous avons pondéré les angles horizontaux d'un facteur d'environ un vingtième par rapport aux conditions normales.

Lors du calcul de la méthode mécanique nous n'avons pas remarqué de différence notable entre les mesures sur les fils avec des poids de 5 kg et de 2,5 kg. La moyenne des écarts de distance sur les références en bas du puits suivant les deux méthodes est de l'ordre de 0,16 mm. Pour avoir une influence significative il faudrait refaire les mesures avec des poids beaucoup plus conséquents.

Suite aux expériences et aux calculs réalisés nous pouvons estimer une précision, pour une profondeur de 65 m, de 0,2 mm pour la méthode optique et de 0,1 mm pour la méthode mécanique.

Le plus grand écart de distance entre la méthode mécanique et la méthode optique est de l'ordre de 0,5 mm. Les résultats obtenus satisfont entièrement l'objectif initial qui est d'atteindre une précision planimétrique de l'ordre de 2 mm. Pour s'assurer d'une bonne répétabilité des mesures, il faudrait

réitérer les mesures afin de valider les résultats. Par la même occasion, il serait intéressant d'examiner l'influence des différentes conditions météorologiques sur les mesures. Si cela s'avérait nécessaire, il serait possible d'apporter des améliorations. Nous pourrions ajouter des mesures à l'aide d'un gyroscope qui permettraient de fournir une orientation souterraine par rapport au nord géographique.

On peut imaginer mettre en place un système cylindrique de protection des courants d'air qui envelopperait l'ensemble des fils. Plus simplement, on pourra également choisir un fil plus résistant afin de le charger plus et ainsi limiter les effets des courants d'air.

Il serait également intéressant de refaire des mesures dans un autre puits moins encombré permettant de descendre une forme géométrique à l'aide de plaques ou de gabarits de métrologie connue. Les fils passeraient par les alésages des plaques ou des gabarits, ce qui permettrait de connaître la position de chaque fil. Cette idée était présente au début du projet mais l'environnement du puits ne nous a pas permis de le réaliser.

Une fois ces analyses réalisées, regardons les développements envisageables pour le projet CLIC.

4) Conclusion et perspectives pour le projet CLIC

Tout d'abord rappelons que le projet CLIC est en phase d'étude de faisabilité, cela a l'avantage que les recommandations avancées dans cette étude pourront s'intégrer au moment de la construction. La descente de verticale est primordiale pour le CLIC car en bas de chaque puits des points connus seront transférés. Ceux-ci permettront de densifier le réseau de points, par des cheminements entre chaque puits. Ce réseau de points densifié dans les souterrains, aura pour objectif de positionner des capteurs WPS, HLS... Ces capteurs permettront d'aligner les différents composants du CLIC entre eux. L'objectif final est un pré-alignement des composants suivant une fenêtre coulissante à 10 μm sur 200 m. Pour le projet CLIC il existe deux types de puits, de diamètre de 9 m ou 1,5 m, les puits sont espacés de 2 à 3 km, le long des 48 km de l'installation, leur profondeur varie de 75 à 140 m. Cette profondeur inférieure à 200 m présente l'avantage de permettre l'emploi des méthodes optiques.

Pour les puits de 9 m, nous pouvons imaginer un dispositif permettant de faire des mesures à l'aide des méthodes optique et mécanique, afin d'assurer un meilleur contrôle par deux méthodes indépendantes. Il sera possible d'opérer pour la méthode mécanique à l'aide de fils à plomb qui pourront être fixés à un support, qui pourrait être une poutre en béton. Cela aurait l'avantage de pouvoir disposer des fils au centre du puits et ainsi de les éloigner de la paroi où les conditions sont moins favorables. Les fils à plomb pourraient passer par des gabarits de métrologie connue à quelques microns près. Pour la méthode optique il sera possible d'utiliser soit un tachéomètre muni d'un oculaire coudé pour effectuer un relèvement spatial 3D, soit d'employer une lunette nadir-zénith fixée sur des dispositifs intégrés dans le génie civil.

Pour les puits de 1,5 m, il est impossible de pouvoir mettre en place deux dispositifs indépendants simultanément à cause du faible espace libre. On peut ainsi imaginer pour la méthode mécanique l'emploi de fils à plomb passant par des gabarits. Une fois cette méthode réalisée, nous pouvons alors exécuter une descente de verticale à l'aide d'une lunette nadir-zénith. Dans les puits de 1,5 m il n'est pas possible de réaliser un relèvement spatial 3D.

L'aboutissement du projet a répondu positivement à la problématique posée : atteindre une précision planimétrique de 2 mm pour les puits du CLIC. Nous avons avancé des améliorations envisageables afin de permettre une précision encore meilleure des descentes de verticale pour ce nouvel accélérateur. On peut souligner que le travail d'ingénierie effectué pour adapter le matériel topographique aux descentes de verticale a permis d'obtenir d'excellents résultats.