



HAL
open science

Nivellement des accélérateurs de particules au CERN

Florian Lenormand

► **To cite this version:**

Florian Lenormand. Nivellement des accélérateurs de particules au CERN. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2013. dumas-00941664

HAL Id: dumas-00941664

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00941664>

Submitted on 4 Feb 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS
ÉCOLE SUPÉRIEURE DES GÉOMÈTRES ET TOPOGRAPHES

MÉMOIRE

présenté en vue d'obtenir

le DIPLÔME D'INGÉNIEUR CNAM

Spécialité : Géomètre et Topographe

par

Florian LENORMAND

Nivellement des accélérateurs de particules au CERN

Soutenu le 28 Juin 2013

JURY

PRESIDENT : Arnauld GALLAIS

MEMBRES : Stéphane DURAND
Ghyslain FERRÉ
Jean-Frédéric FUCHS
Laurent POUX
Gwenaël SAGNE
Richard THEVENOT

Maître de stage
Professeur référent
Représentant Dominique MISSIAEN

Dominique MISSIAEN

Maître de stage

Avant-propos

Le CERN, Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire, fut créé en 1954 pour relancer la recherche scientifique sur le vieux continent. Quelques décennies plus tard, l'organisation est considérée comme le plus grand laboratoire de physique des hautes énergies au monde. Ce laboratoire est installé de part et d'autre de la frontière franco-suisse dans la périphérie de Genève. Il réunit 20 pays membres européens et accueille des chercheurs et techniciens de 113 nationalités.

Comme le stipule la convention signée par les pays membres, les recherches effectuées au CERN sont purement scientifiques et fondamentales et en aucun cas à des fins militaires. Bien que la recherche fondamentale soit éloignée de la vie quotidienne, elle est un réel tremplin pour les développements technologiques. Parmi les inventions passées dans la vie quotidienne, la plus connue est le World Wide Web, conçu par Tim Berners-Lee en 1990. Afin de comprendre l'univers, le laboratoire s'est doté d'accélérateurs de particules de plus en plus grands. Le principe étant d'obtenir une énergie maximale du faisceau de particules avant la collision aux points d'expériences.

Le LHC (Large Hadron Collider), mis en route en septembre 2008, est un gigantesque instrument scientifique permettant d'observer les plus petites particules connues. Cet anneau fait presque 27km de circonférence à environ 100m de profondeur et regroupe 4 points d'expériences dont les plus importants sont ATLAS et CMS. Avant que le faisceau n'atteigne sa vitesse maximale dans le LHC, il est accéléré progressivement via trois accélérateurs antérieurs que sont le Booster (157m de circonférence), le PS (628m) et le SPS (7Km). Il permet de recréer les conditions qui ont suivi le Big Bang.

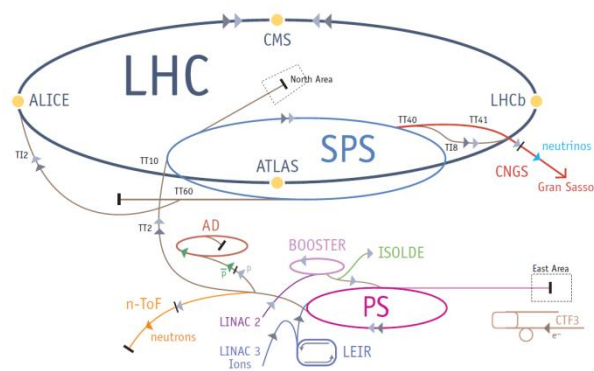


Figure 1 : Schéma des accélérateurs du CERN

Le CERN mène en parallèle plusieurs thèmes de recherche, parmi eux, la validation du modèle standard de l'univers et la fabrication de l'antimatière sont prépondérantes. Concernant l'antimatière, les premiers résultats eurent lieu en 1995 quand les premiers atomes d'antihydrogène furent créés dans la cadre de l'expérience PS210. En 2002, les expériences ATHENA et ATRAP ont poursuivi les recherches dans ce domaine, c'est maintenant au tour de l'expérience ALPHA. De leurs côtés, de 1989 à 2000, les 4 expériences du LEP (Large Electron Positron) ont permis d'établir la validation du modèle standard. Grâce au LHC, Le 4 Juillet 2012 sera désormais une date importante dans l'histoire du CERN, puisqu'elle résonnera avec l'annonce de la découverte d'un boson semblable à celui proposé par les physiciens Brout, Englert et Higgs 50 ans plus tôt, le célèbre boson de Higgs.

Pour aller encore plus loin dans la recherche, l'organisation fait actuellement des tests de faisabilité sur un nouvel accélérateur : le projet CLIC (Compact LInear Collider).

Remerciements

En préambule de ce mémoire, je tiens à adresser mes premiers remerciements à mes maîtres de stage Dominique Missiaen, chef de la section SU, et Stéphane Durand, maître de conférences de l'École Supérieure de Géomètres et Topographes, sans qui je n'aurais pas pu réaliser mon Travail de Fin d'Étude au CERN. Je les remercie également pour la confiance et l'aide qu'ils m'ont apporté.

Je remercie Jean-Frédéric Fuchs pour sa disponibilité et son aide précieuse durant ces cinq mois. Il m'a permis de me mettre dans les meilleures dispositions pour que je puisse mener à bien mon TFE. J'en profite pour remercier mon autre collègue de bureau, Philippe Dewitte, qui m'a également aidé.

Je remercie mon professeur référent Ghyslain Ferré, enseignant en topographie de l'École Supérieure de Géomètres et Topographes, pour l'attention qu'il m'a accordé lors de ce stage.

Je remercie l'entreprise Nedo pour le prêt de deux mires. Ce geste m'a permis d'effectuer ce travail dans les meilleures conditions.

Je tiens également à remercier Michel Kasser pour ses conseils avisés sur la mise en place et le perfectionnement du test de mesure longue durée. J'associe à ces remerciements José Cali, maître de conférences de l'École Supérieure de Géomètres et Topographes, pour m'avoir aiguillé sur l'analyse de certaines données.

Je n'oublie pas l'ensemble du personnel appartenant à la section SU pour leur accueil, leur sympathie et le partage de leur savoir. Je tiens particulièrement à remercier Mathieu Duquenne, Pedro Andreo, Susana De Jesus et Johan Morey pour leur aide.

Liste des abréviations

- **CCD** Charge-Coupled **D**evice
- **CERN** Organisation **E**uropéenne pour la **R**echerche **N**ucléaire
- **CLIC** Compact **L**inear **C**ollider
- **CNGS project** **C**ERN **N**eutrino to **G**ran **S**asso **p**roject
- **ESGT** **É**cole **S**upérieure des **G**éomètres et **T**opographes
- **LED** **L**ight-**E**mitting **D**iode
- **LGC** **L**ogiciel **G**énéral de **C**ompensation
- **LHC** **L**arge **H**adron **C**ollider
- **LS1** **L**ong **S**hut-down **1**
- **LSS** **L**ong **S**traight **S**ection
- **PFB** **P**ortable **F**ield **B**ook
- **PS** **P**roton **S**ynchrotron
- **SPS** **S**uper **P**roton **S**ynchrotron
- **SU** **S**urvey
- **TFE** **T**ravail de **F**in d'**É**tudes

Table des matières

Avant-propos	iii
Remerciements	v
Liste des abréviations	vii
Table des matières	ix
Introduction	1
I ÉTAT DE L'ART	3
I.1 LA METROLOGIE DANS LE LHC.....	3
I.1.1 Présentation de l'accélérateur	3
I.1.1.1 Le LHC.....	3
I.1.1.2 Arc et LSS	3
I.1.2 Dispositif de mesure des aimants.....	4
I.1.2.1 Les aimants du LHC.....	4
I.1.2.2 Les fiducielles	4
I.2 L'ALIGNEMENT DES AIMANTS	5
I.2.1 Mesure du Tilt.....	5
I.2.2 Nivellement.....	5
I.2.3 Écartométrie.....	5
I.3 LES MOYENS MATERIELS.....	6
I.3.1 Les niveaux et mires	6
I.3.1.1 Niveau NA2.....	6
I.3.1.2 Niveau DNA03.....	6
I.3.1.3 Niveau DiNi12	7
I.3.1.4 Les mires	7
I.3.2 Les logiciels	8
I.3.2.1 LGC.....	8
I.3.2.2 Les logiciels de communication	8
II NIVELLEMENT AU CERN.....	9
II.1 LES TYPES DE NIVELLEMENT	9
II.1.1 Le nivellement rapide	9
II.1.1.1 Nivellement de lissage.....	9
II.2 LA METHODOLOGIE	10
II.3 L'AJUSTEMENT.....	11
II.4 ÉCARTS-TYPES ET TOLERANCES	11
II.4.1.1 Tolérance sur les fermetures.....	11
II.4.1.2 Écart-type d'une observation.....	12
II.4.1.3 Tolérance sur les contrôles de marche et les séquences "Aller-Retour"	12
II.5 RESULTATS DU NIVELLEMENT RAPIDE.....	13
III COMPARAISON DES SYSTEMES NIVEAUX - MIRES.....	16
III.1 METHODOLOGIE.....	16
III.2 RESULTATS	16
III.3 ANALYSE.....	18
III.3.1 Comparaison de population.....	18
III.3.1.1 Constitution de la base de données.....	18
III.3.1.2 Comparaison des moyennes des sous-populations	19

III.3.1.3	Test d'homoscédasticité des sous-populations	20
III.3.1.4	Conclusion.....	21
III.3.2	Corrélation des ajustements	22
III.3.3	Autres remarques	23
III.3.3.1	L'ajustement.....	23
III.3.3.2	La collimation	23
III.3.4	Conclusion	24
IV	ENSEMBLE DES TESTS.....	25
IV.1	COMPARAISON AVEC LES RESULTATS DE LA JAUGE A TILT.....	25
IV.1.1	Présentation.....	25
IV.1.2	Comparaison des observations	26
IV.1.3	Comparaison des ajustements	27
IV.2	MESURE DES ECARTS-TYPES DES SYSTEMES	29
IV.2.1	Présentation.....	29
IV.2.2	Résultats & analyses	30
IV.2.3	Conclusion	31
IV.3	ÉTUDE DE LA STABILITE DE LA COLLIMATION	32
IV.3.1	Présentation.....	32
IV.3.2	Résultats & analyses	32
IV.3.3	Conclusion	33
IV.4	TESTS DE MESURE LONGUE DUREE	34
IV.4.1	Présentation.....	34
IV.4.2	Logiciel LTL.....	35
IV.4.3	Résultats.....	35
IV.4.3.1	Comparaison entre l'alésage Sortie-Tilt	35
IV.4.3.2	Test de l'influence de la température	36
IV.4.3.3	Test dans un endroit perturbé par la ventilation	39
IV.4.4	Conclusion	41
	Conclusion.....	43
	Bibliographie	45
	Table des annexes.....	47
	Liste des figures.....	67
	Liste des tableaux	68
	Résumé	69

Introduction

“Le nivellement des accélérateurs de particules au CERN” est, à première vue, un sujet qui n’a rien d’original. En effet, déjà plusieurs sujets de TFE (Travail de Fin d’Études) ont été réalisés dans ce domaine et notamment par des étudiants de l’École Supérieure des Géomètres Topographes. En 2005, Thomas Touzé [1]¹ a étudié les niveaux digitaux dont certaines erreurs étaient encore mal connues. De son côté, en 2006, Jérôme Sarret [2] a poursuivi ce travail en se dirigeant vers la maîtrise de ces erreurs. Si ces dernières années, le CERN se pose des questions sur le nivellement, il n’est pas le seul. L’ESRF (European Synchrotron Radiation Facility), centre de recherche basé à Grenoble, n’est pas en reste en la matière. Avec notamment le TFE de Nicolas Malaquin [3], en 2009, dont le sujet était une étude comparative entre le niveau digital DNA03 de Leica et le DiNi12 de Trimble.

Pourtant quoi de plus simple que le nivellement dans le domaine de la topographie ? A priori rien, il suffit de faire des simples soustractions entre les lectures arrière et les lectures avant. Pour le nivellement traditionnel, peut-être mais pour les nivellements de précision ce n’est pas le cas. Dans l’optique de s’assurer d’obtenir un réseau connu au dixième de millimètre, cela passe par la recherche d’une précision de quelques centièmes sur chaque dénivelée.

Le nivellement est un des domaines d’activités pionnier chez les géomètres. Le travail de nivellement, tel qu’il est connu aujourd’hui, est réalisé depuis près de deux siècles avec l’apparition des premières mires graduées ou mires parlantes. De ce fait, les erreurs systématiques des systèmes niveaux optiques – mires sont connues depuis presque aussi longtemps. Dans un souci d’efficacité ont été développés des niveaux digitaux déterminant eux même la valeur de la lecture sur une mire à code-barres. Avec leur arrivée, de nouvelles erreurs systématiques propres aux systèmes niveaux digitaux – mires graduées sont apparues. Ces erreurs sont à l’heure actuelle connues mais pas forcément totalement maîtrisées. Ainsi, les opérateurs, qui doivent toujours veiller aux anciens prérequis, comme l’égalité des portées, sont maintenant tenus à d’autres prérogatives telles que les distances critiques².

Si la maîtrise des appareils est de plus en plus fine, quelques mystères subsistent. Comme l’a dit Albert Einstein, “ La théorie, c’est quand on sait tout et que rien ne fonctionne. La pratique, c’est quand tout fonctionne et que personne ne sait pourquoi. Si la pratique et la théorie sont réunies, rien ne fonctionne et on ne sait pas pourquoi”. Lors d’une campagne test dans le tunnel du LHC, en Juin 2012, une divergence était visible entre les ajustements séparés des alésages situés de part et d’autre des aimants. Une des hypothèses avancées serait le gradient de température dégagé par l’aimant qui perturberait les lectures passant au-dessus de celui-ci. Un autre problème a été rapporté par les opérateurs lors des nivellements dans le tunnel. Il concerne la présence de flamboiement lors des lectures sur mire due à l’intensité de la ventilation.

Voici les raisons qui font que ce nouveau sujet sur le nivellement a toute sa légitimité en tant que TFE. Le “Long shut-down³ 1” (LS1) de dix-huit mois s’est

¹ Les chiffres entre [x] renvoient aux références bibliographiques consultables à la fin de ce document.

² Distance à laquelle le niveau enregistre une perte de précision

³ Shut-down ou Arrêt-machine en français

également révélé être une réelle opportunité de réaliser ce travail. Les périodes de travail dans le tunnel plus importantes qu'à l'accoutumée, vont permettre la réalisation de plusieurs tests dans les conditions réelles du tunnel du LHC.

Ce rapport s'articule autour de quatre parties distinctes. La première est un état de l'art et permet d'expliquer les notions importantes pour une meilleure compréhension de la suite du mémoire. Ensuite, la présentation des nivellements réalisés au CERN a pour objectif de contextualiser le sujet de ce TFE. La troisième partie concerne la comparaison de systèmes niveaux-mires dans les conditions du tunnel du LHC. Cette partie est suivie d'une succession de tests relatifs aux problèmes rencontrés durant les nivellements.

I État de l'art

Cette partie va définir le contexte de l'étude à travers l'accélérateur du LHC et ses composantes ainsi que les outils à la disposition de l'équipe SU (Survey). Cet éclairage permet de mieux comprendre la méthodologie mise en place pour réaliser l'alignement des éléments des accélérateurs. La littérature sur ces sujets est conséquente, le site internet du CERN [4] ou le Projet de Fin d'Études de Mathieu Duquenne [5] en font partie et ont constitué une source d'informations importantes.

I.1 La métrologie dans le LHC

I.1.1 Présentation de l'accélérateur

I.1.1.1 Le LHC

Comme il est évoqué dans l'avant-propos, le LHC est un accélérateur circulaire de 27Km. Cet anneau est subdivisé en huit secteurs délimités de part et d'autre par un puits d'accès. Aux niveaux de quatre de ces puits se trouvent les expériences ATLAS, CMS, ALICE et LHCb, comme il est possible de le voir sur la figure 1.1. Chaque secteur est composé d'un arc et de deux LSS (Long Straight Section) à ses extrémités.

L'accélérateur est composé de pas moins de deux mille éléments froid interconnectés. Ces composants renferment deux tubes à vide permettant la circulation des particules (protons ou ions) et rendent possible la collision au niveau des expériences.

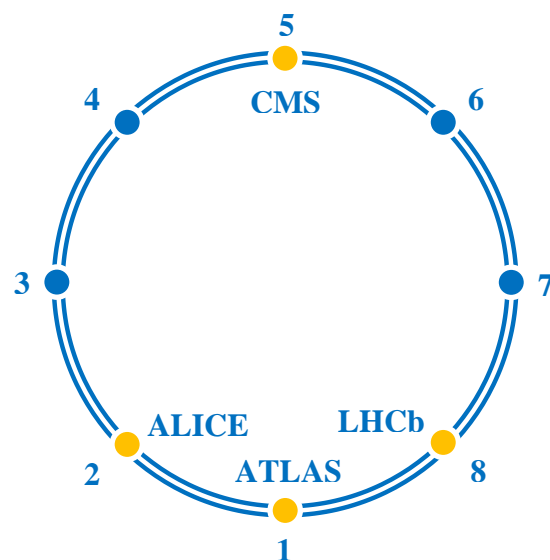


Figure 2 : Schéma du LHC

I.1.1.2 Arc et LSS



Figure 3 : Schéma d'un secteur du LHC

Les arcs font 3km et sont identiques quel que soit le secteur. À ces endroits, l'accélérateur est constitué de séquences d'aimants appelées demi-cellule. Dans l'arc, quarante six demi-cellules comprennent trois dipôles et un quadripôle. Aux extrémités des arcs, quatre demi-cellules, formées de deux dipôles et d'un quadripôle, permettent la transition avec la LSS.

En revanche, les portions de ligne droite LSS, d'une longueur de 350 mètres, sont différentes suivant leurs positions dans le LHC. Les LSS menant aux expériences recensent des éléments permettant la collision des faisceaux dans les chambres à vide. De leur côté, les autres LSS contiennent des éléments servant, par exemple, à nettoyer les faisceaux ou à les accélérer.

I.1.2 Dispositif de mesure des aimants

I.1.2.1 Les aimants du LHC

À l'intérieur du tunnel, il est possible de voir deux types d'aimants principaux, des dipôles ou des quadripôles. Ces aimants, au nombre de 1700, appliquent une force magnétique aux particules afin qu'elles suivent la forme de l'anneau. Les dipôles servent à courber les faisceaux tandis que les quadripôles les focalisent.

Ils sont composés de deux lignes faisceaux entourées par les aimants, le système de refroidissement et des blindages. Lors du fonctionnement de l'accélérateur, les aimants sont refroidis à une température de 1,9K (-271,3°C) à l'aide d'hélium superfluide.

I.1.2.2 Les fiducielles

Lors de l'alignement des aimants, seule la position des lignes faisceaux est importante. Mais une fois l'aimant installé dans le tunnel, il n'est plus possible de les mesurer directement. Ainsi quatre marques fiducielles, "Entrée", "Milieu", "Sortie" et "Tilt"⁴, sont placées sur le haut de l'aimant et permettent de définir l'axe du faisceau. Afin de connaître cette position, avant leur descente dans le tunnel, les aimants font l'objet d'une fiducialisation en métrologie industrielle au laser tracker.

Les fiducielles sont matérialisées par des alésages. Ceux-ci sont composés d'une coupelle, d'une sphère de 70mm et d'un couvercle. La verticalité du dispositif est réglable à l'aide de trois vis. Ce réglage se fait à l'aide d'une bulle sphérique ou d'une bulle torique. Sur ce type d'alésage, il est possible d'y mettre une boule Taylor-Hobson, une mire à queue de centrage, des dispositifs de mesure au fil ou encore une station totale.

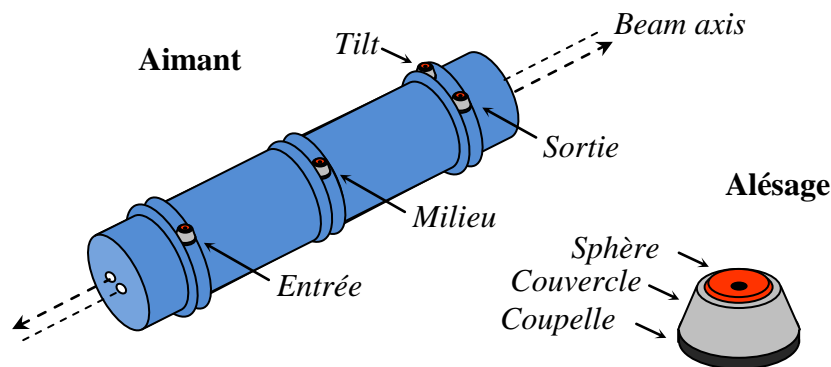


Figure 4 : Schéma des fiducielles

Comme le montre le schéma de la figure 4, l'alésage "Tilt" est généralement situé en face de l'alésage "Sortie". Mais il peut arriver que celui-ci se trouve au niveau de l'alésage "Entrée". Pour des raisons de simplification, sa position sera considérée comme celle évoquée dans la figure 4 dans la suite du mémoire.

⁴ Tilt ou inclinaison transversale en français

I.2 L’alignement des aimants

L’alignement des aimants consiste à garantir leur position radiale, verticale et leur tilt d’abord de manière globale et ensuite les uns par rapport aux autres. Cet alignement relatif est très important pour éviter toutes marches entre eux, celles-ci pourraient perturber la circulation des faisceaux de particules ou provoquer des dommages au niveau des interconnexions.

I.2.1 Mesure du Tilt

Cette mesure se fait à l’aide d’une jauge à tilt, appareil déterminant l’angle formé entre deux points avec le plan horizontal. La mesure est réalisée entre les fiducielles “Sortie” et “Tilt” de l’aimant avec une précision de 0,05mrad. La mesure d’inclinaison des aimants est effectuée deux fois, de “Sortie” vers “Tilt” puis l’inverse. Cette manipulation a pour effet d’annuler une éventuelle erreur instrumentale. La tolérance sur l’écart entre la valeur de tilt mesuré et théorique est de 0,1mrad, au-delà il faut régler l’aimant.

I.2.2 Nivellement

Le nivellement consiste à déterminer l’altimétrie des aimants à l’aide de niveaux optiques ou digitaux. Ce type de travail sera plus détaillé dans la suite de ce TFE.

I.2.3 Écartométrie

L’écartométrie consiste à tendre un fil d’une longueur de 120m et de mesurer la distance des fiducielles à celui-ci. Cette méthode, développée au CERN, permet de contrôler la position radiale des aimants. Afin de gagner en précision, le fil est placé à l’intérieur d’une gaine pour réduire les effets de vibration du fil dus aux courants d’air. Lors des mesures, voir la figure 1.4, les quadripôles sont mesurés trois fois. À titre d’exemple, sur la campagne de mesure réalisée en 2011 dans le secteur 78, la moyenne des résidus était de -0,007mm et l’erreur moyenne quadratique de 0,040mm.

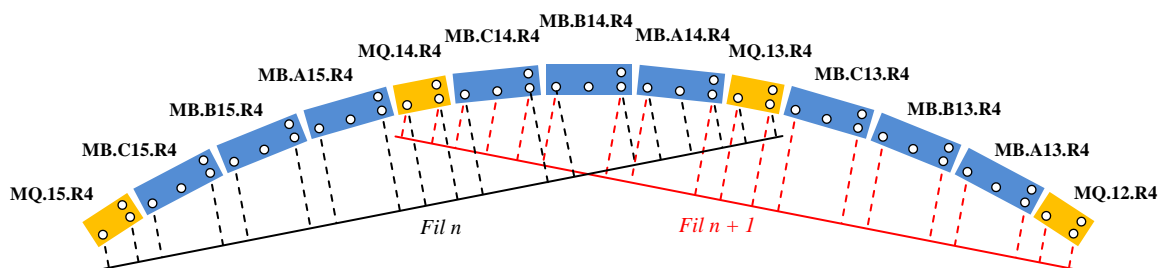


Figure 5 : Représentation de la séquence standard utilisée pour l’écartométrie

I.3 Les moyens matériels

Cette partie recense tous les moyens matériels à disposition pour la réalisation de ce TFE. Bien que la grande majorité de ces moyens proviennent du CERN, certains outils de travail m'ont été prêtés par L'ESGT et l'entreprise Nedo.

I.3.1 Les niveaux et mires

La présentation des différents niveaux utilisés est succincte mais il est possible d'obtenir plus d'information sur les caractéristiques de chacun en annexe. Deux de ces niveaux ont déjà fait l'objet d'études approfondies par Thomas Touzé [1] ou Nicolas Malaquin [3].

I.3.1.1 Niveau NA2

Le niveau NA2 appartient à la gamme Leica dans la catégorie des niveaux optiques. Il est utilisé avec une mire graduée.

Le constructeur [6] indique deux précisions pour cet appareil suivant le mode de mesure choisi pour un cheminement double. En mode "normal", la précision se calcule par $0,7\text{mm} \times \sqrt{km}$ ou $0,3\text{mm} \times \sqrt{km}$ avec l'ajout d'un micromètre plan-parallèle (GPM3).



Figure 6 : Niveau NA2 de Leica

I.3.1.2 Niveau DNA03

Leica Geosystems fabrique également des niveaux digitaux dont fait partie le DNA03. Les mesures sont effectuées en le couplant avec une mire code-barres dont le code binaire est a périodique et pseudo stochastique⁵.

Comme son prédécesseur, dans le cadre d'un cheminement double avec une mire invar, la formule de la précision est $0,3\text{mm} \times \sqrt{km}$. Pour effectuer la lecture, le niveau est muni d'un capteur CCD (Charge-Coupled Device). La longueur d'onde optimale de son capteur se trouve dans le proche infra-rouge, ce qui lui permet, d'après le constructeur [7], de mesurer même dans le noir.



Figure 7 : Niveau DNA03 de Leica

Afin d'obtenir une lecture fine, l'appareil a besoin d'un angle de vue de $1,1^\circ$, soit 29cm de mire à 15m. Il rend possible la prise de mesure à des distances comprises entre

⁵ Déterminé par une fonction mais avec un comportement en apparence aléatoire

1,8 et 60 mètres. Malgré cela, cet intervalle est entaché de distances critiques⁶ dont les principales sont de 26,70 et 13,35 mètres.

I.3.1.3 Niveau DiNi12

Le niveau DiNi12, de la gamme Trimble, est un niveau digital de troisième génération. Cet appareil fonctionne avec une mire code-barres.

Le constructeur indique un écart-type de $0,3\text{mm}\sqrt{km}$ pour un cheminement double avec l'utilisation d'une mire invar. L'appareil contient un capteur CCD dont la longueur optimale est située dans le spectre visible.

Lors des observations, la lecture d'une portion de mire de 30cm suffit à la détermination de la lecture de la hauteur avec une grande précision. L'appareil est capable de réaliser des mesures dans une plage de distances comprises entre 1,5 et 100 mètres. À noter qu'à l'intérieur de cet intervalle, la principale distance critique est aux alentours de 9,93 mètres.



Figure 8 : Niveau DiNi12 de Trimble

I.3.1.4 Les mires

Pour ce TFE, deux mires code-barres ont été prêtées par l'entreprise Nedo. Ces mires possèdent une bande invar sur laquelle est imprimé le code-barres Leica pour l'une et Trimble pour l'autre. Elles ont été réalisées sur mesure pour pouvoir être utilisées dans le tunnel du LHC, ainsi une queue a été ajoutée sous le socle des mires pour pouvoir être insérées dans les alésages (voir ci-contre).

En supplément des mires, Nedo a fourni un dispositif d'éclairage. Il est composé de deux rangés de LED (Light-Emitting Diode) de part et d'autre de la bande invar. Le dispositif est composé de deux types de LED différentes, une sur deux est une LED de longueur d'onde orange et les autres ont une longueur d'onde infrarouge. Ceci permet de répondre à la longueur optimale des capteurs CCD des niveaux DNA03 et DiNi12. Ce dispositif est commercialisé par l'entreprise Nedo [10].

Outre ces deux mires, la section SU a développé des mires à code-barres utilisables avec les niveaux digitaux Leica. Celles-ci possèdent également un dispositif d'éclairage à LED rouge ainsi qu'une queue compatible avec les alésages.

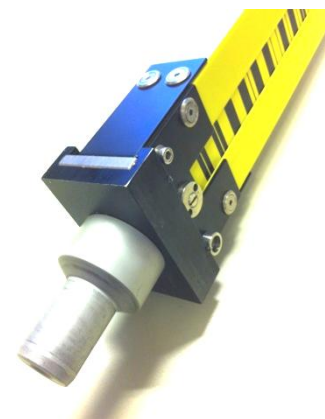


Figure 9 : Mire à queue

⁶ Distance à laquelle les mesures subissent une perte de précision due à la taille des pixels du capteur CCD

I.3.2 Les logiciels

I.3.2.1 LGC

LGC (Logiciel Général de Compensation) est un logiciel d'ajustement de réseau développé au CERN depuis le début des années 80. Un tel logiciel était indispensable pour les équipes de la section SU pour réaliser l'alignement des composants des accélérateurs.

L'ajustement se fait par la méthode des moindres carrés et l'analyse des résultats se fait par une évaluation statistique. Le programme accepte plusieurs types de mesures tels que les mesures de distances, les angles horizontaux et verticaux, les dénivelées ou des mesures d'écartométrie. LGC permet de travailler dans un système local ou dans le système CERN.

I.3.2.2 Les logiciels de communication

Portable Field Book, ou PFB, est un logiciel développé au CERN permettant d'enregistrer les mesures terrain. Ce carnet de terrain électronique peut être rempli de manière automatique, en communiquant avec l'appareil, ou de manière manuelle par l'intermédiaire de l'opérateur. Ce logiciel peut être utilisé pour les trois types de mesures réalisées pour l'alignement des aimants.

- Le module "Nivellement" présente plusieurs caractéristiques intéressantes, notamment le contrôle effectué directement sur le terrain. Durant le cheminement "Retour", le logiciel propose un contrôle des mesures en comparant les séquences "Aller" avec celles "Retour". Cela permet d'avoir une première idée de la qualité du nivellement,
- Le module "Écartométrie" fonctionne de manière semblable au nivellement du point de vue des contrôles,
- Le module "Tilt" présente la particularité de faire la comparaison avec la valeur théorique.

II Nivellement au CERN

II.1 Les types de nivellement

Lors du “Long shut-down 1”, débuté fin février 2013 pour une durée de 18 à 24 mois, deux types de nivellements vont être réalisés par les équipes de la section SU. Au même titre que l'écartométrie et les mesures de Tilt, ces nivellements font partie intégrante du travail d'alignement des éléments des accélérateurs de particules.

II.1.1 Le nivellement rapide

Le nivellement rapide consiste à niveler l'ensemble de l'anneau sur une période courte d'environ un mois. Il va permettre d'effectuer un calcul global de l'accélérateur et ainsi de mettre à jour le réseau altimétrique. Ce réseau servira de base pour le nivellement de lissage. Les mesures sont réalisées avec des niveaux optiques NA2 de Leica.

Lors de ce travail, tous les points de référence présents dans les LSS sont mesurés mais également certains points sur les éléments froids (entre 1,9 et 80K à l'intérieur) et certains éléments chauds (température ambiante). À l'intérieur des arcs, seuls les alésages “Sortie” et “Tilt” des quadripôles et d'un dipôle sur trois sont nivelés. L'égalité des portées est scrupuleusement respectée à une trentaine de centimètres près.

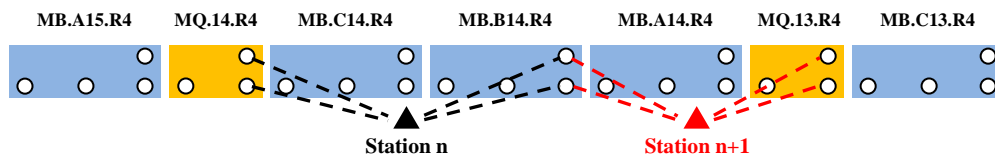


Figure 10 : Représentation de la séquence standard utilisée pour le nivellement rapide du LHC

II.1.1.1 Nivellement de lissage

Le nivellement de lissage se fait secteur par secteur avec pour finalité l'alignement des éléments. Les alignements altimétriques et planimétriques ne peuvent pas être dissociés puisque le réglage de l'un influe sur le réglage de l'autre. Ainsi, successivement, les équipes de la section SU réalisent les mesures de tilt, le nivellement et l'écartométrie.

Dans un premier temps, le nivellement des points de références et des fiducielles “Entrée”, “Milieu” et “Sortie” sera effectué avec des niveaux digitaux DNA03 de Leica. Le calendrier ne permettant pas de réaliser la totalité du nivellement des éléments à froid, seuls les arcs seront mesurés dans ces conditions. Les portions de LSS seront donc nivelées à chaud. Dans ces conditions les éléments subissent les effets de la distorsion par rapport à l'état dans lequel ils sont au moment du fonctionnement de l'accélérateur.

Contrairement au nivellement rapide, celui-ci n'est plus effectué avec le respect des égalités des portées, comme il est possible de le voir sur le schéma suivant. Les variations de distance niveau-mire de 2 à 20 mètres impliquent une bonne connaissance de l'erreur de collimation du niveau. Pour une erreur de détermination de l'ordre de 1'' d'arc, l'erreur sur la dénivelée entre deux points distants de 18 mètres est de 9 centièmes de millimètre.

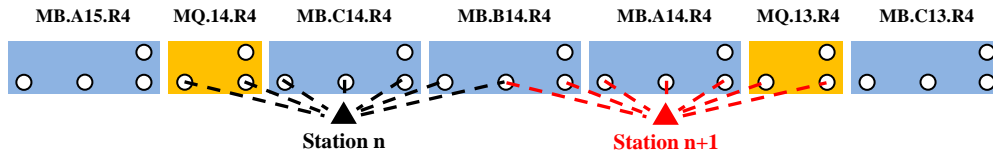


Figure 11 : Représentation de la séquence standard utilisée pour le nivellement de lissage du LHC

Une fois les paramètres de réalignement connus des aimants à régler, les déplacements verticaux et horizontaux sont réalisés à l'aide de vérins. Ensuite, un contrôle est effectué au niveau NA2 et l'écartomètre par rapport à ses plus proches voisins ou les quadripôles pour la planimétrie.

II.2 La méthodologie

Lors des derniers nivellements au CERN, la section SU s'est aperçue que la fermeture au terme des 27km du LHC était de moins en moins bonne, passant de quelques millimètres à une dizaine de millimètres. Pour repartir de l'avant, il faut comprendre quelles en sont les causes. Les premières hypothèses sont le passage des niveaux optiques aux niveaux digitaux et les paramètres météorologiques. Une autre possibilité pourrait être la méthodologie mise en place pour niveler les secteurs. En étudiant celle des anciens nivellements et celle actuelle, deux écoles se confrontent avec leurs avantages et leurs inconvénients.

Chaque secteur est nivelé deux fois, soit un cheminement dit "Aller" et un autre dit "Retour". Depuis quelques années, la section SU réalise le cheminement "Aller" et "Retour" d'une portion de secteur dans la même journée. Cette politique permet d'avoir des conditions similaires entre les deux cheminements et donc d'avoir une meilleure cohérence entre les mesures. Auparavant, le cheminement "Retour" ne débutait qu'une fois l' "Aller" terminé. Les conditions de mesures peuvent être différentes entre les deux cheminements, ce qui garantit une plus grande justesse de la moyenne des deux cheminements. Cette méthodologie a été remise en place pour les nivellements réalisés lors du shut-down en espérant retrouver un écart de fermeture du LHC plus faible.

Lors des nivellements, un contrôle entre les séquences "Aller" et "Retour" est effectué directement sur le terrain grâce au logiciel d'acquisition de données PFB. Ainsi, les stations "Retour" sont comparées aux stations "Aller" homologues. Si l'écart moyen quadratique entre les deux stations est trop important, une troisième station est réalisée pour identifier la station défaillante. En revanche, bien que ces nivellements soient des nivellements dits de Choleski, aucun contrôle de marche n'est effectué.

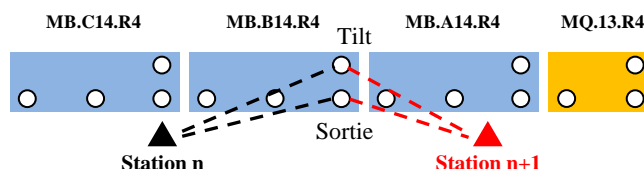


Figure 12 : Schéma du contrôle de marche

Pour le nivellement rapide, les deux stations successives mesurent la dénivelée "Sortie-Tilt". Le contrôle de marche consiste à calculer l'écart des deux dénivelées mesurées entre ces deux points pour la station n et la station n+1. En réalisant ce contrôle

sur des précédents nivellements, certains présentaient des écarts au-delà de deux dixièmes de millimètre. Il est donc paru évident de le mettre en place pour ceux à venir. Manquant de temps à quelques jours du début de la campagne de mesures, ce contrôle n'a pas pu être intégré dans le logiciel PFB. Il est donc effectué au bureau de manière journalière. À terme, ce contrôle sera intégré dans le programme.

Avant le début des nivellements, des consignes de travail ont été données à tous les opérateurs. Notamment la réalisation de la collimation des appareils tous les matins afin de voir l'évolution de cette erreur. Malgré que la collimation soit réalisée tous les jours, le respect de l'égalité des portées reste très important pour pallier une éventuelle erreur de collimation résiduelle. Les conditions atmosphériques dans le tunnel étant différentes de celles à la surface, il est demandé de laisser un temps de mise en température de l'appareil d'une vingtaine de minutes. Lors de la mise en station, le bullage des appareils se fait en l'orientant vers les visées arrière. Cette méthode permet d'avoir une moyenne entre l'“Aller” et le “Retour”. Il a également été demandé de stationner les niveaux proches des aimants.

II.3 L'ajustement

Comme tous les ajustements de nivellement par la méthode des moindres carrés au CERN, ils sont réalisés avec le logiciel LGC. Ces ajustements sont réalisés en “local”.

À la fin du calcul, le logiciel fournit plusieurs types de fichiers mentionnant les résultats et une analyse de l'ajustement avec notamment :

- Un fichier “coordonnée”, avec l'extension .coo, indiquant les coordonnées ajustées pour chacun des points.
- Un fichier “résultat”, avec l'extension .res, renseignant sur la validation globale par l'intermédiaire d'un test statistique, sur l'écart au théorique des coordonnées ajustées ainsi que sur les résidus sur chacune des observations.
- Un fichier “erreur”, avec l'extension .err, informant sur la validation individuelle des observations à l'aide de test statistique.

II.4 Écarts-types et tolérances

II.4.1.1 Tolérance sur les fermetures

Chacun des secteurs est mesuré indépendamment et sur une période assez courte. Ainsi les tolérances de fermetures sont calculées pour un secteur et non pour l'anneau complet.

Quelques soient les niveaux utilisés au CERN, niveau NA2 ou DNA03, la formule de la précision donné par le constructeur est $0,3\text{mm} \times \sqrt{\text{km}}$ pour un cheminement double. Malgré cela, la section SU a décidé de rester sur une précision calculée par $0,4\text{mm} \times \sqrt{\text{km}}$. Cette valeur correspond à la précision du niveau optique N3 de Leica, niveau utilisé avant l'arrivée du NA2.

La tolérance est fixée à trois sigmas, où sigma est la précision calculée. En général, la tolérance 2,58 sigmas ce qui correspond à un risque de 1% pour une loi normale.

Ainsi en considérant la taille d'un secteur à 3,3km, soit 6,6km "Aller-Retour", la tolérance de fermeture "Aller-Retour" est de 3,1mm. Pour l'ensemble du LHC, le cheminement fermé est de 27km dont 24,2 sont en cheminement quadruple et 2,8 en cheminement double, la tolérance de fermeture passe alors à 5,3mm.

II.4.1.2 Écart-type d'une observation

Lors d'un ajustement par la méthode des moindres carrés, il faut indiquer l'écart-type a priori sur chaque observation. Le calcul ne se faisant que sur des observations de niveaux appartenant à la même gamme de précision, seule la distance niveau mire fait varier l'écart-type pour chaque observation. Mais pour des raisons de simplification de calcul, cette valeur est unique quelle que soit la distance. À noter que l'écart-type choisi n'a pas d'influence sur le résultat, par contre il intervient dans la validation globale et les validations individuelles des observations.

Par défaut, l'écart-type affecté aux observations de nivellement est de 0,1mm. Il est simple de vérifier cette valeur sachant que, dans la grande majorité des mesures, les distances niveau-mire se trouvent entre dix et quinze mètres. Pour une équation de la précision de $0,4\text{mm} \times \sqrt{\text{km}}$ pour un cheminement double, valeur de référence pour les nivellements, l'écart-type d'une observation est de 6-7 centièmes de millimètre. En utilisant celui annoncé par le constructeur, il est plutôt aux alentours de 4-5 centièmes. L'écart-type choisi est donc deux fois supérieur à celui indiqué par le constructeur et cela pourrait poser problème lors de l'ajustement.

II.4.1.3 Tolérance sur les contrôles de marche et les séquences "Aller-Retour"

Pour le contrôle de marche, le choix de la tolérance a été fait de manière arbitraire avec une valeur de 0,15mm. Celle-ci a été prise en fonction des résultats observés sur les précédents nivellements. La tolérance sur une dénivelée, et cela d'après les valeurs données par le constructeur, pour les distances évoquées précédemment et une tolérance à 2,58 sigmas, se situe entre 0,11 et 0,13mm.

Concernant le contrôle des séquences "Aller-Retour", l'écart moyen quadratique entre la station "Aller" et la station "Retour" ne doit pas dépasser les 8 centièmes de millimètre. Il est difficile de connaître la fiabilité de ce paramètre puisque celui-ci dépend du nombre de mesures effectuées par station. En effet, plus le nombre de mesures par station est important et plus la présence d'une faute est difficile à détecter. Le nombre de lectures par station pour le nivellement rapide est de quatre. En revanche, pour le nivellement de lissage, il est de sept.

II.5 Résultats du nivellement rapide

Pour chaque secteur, les LSS et les arcs étant nivelés séparément, l’ajustement est effectué individuellement dans un premier temps. Cela permet d’avoir un début d’analyse quant à la qualité de chacun. Ci-dessous sont recensées les écarts de fermetures au théorique et celle “Aller-Retour”. Les valeurs théoriques sont des altitudes calculées par les physiciens avant la mise en place des aimants dans le tunnel du LHC. Celles-ci ne sont pas forcément justes mais servent à titre indicatif.

Fermeture	LSS 1	LSS 2	LSS 3	LSS 4	LSS 5	LSS 6	LSS 7	LSS 8
Au théorique	1,57	-0,46	0,66	-0,23	-1,83	0,32	-0,31	0,54
“Aller-Retour”	0,04	0,23	0,39	0,05	0,12	0,09	0,34	0,29

Fermeture	Arc 1-2	Arc 2-3	Arc 3-4	Arc 4-5	Arc 5-6	Arc 6-7	Arc 7-8	Arc 8-1
Au théorique	4,84	-3,99	1,39	0,01	-0,84	0,35	0,68	-0,24
“Aller-Retour”	1,12	6,80	1,62	3,92	0,74	0,05	0,53	5,63

Tableau 1 : Tableau des fermetures des nivellements par LSS et Arc exprimées en millimètre

Lors de la présentation des tolérances utilisées, la tolérance de fermeture “Aller-Retour” de 3,1mm était calculée pour un secteur. Ici, les LSS et les arcs sont séparés et leurs tolérances de fermeture “Aller-Retour” sont respectivement de 0,70mm et 2,20mm. Ainsi, au vu de ces résultats, aucun nivellement des LSS ne sort de la tolérance. En revanche trois fermetures des huit nivellements des arcs sont hors tolérance. Il existe même quasiment un facteur trois entre la fermeture et la tolérance pour deux de ces secteurs. Lors du nivellement du secteur 8-1, des signes avant-coureurs faisaient état de cette mauvaise fermeture avec des contrôles de séquence “Aller-Retour” très souvent hors tolérance. Une des raisons avancées est la chute des températures ressenties par les opérateurs entre les deux cheminements.

Une fois tous les secteurs nivelés, l’ajustement de l’ensemble de l’anneau peut être réalisé. Pour connaître les fermetures et donc éviter la compensation de celles-ci durant le calcul, le nom des points d’arrivée sont différenciés des points de départ. La fermeture du nivellement est de 1,72mm, soit inférieure à celle espérée par la tolérance. Le graphique suivant présente l’évolution de l’écart au théorique résultant des ajustements issus des cheminements “Aller-Retour”, “Aller” et “Retour”.

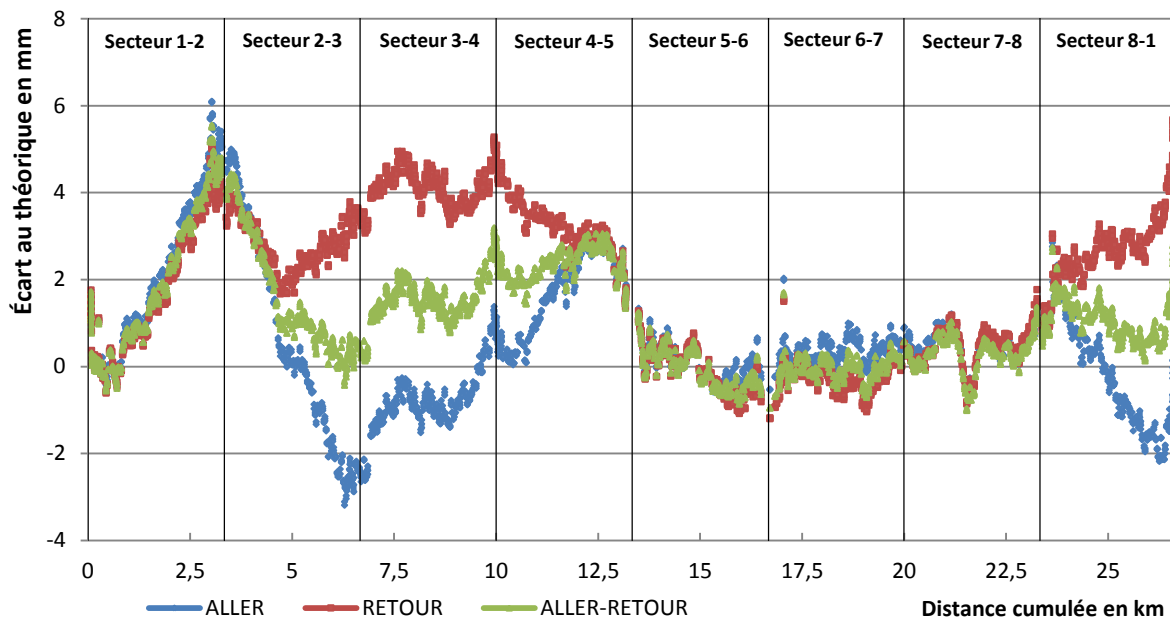


Figure 13 : Écart au théorique de l'ajustement de l'ensemble du LHC

Ce graphique, plus détaillé en annexe, confirme les résultats du tableau concernant les divergences pour les arcs 2-3, 4-5 et 8-1. Le plus grand des hasards fait que les arcs 3-4 et 4-5 compensent l'écart créé par le secteur 2-3. Compte tenu de ces résultats et du temps restreint pour effectuer des reprises, il a été décidé de refaire les deux arcs présentant les plus grandes fermetures "Aller-Retour", soit les arcs 2-3 et 8-1. Le tableau suivant répertorie les nouvelles fermetures pour ces deux arcs et les compare aux précédentes.

Secteur	Fermeture au théorique	Différence avec la précédente	Fermeture "Aller-Retour"	Différence avec la précédente
2-3	-1,26	+2,73	3,25	-3,55
8-1	-0,08	+0,16	1,14	-4,49

Tableau 2 : Tableau des fermetures après reprise des secteurs 2-3 et 8-1 exprimées en millimètre

Les fermetures "Aller-Retour" ont diminué toutes les deux significativement, mais seule celle du secteur 8-1 est maintenant dans la tolérance. Concernant l'écart au théorique finale, il est sensiblement le même entre les deux nivellements de l'arc 8-1 contrairement à ceux de l'arc 2-3. Bien que la fermeture "Aller-Retour" ait considérablement baissé, les altitudes résultantes de l'ajustement de l'arc 8-1 n'ont presque pas changé. En effet la variation moyenne est de 0,1mm avec un écart-type de 0,3mm. Au contraire, comme il pouvait être prévisible au vu de la différence de fermeture au théorique pour l'arc 2-3, la variation des altitudes est plus importante avec une moyenne de -1,6mm et un écart-type de 1,1mm. Il est donc possible de se satisfaire du nivellement de l'arc 8-1 compte-tenu de la répétitivité des résultats. En revanche, pour l'arc 2-3, il faut faire confiance à la fermeture "Aller-Retour" plus faible de la reprise pour considérer le deuxième nivellement comme le plus juste des deux.

En réalisant de nouveau un ajustement de tout l’anneau, la fermeture passe de 1,72mm à 4,81mm. Celui-ci est validé puisque les fermetures individuelles des arcs sont meilleures et que l’emploi du temps du LHC ne permet plus de retourner niveler les deux arcs hors tolérance. Le graphique de l’évolution des écarts au théorique est quelque peu modifié suite à l’intégration des deux reprises, voir ci-dessous.

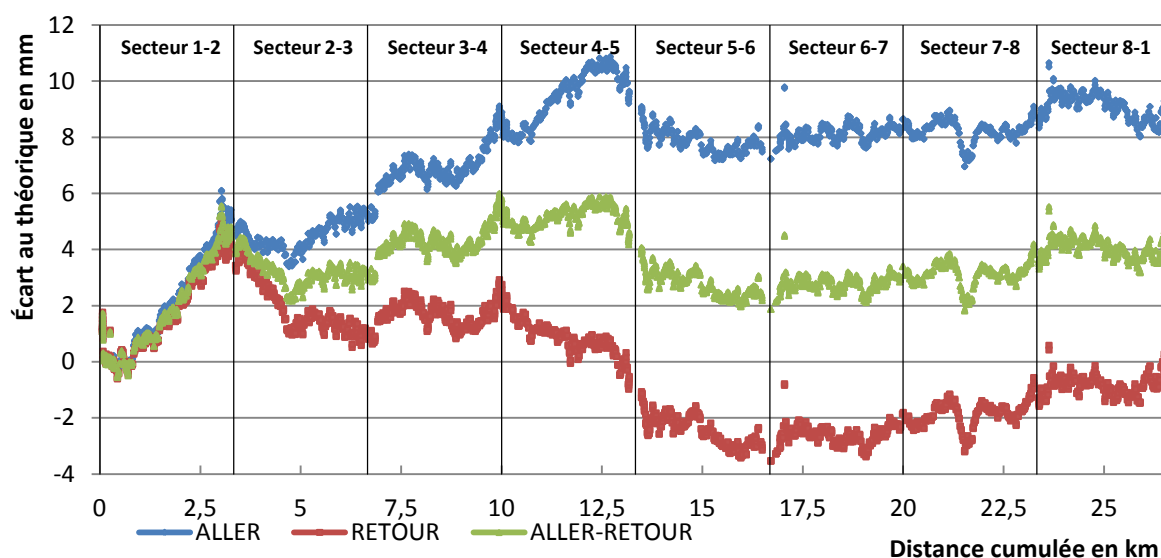


Figure 14 : Écart au théorique de l’ajustement avec les reprises de l’ensemble du LHC

Le graphique, également plus détaillé en annexe, montre une divergence croissante entre les courbes “Aller” et “Retour” sur les secteurs 2-3, 3-4 et 4-5. Pour les quatre secteurs suivants, la variation n’est que de plus ou moins 1mm.

Maintenant que chaque LSS et arc aient été validés, il faut passer à l’ajustement compensé de l’anneau. Pour cela, le nom des points d’arrivée sont les mêmes que ceux de départ. Ainsi la fermeture est nulle et les altitudes obtenues, quelque peu translatées pour “caler” le réseau, sont les altitudes définitives.

III Comparaison des systèmes niveaux - mires

III.1 Méthodologie

De nombreux travaux ont été réalisés au CERN [1] [2] et à ESRF [3] sur la comparaison entre des niveaux optiques et digitaux venant de marques différentes. Afin de connaître leurs précisions, des tests ont été réalisés en laboratoire. Mais pour connaître leurs réactions dans les conditions réelles du terrain, il faut les tester dans le tunnel du LHC.

Pour cela, quatre nivellements ont été effectués dans l'arc du secteur 3-4, soit 2,8km de tunnel, avec la même méthodologie que celle utilisée pour le nivellement rapide. Les quatre systèmes niveau-mire utilisés sont les suivants :

- un niveau optique NA2 de Leica associé à une mire invar graduée
- un niveau digital DNA03 de Leica associé à une mire invar code-barres et éclairage développés au CERN
- un niveau digital DNA03 de Leica associé à une mire invar code-barres et éclairage développés par Nedo
- un niveau digital DiNi12 de Trimble associé à une mire invar code-barres et éclairage développés par Nedo

III.2 Résultats

Cette partie recense les résultats issus de l'ajustement avec le logiciel LGC. Le graphique ci-dessous, représentant les écarts altimétriques entre les altitudes ajustées et les altitudes théoriques, donne une première idée des variations observées entre les systèmes niveaux-mires. Les altitudes théoriques correspondent aux altitudes déterminées avant la construction du LHC.

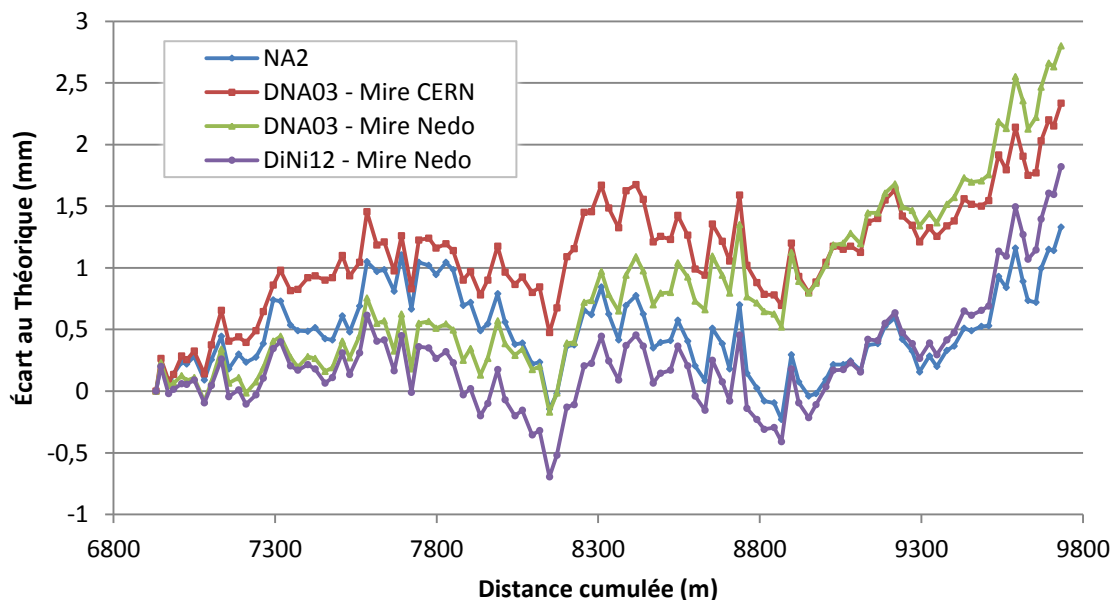


Figure 15 : Comparaison des nivellements réalisés sur le secteur 3-4

Ce graphique permet de constater que les formes des courbes sont relativement semblables. Aucune marche entre elles n'est visible. Concernant les écarts entre les

courbes, ils varient au fil des hectomètres. Le pic maximal est de l'ordre de 1,5mm en fin de secteur entre les courbes des couples du NA2-mire graduée et de celui du DNA03-mire Nedo. Avec 218 stations pour réaliser l' "Aller-Retour", cela correspond à un écart moyen inférieur au centième de millimètre. À noter que l'important dans ce type de travail est d'avoir une bonne précision relative, c'est-à-dire en dessous du dixième de millimètre sur des portions d'une centaine de mètres. En effet, si l'évolution de l'écart entre les courbes est progressive, et non sporadique, alors celui-ci aura une plus faible influence sur la finalité du travail qu'est l'alignement des aimants.

Afin d'affiner un peu plus ces observations, il faut se référer aux chiffres. Le tableau ci-dessous recense des indicateurs simples de précision propres aux nivellements, c'est à dire les fermetures et les contrôles de marche. La fermeture "Aller-Retour" correspond à l'écart final entre l'ajustement des mesures "Aller" et celui des mesures "Retour".

<i>Systèmes niveaux-mires</i>				
Niveau Mire	NA2 Graduée	DNA03 Code-barres CERN	DNA03 Code-barres Nedo	DiNi12 Code-barres Nedo
<i>Fermetures</i>				
"Aller-Retour"	1,54 mm	0,48 mm	1,32 mm	1,60 mm
Au théorique	1,27 mm	2,31 mm	2,74 mm	1,77 mm
<i>Contrôles de marche (4 mesures)</i>				
Moyenne	0,03 mm	0,02 mm	0,02 mm	0,02 mm
Écart-type	0,02 mm	0,01 mm	0,01 mm	0,01 mm
Contrôle hors-tolérance	4	1	1	1

Tableau 3 : Tableau des premiers indicateurs de précision

Au vu des résultats, il faut noter que la fermeture "Aller-Retour" du couple DNA03-mire CERN est plus faible que les autres, de l'ordre de 0,5mm contre 1,5mm. Malgré cela, toutes ces fermetures rentrent bien dans la tolérance de 2,2mm (voir formule dans la partie II.4). Concernant l'écart au théorique final, elle correspond à ce qui a été vu sur le graphique précédent avec un écart maximal de 1,5mm.

Les contrôles de marche permettent d'avoir un début d'indication vis-à-vis des précisions des systèmes niveaux-mires et plus particulièrement sur la répétitivité des mesures. La moyenne et l'écart-type des contrôles de marche sont légèrement plus élevés pour le couple NA2-mire graduée. Ceci est corroboré par un nombre de contrôles hors tolérance également plus grand.

III.3 Analyse

Comme expliqué précédemment, des différences sont visibles entre les ajustements réalisés à partir des quatre systèmes niveaux-mires. Pour autant, il est difficile, voire impossible, au vu du graphique et du tableau de dire si ces différences sont significatives ou si un système est meilleur que les autres. Cette partie va essayer de répondre à ces questions à l'aide de tests statistiques.

L'analyse statistique est un moyen efficace d'obtenir une analyse objective et quantifiée sur les données issues des quatre couples. Ainsi deux analyses sont effectuées, la première concerne l'homogénéité globale des données avec une comparaison de population, la seconde porte sur la cohérence des ajustements deux à deux grâce au coefficient de corrélation.

III.3.1 Comparaison de population

La comparaison de population permet de savoir si des sous-populations, ici au nombre de quatre, sont susceptibles d'appartenir à la même population. Dans le cas où l'hypothèse est vérifiée, il serait possible de mélanger les mesures issues des quatre nivellements sans voir de différence notable. Pour cela deux tests statistiques sont nécessaires comme l'explique R. Rakotomalala [10], professeur à l'Université Lumière Lyon 2. Un test concerne la comparaison des moyennes et l'autre l'homoscédasticité⁷.

III.3.1.1 Constitution de la base de données

Les tests qui suivent étant des tests paramétriques, préalablement à leurs réalisations, il est nécessaire de normaliser la distribution des données. En effet, la base de données est créée à partir des mesures de dénivelées mesurées. Celles-ci étant de valeurs différentes tout au long du secteur, elles vont être centrées.

Pour cela, quatre dénivelées sont calculées pour chaque station, c'est-à-dire une entre les alésages "Sortie"- "Sortie" (S-S), une autre entre ceux "Tilt"- "Tilt" (T-T) et deux dénivelées "Sortie"- "Tilt" (S-T). Les dénivelées sont ensuite classées et moyennées par système avec leur(s) homologue(s). Ainsi pour chacune des dénivelées de l'arc, il est possible d'obtenir l'écart à la moyenne des dénivelées mesurées par les quatre systèmes.

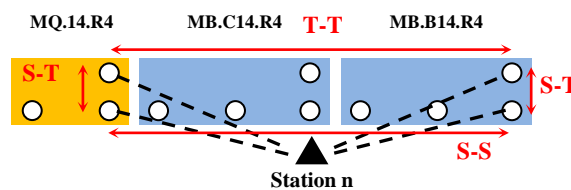


Figure 16 : Schéma des dénivelées utilisées dans la comparaison des systèmes

Le tableau suivant présente une première indication sur les valeurs testées durant ce test, soit les moyennes et écarts-types de chaque couple niveau-mire.

⁷ Égalité des variances

<i>Système</i>				
Niveau	NA2	DNA03	DNA03	DiNi12
Mire	Gradué	Code-barres CERN	Code-barres Nedo	Code-barres Nedo
<i>Statistique</i>				
Moyenne	0,004 mm	-0,002 mm	-0,002 mm	0,000 mm
Écart-type	0,032 mm	0,028 mm	0,024 mm	0,021 mm

Tableau 4 : Tableau statistique après centrage des données

À première vue, les moyennes et les écarts-types paraissent uniformes. Pour vérifier cela, il faut passer à une étude statistique plus précise.

III.3.1.2 Comparaison des moyennes des sous-populations

Cette comparaison est effectuée par l'intermédiaire du test d'ANOVA (ANalyse Of VAriance), qui sert à la comparaison de plusieurs moyennes simultanément. L'origine de ce nom provient du fait qu'il utilise la décomposition de variances pour réaliser l'analyse.

Le principal avantage de ce test est sa robustesse par rapport aux hypothèses de distribution normale et d'homoscédasticité des sous-groupes. En effet, une simple comparaison graphique, de type boîte à moustache ou histogramme de fréquences, permet de conclure à l'homogénéité des sous populations. De plus, si le quotient entre la variance maximale et minimale ne dépasse pas un facteur 4, alors il est tout à fait possible de s'affranchir d'un test d'homoscédasticité.

Dans un premier temps, il faut passer par la vérification des paramètres nécessaires à la bonne utilisation de ce test. L'analyse graphique, ci-dessous, est réalisée à partir de boîtes à moustache.

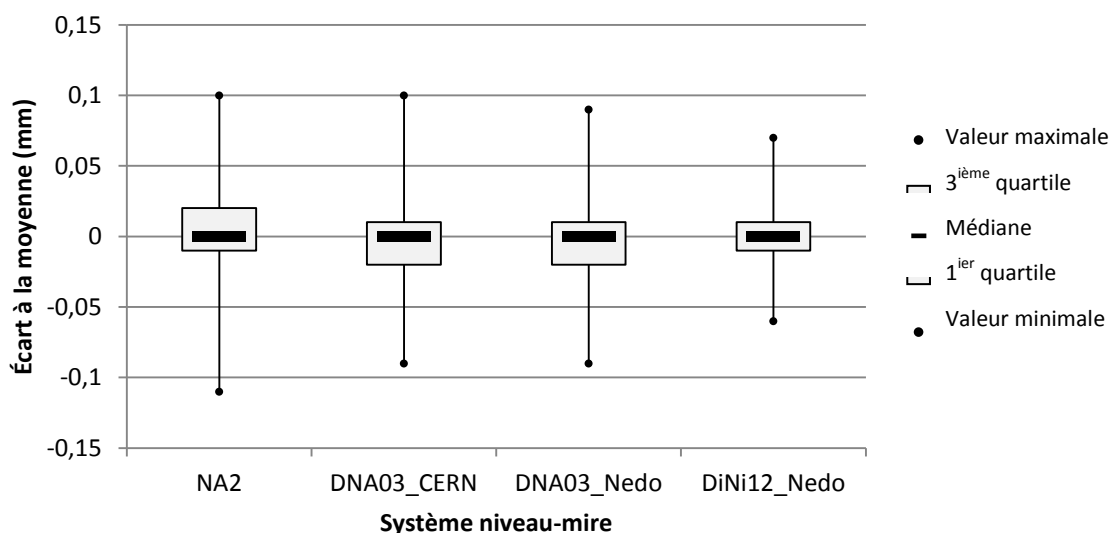


Figure 17 : Comparaison de répartition à l'aide de boîtes à moustache

Avec ce graphique, il est possible de conclure que les boîtes à moustache des sous-groupes sont semblables. En effet, leurs médianes sont égales, les 1^{ers} et 3^{èmes} quartiles ne

différent que d'un à deux centièmes de millimètre et les valeurs minimales et maximales de quelques centièmes de millimètre.

Concernant le quotient entre la variance maximale, celle du couple niveau NA2-mire graduée, et la valeur minimale, celle du système DiNi12-mire Nedo, il est de 2,62. Ainsi l'acceptation de ces deux paramètres autorise l'utilisation du test d'ANOVA.

La méthodologie complète du test est expliquée en annexe. En résumé, ce test permet de valider l'hypothèse nulle, toutes les moyennes sont égales, ou de la rejeter, c'est-à-dire qu'au moins deux moyennes ne le sont pas. La statistique calculée étant un rapport de variances, elle répond à une loi de Fischer. Dans le cas présent, le seuil de signification du test α est choisi à 0,05. Les résultats sont présentés dans le tableau d'analyse de la variance ci-dessous.

Source	Somme des carrés	Degré de liberté	Carrés Moyens	F
Expliquée	$2,00 \cdot 10^{-14}$	3	$6,67 \cdot 10^{-15}$	0,01
Résiduelle	$7,02 \cdot 10^{-10}$	1296	$5,41 \cdot 10^{-13}$	-
Total	$7,02 \cdot 10^{-10}$	1299	-	-

Tableau 5 : Tableau d'analyse de la variance

Pour pouvoir accepter l'hypothèse nulle, la statistique F du test d'ANOVA doit être en dehors de la région critique. La statistique doit donc être inférieure à la valeur lue dans la table de Fischer avec 3 et 1297 degrés de liberté, soit 2,61. La condition étant remplie, l'hypothèse nulle est validée et les moyennes peuvent être considérées égales.

III.3.1.3 Test d'homoscédasticité des sous-populations

Afin de tester l'hypothèse d'égalité des variances, le test de Levene est choisi. Bien que la littérature recense de nombreux tests pour effectuer cette vérification, il semble le plus robuste par rapport à l'hypothèse de distribution normale. La méthodologie mise en place est détaillée en annexe. À noter que, comme pour le précédent test et pour les mêmes raisons, la statistique du test W suit une loi de Fischer. Le risque α est également choisi à 0,05. La statistique W est de 11,73.

Le seuil à ne pas dépasser se lit dans la table de la loi de Fischer avec 3 et 1297 degrés de liberté pour le risque α . Celui-ci étant de 2,61, l'hypothèse nulle est rejetée et donc au moins deux variances ne sont pas égales.

Pour savoir quelle(s) variance(s) ne rentre(nt) pas dans la population, il faut passer par un test de Fischer. Celui-ci permet d'indiquer si deux variances sont égales ou non. En le réalisant pour chaque couple de variances, le ou les couples de variances non égaux sont identifiés. Le test, bien que très répandu, n'est pas très robuste surtout pour des distributions non gaussiennes. Les résultats sont simplement indicatifs et ne doivent pas être pris pour argent comptant. Comme les précédents tests, sa méthodologie est présentée en annexe. La statistique F est un rapport de variances. De même pour ce qui concerne le risque α qui a une valeur de 0,05. L'intervalle d'acceptation est déterminé à partir de la table de la loi de Fischer pour 324 et 324 degrés de liberté, soit un intervalle compris entre 0,76 et 1,30. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant

Numérateur Dénominateur	NA2_graduée	DNA03_CER N	DNA03_Nedo	DiNi12_Nedo
NA2_graduée		0,7504	0,5798	0,4117
DNA03_CERN	1,3326		0,7727	0,5487
DNA03_Nedo	1,7246	1,2942		0,7101
DiNi12_Nedo	2,4288	1,8226	1,4083	

Tableau 6 : Tableau des statistiques du test de Fischer

Les résultats montrent que seul le couple de variances des deux DNA03 rentre dans l'intervalle de confiance du test. Logiquement, le couple le plus éloigné est celui entre le NA2 et le DiNi12 sachant que ce sont respectivement la variance maximale et minimale. Bien que tous les tests de ces systèmes niveaux-mires ne soient pas acceptés, ce sont les tests du couple DiNi12-mire Nedo qui en sont généralement les plus éloignés.

Pour réaliser de nouveau le test de Levene en enlevant cette fois ci la sous-population du DiNi12 avec la mire Nedo, les écarts à la moyenne des trois sous-groupes restants ne sont plus calculés par rapport à la moyenne des quatre sous-populations mais seulement des trois restantes. Ainsi les moyennes et les écarts-types de ces nouveaux écarts à la moyenne sont présentés dans le tableau ci-dessous.

<i>Systèmes niveaux-mires</i>			
Niveau Mire	NA2 Graduée	DNA03 Code-barres CERN	DNA03 Code-barres Nedo
<i>Statistiques</i>			
Moyenne	0.004 mm	-0.002 mm	-0.002 mm
Écart-type	0.030 mm	0.026 mm	0.027 mm

Tableau 7 : Tableau statistique après centrage des données sans le système DiNi12-mire

La statistique du test de Levene passe à 2,50. Pour un risque α toujours de 0,05 et une probabilité de Fischer à 2 et 973 degrés de liberté, le seuil critique est maintenant de 3,00. Ainsi l'hypothèse nulle est acceptée et les variances des sous-groupes du NA2 et des deux DNA03 sont donc considérées égales. Dans le but de vérifier si seule la variance du DiNi12 est en cause, le même test est réalisé cette fois ci sans le couple NA2-mire graduée. La statistique W passe à 15,35 pour un seuil de 3,00. L'hypothèse nulle est de nouveau rejetée. La sous-population du DiNi12 est donc bien la seule raison de l'échec du premier test de Levene.

III.3.1.4 Conclusion

Si le test sur l'égalité des moyennes est accepté, ce n'est pas le cas pour le test d'homoscédasticité. En effet, il semblerait que la variance du sous-groupe du DiNi12 soit trop faible pour être considérée égale à celle de la population. Même si le test d'ANOVA n'a pas été développé après l'éviction du sous-groupe du DiNi12 qui a engendré des modifications, il garde une valeur comparable et reste donc dans l'intervalle d'acceptation. Ainsi, d'après les tests statistiques, seuls les sous-populations du NA2 et des deux DNA03 appartiennent à la même population.

L'analyse de ces résultats ne doit peut-être pas être aussi affirmative que ce le test laisse paraître. L'écart-type trop faible de la sous-population n'est pas très éloigné de celle des DNA03 d'après le tableau 4.

III.3.2 Corrélation des ajustements

Le coefficient de corrélation permet de caractériser la relation linéaire entre deux variables. Il peut être calculé à partir de plusieurs méthodes, formule de Bravais-Pearson ou formule empirique, tel que le mentionne le cours de R. Rakotomalala [11]. Le coefficient correspond à une mesure symétrique qui peut être positive ou négative. Plus la valeur absolue du coefficient est proche de un, plus la relation entre les deux variables est forte. À l'inverse, plus cette valeur est proche de zéro et moins la similitude est prononcée.

Il est choisi d'utiliser le coefficient de corrélation empirique pour effectuer l'analyse. Contrairement au test statistique précédent, où les données étaient analysées sans tenir compte de leurs positions dans le cheminement, celle-ci analyse l'évolution des altitudes ajustées. La corrélation entre la variable X et Y s'obtient à partir de la formule suivante :

$$\hat{r} = \frac{\sum x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sqrt{\sum x_i^2 - n \bar{x}^2} \times \sqrt{\sum y_i^2 - n \bar{y}^2}}$$

Où n est la taille de l'échantillon de la variable X ou Y, x_i et \bar{x} sont respectivement la $i^{\text{ième}}$ valeur et la moyenne de la variable X, y_i et \bar{y} sont eux respectivement la $i^{\text{ième}}$ valeur et la moyenne de la variable Y.

Le coefficient de corrélation empirique est calculé entre chacun des systèmes niveaux-mires et les résultats sont recensés dans le tableau ci-dessous :

Coefficient	NA2_Graduée	DNA03_CERN	DNA03_Nedo	DiNi12_Nedo
NA2_Graduée		0,6584	0,4149	0,7396
DNA03_CERN	0,6584		0,8742	0,8064
DNA03_Nedo	0,4149	0,8742		0,8485
DiNi12_Nedo	0,7396	0,8064	0,8485	

Tableau 8 : Tableau des coefficients de corrélation

La corrélation entre les nivellements montre qu'ils ont une relation forte avec des valeurs de l'ordre de 80-87%. Seuls ceux avec le couple NA2-mire graduée présentent des valeurs inférieures dont une à 41,5%. En moyenne, le système ayant la corrélation la plus forte avec les autres, de l'ordre de 80%, est celui du DiNi12-mire Nedo. Viennent après le couple DNA03-mire CERN puis celui du DNA03-mire Nedo.

Ainsi, les couples niveaux digitaux-mires ont des coefficients de corrélation relativement élevés, même si graphiquement les résultats des ajustements ne semblent pas identiques. La relation étant forte, les résultats peuvent être considérés très proches sur des portions d'une centaine de mètres, et cela sur l'ensemble de l'arc. En comparant ces résultats à ceux du test précédent, il semblerait que ce ne soit plus le DiNi12 mais plutôt le NA2 qui diverge par rapport à ces concurrents. Le fait d'analyser une évolution à la place d'une population est probablement plus efficace.

III.3.3 Autres remarques

Lors des différents nivellements et leur ajustement, deux questions se sont posées sur l'écart-type des systèmes et la stabilité de la collimation. Cette partie explique l'origine de ces deux observations.

III.3.3.1 L'ajustement

Avec la pondération affectée sur les observations de dénivelées, un dixième de millimètre, aucun des quatre nivellements n'a réussi à passer le test de validation globale (χ^2) directement. En effet, les valeurs estimées des facteurs unitaires de variance étaient tous très largement en dessous de l'intervalle d'acceptation pour un seuil de 95%. Ceci signifie que l'écart-type estimé sur les observations a été sous-estimé. Les valeurs de repondération nécessaire pour le passage avec succès du test sont présentées dans le tableau suivant.

<i>Système</i>				
Niveau	NA2	DNA03	DNA03	DiNi12
Mire	Gradué	Code-barres CERN	Code-barres Nedo	Code-barres Nedo
<i>Écart-type sur les observations</i>				
A posteriori	0,029 mm	0,023 mm	0,017 mm	0,018 mm

Tableau 9 : Tableau des écarts-types a posteriori

En comparant ces valeurs à celles prises par défaut, elles sont trois à cinq fois inférieures. Cette remarque pouvait être anticipée lors de la présentation des différents écarts-types utilisés dans la partie précédente. La valeur par défaut était déjà deux fois supérieure à celle obtenue à partir des écarts-types constructeurs. En revanche, ceux provenant de l'ajustement sont également inférieurs, et assez significativement, aux écarts-types issus des informations des fabricants. L'explication réside probablement dans le fait que les conditions atmosphériques à l'intérieur du tunnel sont plus stables que celles rencontrées en extérieur, pour lesquelles ces niveaux ont aussi été conçus. Cette hypothèse a été testée et est présenté dans le chapitre IV.2.

III.3.3.2 La collimation

Le contrôle du défaut d'horizontalité de l'axe de visée des niveaux est effectué chaque jour. Pour le nivellement rapide, cette correction a moins d'importance puisque le respect de l'égalité des portées permet de s'en affranchir.

Les niveaux digitaux ont fait l'objet d'un contrôle en début de journée et en fin de journée afin d'avoir une idée de l'évolution de la correction. Cette mesure a été réalisée à l'aide d'un programme interne au niveau en utilisant la méthode de Förstner, détaillée dans les manuels d'utilisation des niveaux digitaux [7] [8]. Le graphique suivant présente l'écart entre la mesure en fin et celle en début de journée.

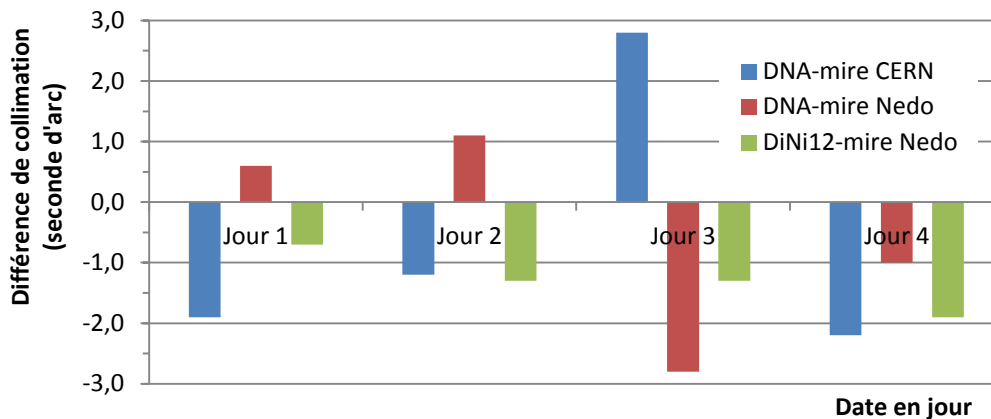


Figure 18 : Écart des valeurs de collimation entre le début et la fin de journée

Les écarts entre les deux déterminations sont compris dans un intervalle allant de 0,5 à quasiment 3 secondes d'arc. Les variations paraissent plus grandes sur les mesures réalisées au DNA03. Ces incertitudes provoquent des erreurs de 5 à 30 centièmes de millimètre à 20 mètres. Ces valeurs sont importantes compte tenu de la précision souhaitée sur ce type de nivellement. L'évolution de cette valeur peut être due à l'instabilité de la collimation de l'appareil ou à l'imprécision de la mesure.

III.3.4 Conclusion

En résumé, la première analyse statistique montre que seul le système DiNi12-mire Nedo ne rentre pas dans la même population que les trois autres. La cause de son rejet est un écart-type plus faible. La seconde, elle, indique que le couple NA2-mire graduée est plus faiblement corrélé aux autres que les autres entre eux.

Même si ces analyses laissent paraître que le système DiNi12-mire Nedo a de meilleurs résultats, il est difficile de l'affirmer. Les limites de l'analyse de ces tests reposent sur le fait qu'ils ont été réalisés par rapport à des valeurs moyennes et non des valeurs vraies. La prudence est de mise contre des conclusions trop hâtives. En effet si un des couples a donné des résultats erronés, l'analyse en serait par conséquent biaisée. Ainsi le système DiNi12-mire Nedo peut seulement être considéré comme le système le plus proche de la moyenne des résultats obtenus.

En revanche, l'avis peut être plus tranché concernant la comparaison des nivellements réalisés avec les couples DNA03-mire CERN et DNA03-mire Nedo. Les ayant effectués avec le même niveau, la comparaison repose uniquement sur les mires. Que ce soit pour l'analyse sur l'appartenance à une même population ou sur l'analyse de la corrélation, les résultats sont très semblables. Les deux mires et leurs dispositifs d'éclairages sont similaires.

Les nivellements dans le tunnel du LHC et leurs ajustements auront été l'occasion de se poser des questions sur d'autres phénomènes. À certain endroit du tunnel, et particulièrement à proximité des conduites de ventilation, lors des lectures sur la mire apparaissent un phénomène de flamboiement. Ensuite, en regardant l'évolution des erreurs de collimation, il faut noter un manque de stabilité de cette valeur. Si ce problème est compensé par l'égalité des portées lors de ce nivellement, ce ne sera pas toujours le cas. Concernant l'ajustement de certains secteurs, la séparation des mesures relatives aux alésages "Sorties" et "Tilt" provoque une divergence de leurs altitudes par rapport à celles ajustées avec l'ensemble des mesures. Ainsi, dans la suite du rapport vont être développés des tests ayant pour objectif de mieux comprendre ces phénomènes et le cas échéant de les réduire.

IV Ensemble des tests

L'ensemble des tests qui vont suivre ont pour objectif de vérifier les remarques faites lors de la comparaison des systèmes niveaux-mire et également des hypothèses qui peuvent expliquer les résultats des derniers nivellements. Ainsi dans un premier temps, une comparaison est faite entre les dénivelées mesurées avec les niveaux et une jauge à tilt. Ensuite viennent les tests en relation directe avec la partie précédente, c'est-à-dire sur la précision des appareils et la stabilité de la collimation. Pour terminer un test de mesure longue durée permettra de tester l'influence de différents paramètres du tunnel sur les mesures.

IV.1 Comparaison avec les résultats de la jauge à Tilt

IV.1.1 Présentation

La jauge à Tilt est un outil, développé au CERN, permettant de mesurer l'inclinaison transversale de l'aimant en déterminant l'angle entre la pente des alésages et du plan horizontal, voir schéma ci-dessous. Pour cela, le gabarit est muni d'un inclinomètre électronique afin de mesurer l'angle avec une précision de 0,05 mrad. La mesure doit être effectuée deux fois en retournant l'appareil pour s'affranchir de l'erreur instrumentale.

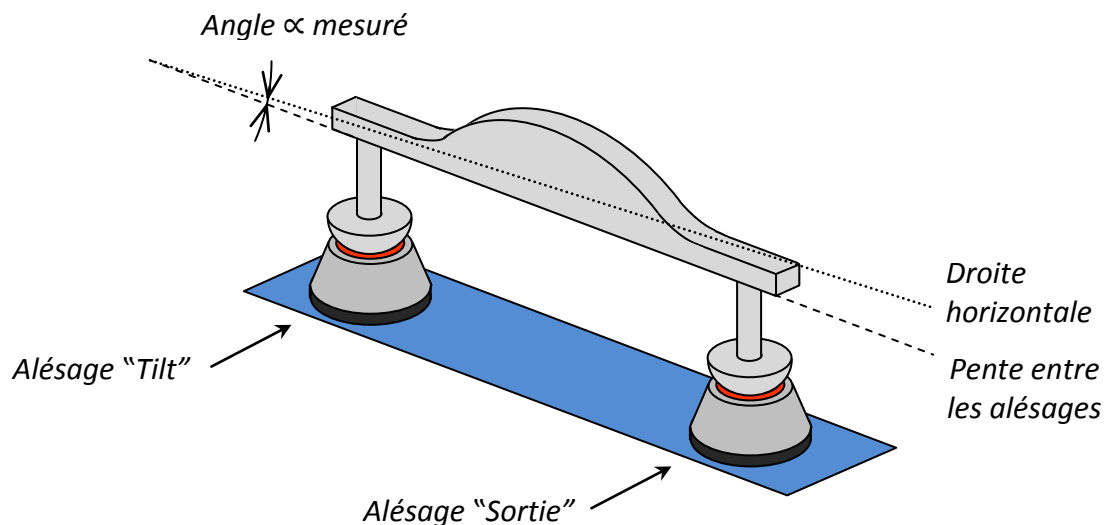


Figure 19 : Schéma de la mesure d'une jauge à Tilt

Connaissant la distance entre les alésages "Sortie"- "Tilt" de chaque aimant, il est simple de calculer la dénivelée avec une précision de l'ordre de trois à cinq centièmes de millimètre. L'observation étant plus précise que celles obtenues par les systèmes niveaux-mires, cela constitue une base de comparaison très intéressante. Ainsi, des mesures à la jauge à Tilt ont été réalisées sur les 109 alésages "Sortie"- "Tilt" mesurés lors des nivellements de l'arc du secteur 3-4. Dans un premier temps, une comparaison est effectuée entre les dénivelées mesurées avec les niveaux et celles observées par la jauge à Tilt. Puis, dans un second temps, le test permet de voir l'influence de l'intégration des dénivelées observées par la jauge à Tilt dans l'ajustement sur altitudes calculées.

IV.1.2 Comparaison des observations

Lors des nivellements rapides, chaque dénivelée “Sortie”-“Tilt” est mesurée quatre fois. La comparaison est donc effectuée entre la moyenne des mesures de nivellement et celle effectuée à la jauge à Tilt. Le tableau suivant résume les résultats de la comparaison.

<i>Systemes niveaux-mires</i>				
Niveau Mire	NA2 Graduée	DNA03 Code-barres CERN	DNA03 Code-barres Nedo	DiNi12 Code-barres Nedo
<i>Statistiques sur les écarts-types des mesures de nivellement</i>				
Moyenne	0,035	0,023	0,018	0,017
Écart-type	0,017	0,011	0,011	0,010
<i>Statistiques de la comparaison</i>				
Moyenne	-0,020	-0,018	-0,010	-0,018
Écart-type	0,023	0,025	0,026	0,026

Tableau 10 : Tableau statistique de la comparaison avec la jauge à Tilt exprimé en millimètre

Les statistiques sur les écarts-types des mesures de nivellement donnent une idée sur la répétabilité des mesures de chaque système niveau-mire. Ces résultats montrent que les deux systèmes DNA03-mire Nedo et DiNi12-mire Nedo sont très proches avec des moyennes aux alentours de 1,7 centièmes de millimètre et des écarts-types d'environ 1 centième. En revanche, le système DNA03-mire CERN possède une moyenne légèrement supérieure alors que le couple NA2-mire graduée a une moyenne et un écart-type deux fois plus élevés. Même si ces résultats sont très faibles, le cumul de ces variations sur des nivellements de quelques kilomètres entraîne rapidement des erreurs en absolu de quelques millimètres.

Concernant la comparaison avec les observations de la jauge à Tilt, le système DNA03-mire Nedo présente le meilleur bilan avec une moyenne de -1 centième de millimètre et un écart-type de 2,6 centièmes. Pour les autres systèmes, les écarts-types sont semblables au précédent mais les moyennes se situent aux alentours de -2 centièmes. Malgré une différence d'un centième de millimètre avec le système DNA03-mire Nedo, les moyennes se trouvent dans la précision des mesures de la jauge à Tilt, à savoir trois à cinq centièmes de millimètre. Ainsi, même si le système DNA03-mire Nedo présente un plus faible écart avec les observations de la jauge à Tilt, il n'est pas possible d'affirmer que celui-ci est plus précis.

La dispersion des écarts entre la moyenne des mesures de nivellement et des observations de la jauge à Tilt est également un élément important de la comparaison. Si l'écart-type est un début de réponse, il ne permet pas totalement d'y répondre. Les résultats du tableau précédent révèlent des écarts-types semblables pour les quatre systèmes, pour autant la dispersion ne l'est pas forcément. Une analyse graphique, de type boîte à moustache, permet de vérifier cela.

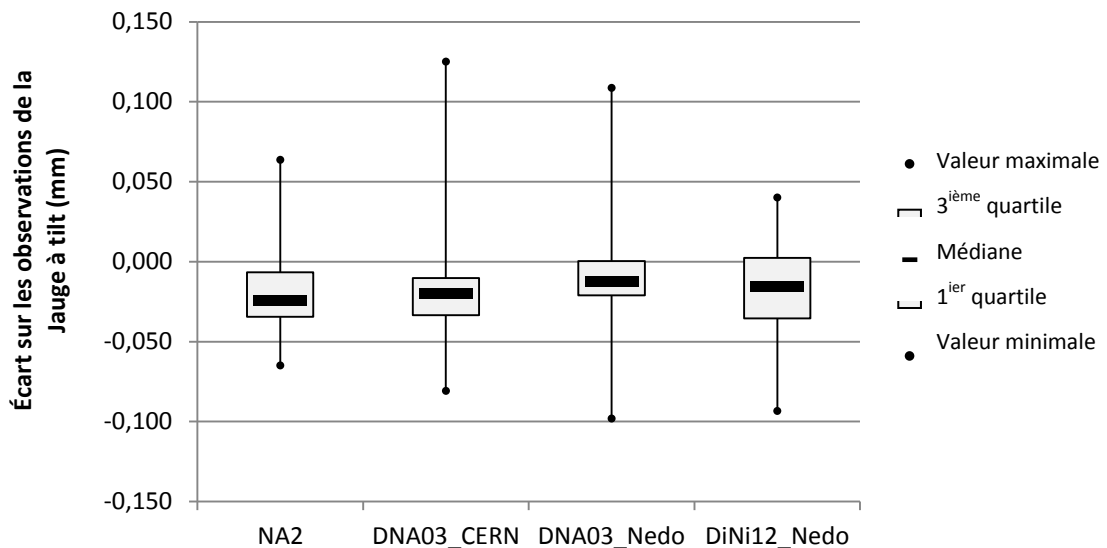


Figure 20 : Analyse de la dispersion à l'aide de boîte à moustache

Le graphique permet de voir une plus grande dispersion des systèmes incluant le DNA03, de l'ordre de 20 centièmes de millimètre contre 12 pour les deux autres. En revanche, pour ces mêmes systèmes, la moitié des écarts ont une dispersion plus faible de quelques centièmes de millimètre. Ceci est logique puisque les écarts-types sont du même ordre de grandeur. En regardant de plus près les résultats des écarts-types sur la moyenne des mesures de nivellement pour les valeurs extrêmes des écarts entre les mesures de nivellement et celles de la jauge à Tilt, il n'y a pas de relation.

En conclusion, le système DNA03-mire Nedo présente le meilleur bilan sur le couple de résultats répétabilité des mesures et écart aux observations de la jauge à Tilt. Malgré cela, il présente une plus grande dispersion. Ainsi, lors de la détermination des dénivelées, et cela malgré la répétabilité, peuvent se glisser des écarts au-delà du dixième de millimètre. Sur l'ensemble de ces critères, le système DiNi12-mire Nedo est plus constant. Ces résultats se vérifieront peut être lors de l'ajout des observations de la jauge à Tilt dans les données de l'ajustement.

IV.1.3 Comparaison des ajustements

Pour ce test, lors de l'ajustement des nivellements, sont ajoutées les observations de jauge à Tilt. Dans le cas où l'ajustement se ferait en trois dimensions, les observations de jauge à Tilt pourrait-être intégrées directement, c'est-à-dire insertion des angles entre les alésages "Sortie"- "Tilt" dans les fichiers de mesures. L'ajustement altimétrique se faisant séparément, ce sont les dénivelées calculées auparavant qui sont ajoutées à celles issues du nivellement. La précision de ces observations est mise à cinq centièmes de millimètre. Les résultats de ce test sont résumés dans le tableau ci-dessous.

<i>Systèmes niveaux-mires</i>				
Niveau	NA2	DNA03	DNA03	DiNi12
Mire	Graduée	Code-barres CERN	Code-barres Nedo	Code-barres Nedo
<i>Fermetures</i>				
Au théorique	1,30 mm	2,28 mm	2,74 mm	1,75 mm
Différence	-0,03 mm	0,03 mm	0,00 mm	0,02 mm
<i>Écart entre les ajustements avec et sans la jauge à Tilt</i>				
Moyenne	-0,016 mm	0,012 mm	0,013 mm	0,027 mm
Écart-type	0,011 mm	0,011 mm	0,011 mm	0,011 mm

Tableau 11 : Tableau statistique de la comparaison des ajustements avec et sans la jauge à Tilt

Les comparaisons au théorique sont sensiblement les mêmes pour les ajustements avec ou sans la jauge à Tilt. Les variations peuvent même être considérées négligeables si elles sont rapportées aux 2,8 km nivelés. Concernant l'évolution des écarts tout au long de l'arc, ils sont un peu plus élevés pour le système DiNi12-mire Nedo au vu de la moyenne. Les écarts-types eux sont les mêmes pour les différents systèmes. Même si cela n'est pas développé sous forme de graphique, comme pour la comparaison des observations à la jauge à Tilt avec les mesures de nivellement, la dispersion est plus forte pour les systèmes incluant le DNA03.

L'ajout des mesures de jauge à Tilt n'apporte donc pas plus de précision à l'ajustement. Les variations sont trop faibles comparé au temps de mesure pour envisager l'intégrer dans la procédure de nivellement dans l'avenir.

IV.2 Mesure des écarts-types des systèmes

IV.2.1 Présentation

Lors de l'ajustement sous LGC, l'écart-type a priori sur les observations, qui est de un dixième de millimètre, était trop élevé pour que le test de validation globale soit accepté. Dans la partie sur les calculs des tolérances et écarts-types utilisés pour l'ensemble du travail de nivellement (partie II.4), cette remarque avait déjà été faite en comparaison aux écarts-types instrumentaux fournis par le constructeur. Pour autant, les valeurs d'écart-type sur les observations, permettant la validation globale de l'ajustement, sont également inférieures à ces mêmes données. Ainsi il paraît judicieux de vérifier l'écart-type des différents systèmes niveau-mire.

Afin d'avoir une méthodologie cohérente à celle qui a été mise en place par le constructeur, il faut se référer à la norme internationale ISO 17123-2 "Optique et instruments d'optique – Méthodes d'essai sur des instruments géodésiques et d'observation" [12], et plus particulièrement à la deuxième partie relative aux niveaux. Dans cette norme, deux méthodologies répondant à des objectifs différents sont détaillées. La première, la méthode d'essai simplifiée, fournit une estimation de la précision du niveau compte tenu du nombre restreint de mesures. La deuxième, la méthode d'essai complète, permet de mesurer la précision du niveau ainsi que son équipement. Ce sont pour ces raisons que la deuxième méthode a été retenue pour ce test.

La norme ISO préconise une distance entre les deux points nivelés, A et B, d'environ 60 mètres. Les mires doivent être stables lors des mesures pour ne pas influencer sur les résultats. Le niveau, lui, doit être stationné à équidistance des deux mires pour réduire un maximum, voir annuler complètement, le défaut d'horizontalité de l'axe de visée de ce dernier. Le test est composé de quatre séries de dix mesures. La première consiste à prendre une lecture arrière vers le point A puis une lecture avant vers le point B. Lors de la deuxième série, les visées arrière et avant sont inversées. Le processus de la troisième et quatrième série est similaire aux deux premières, seule la position des mires est interchangée.

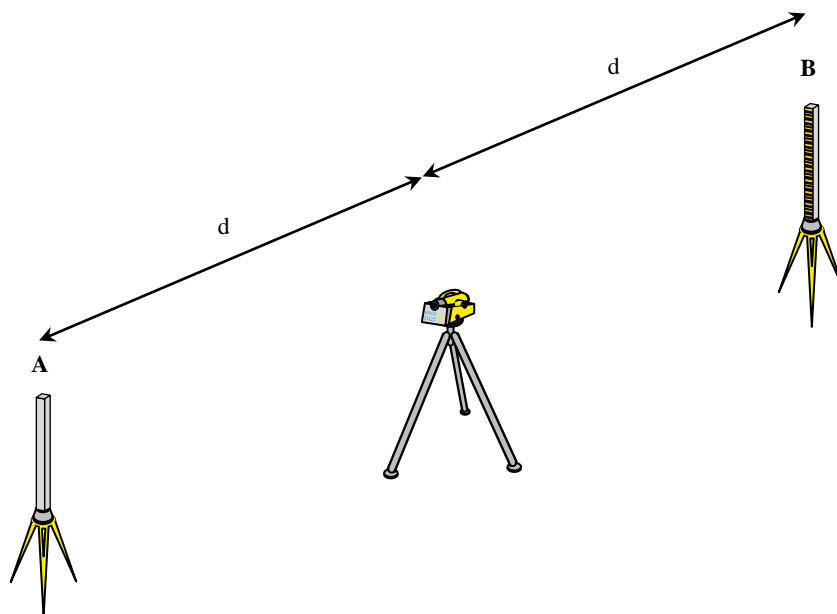


Figure 21 : Schéma du dispositif de mesure de l'écart-type instrumental

Pour être dans des conditions proches de celle du tunnel et réduire l'influence des variations climatiques, température constante et espace non ventilé, le test a été réalisé en sous-sol. Celui-ci permet un écart maximal entre les mires d'une quarantaine de mètre, donc une vingtaine de mètres en dessous de la distance recommandée dans la norme. Les portées équivalentes sont alors de vingt mètres, soit la portée maximale lors des nivellements des accélérateurs. N'ayant qu'une mire code-barres Nedo pour le DNA03 et le DiNi12, les mires n'ont pas pu être fixes durant le test de ces systèmes. Pour pallier ce problème, des alésages stables ont été placés aux positions A et B. Pour les mesures faites avec les systèmes NA2-mire graduée et DNA03-mire CERN, deux mires ont été utilisées.

IV.2.2 Résultats & analyses

L'objectif de ce test est de comparer l'écart-type mesuré des systèmes niveau-mire aux différentes informations récoltées durant ce Travail de Fin d'Étude. Ainsi la première est faite par rapport à l'écart-type présent dans le manuel du fabricant. La deuxième est effectuée avec les écart-types sur les observations permettant la validation globale de l'ajustement sous le logiciel LGC.

<i>Systèmes niveaux-mires</i>				
Niveau	NA2	DNA03	DNA03	DiNi12
Mire	Graduée	Code-barres CERN	Code-barres Nedo	Code-barres Nedo
<i>Écart-type pour un cheminement double de 1km</i>				
Mesuré	$0,26 \text{ mm} \times \sqrt{km}$	$0,19 \text{ mm} \times \sqrt{km}$	$0,25 \text{ mm} \times \sqrt{km}$	$0,21 \text{ mm} \times \sqrt{km}$
Théorique	$0,30 \text{ mm} \times \sqrt{km}$	$0,30 \text{ mm} \times \sqrt{km}$	$0,30 \text{ mm} \times \sqrt{km}$	$0,30 \text{ mm} \times \sqrt{km}$
<i>Écart-type sur une observation</i>				
Mesuré	0,026-0,032 mm	0,019-0,023 mm	0,025-0,031 mm	0,021-0,026 mm
Issu de l'ajustement	0,027-0,030 mm	0,022-0,024 mm	0,017-0,018 mm	0,018-0,019 mm

Tableau 12 : Tableau de la comparaison des écarts-types des systèmes

Concernant l'écart-type pour un cheminement de 1km, l'écart-type mesuré pour chacun des quatre systèmes est inférieur à celui annoncé par le constructeur. De ces mesures se dégagent deux couples aux alentours de $0,25 \text{ mm} \times \sqrt{km}$, celui du NA2- mire graduée et DNA03-mire Nedo, et les deux autres avec un écart-type d'environ $0,20 \text{ mm} \times \sqrt{km}$.

Au niveau des écarts-types sur les observations, seuls les intervalles issus des mesures des systèmes NA2-mire graduée et DNA03- mire CERN ont des valeurs communes avec ceux issus des ajustements sous LGC. Pour les deux autres systèmes, les intervalles issus des mesures sont supérieurs, même si celui du DiNi12 reste assez proche des valeurs issues de l'ajustement. Il faut garder à l'esprit que les tests réalisés avec les mires Nedo peuvent s'avérer biaisés puisque les mires ne pouvaient pas être fixes.

La méthode d'essai complexe permet également de savoir si les décalages du point zéro des deux mires sont nuls, le tableau ci-dessous présente ces résultats. À noter que la tolérance dépend de l'écart-type du système.

<i>Systemes niveaux-mires</i>				
Niveau	NA2	DNA03	DNA03	DiNi12
Mire	Graduée	Code-barres CERN	Code-barres Nedo	Code-barres Nedo
<i>Décalage du point zéro des mires</i>				
Mesuré	0,03 mm	0,54 mm	0,04 mm	0,02 mm
Tolérance	0,05 mm	0,03 mm	0,05 mm	0,04 mm

Tableau 13 : Tableau des décalages du point zéro des mires

Seules les deux mires code-barres CERN présentent un décalage du point zéro de mire non nulle. Les résultats pour les systèmes intégrant les mires Nedo sont rassurants puisque ce test revient à déterminer le décalage sur la même mire.

Les tests sur les systèmes composés des niveaux DNA03 et du niveau NA2 ayant été réalisés le même jour avec les alésages A et B aux mêmes positions, la comparaison des dénivelées mesurées peut être également faite. En prenant la moyenne des quarante observations, ce qui permet de s'affranchir du décalage du point zéro des deux mires, les dénivelées sont les mêmes à plus ou moins un centième de millimètre.

IV.2.3 Conclusion

Il existe bien une cohérence entre les résultats obtenus lors de ce test et les écarts-types nécessaires pour le passage du test de validation globale. Les écarts-types calculés sont probablement inférieurs à ceux indiqués par le fabricant puisque le test a été réalisé dans des conditions propres au tunnel. En effet, ces appareils sont à l'origine prévus pour des travaux en extérieur où les perturbations dues aux variations des conditions atmosphériques ou à l'ensoleillement sont plus importantes.

Ce changement d'écart-type influe également sur les tolérances de fermeture "Aller-Retour". Si le calcul des tolérances est de nouveau réalisé, seul le nivellement avec le DiNi12 est hors tolérance de trois dixièmes de millimètre. Pour ce qui concerne les nivellements du LHC au NA2, les arcs hors tolérances sont les mêmes qu'auparavant. Dans ces arcs, les conditions atmosphériques ne sont peut-être pas aussi stables que dans les autres.

IV.3 Étude de la stabilité de la collimation

IV.3.1 Présentation

Lors du nivellement de l'arc 3-4 avec les différents systèmes niveau-mire, il s'est avéré que les mesures du défaut d'horizontalité de l'axe de visée des niveaux digitaux étaient plus ou moins stables. Si cela n'était pas préjudiciable puisque le nivellement rapide se fait avec le respect de l'égalité des portées, ce ne sera plus le cas durant le nivellement de lissage. En effet, lors de ce dernier, les distances entre les différentes portées varient entre 2 et 20 mètres.

Les niveaux optiques n'ont pas connu le même problème. Leur réglage ou simple contrôle se fait à l'aide d'un collimateur. Le principe consiste à régler la mise au point à l'infini et de comparer le fil niveleur du réticule avec la référence. Si les deux se superposent, la collimation est correcte, sinon il faut régler le réticule de l'appareil au moyen de vis.

Pour contrôler et ajuster ce paramètre, des programmes internes aux niveaux digitaux permettent de calculer un angle correspondant à la correction de la collimation. Ainsi chaque lecture sur mire est corrigée en fonction de la distance niveau-mire. Le programme propose les méthodes dites de Förstner, de Nábauer, de Kukkamäki et Japonaise. Pour connaître la procédure de ces quatre méthodes, il faut se référer aux manuels d'utilisation des niveaux digitaux [7] [8].

Pour les mêmes raisons que le test sur les écarts-types des niveaux, la longueur maximale du sous-sol n'étant que d'une quarantaine de mètres, les méthodes de Förstner et Nábauer ont été légèrement raccourcies par rapport aux recommandations des fabricants. L'observation du problème de collimation n'étant que sur les deux niveaux digitaux, les quatre méthodes ont été testées sur le DNA03 et le DiNi12 associé avec les mires Nedo. Pour chacune des méthodes et des niveaux, dix mesures successives sont réalisées.

IV.3.2 Résultats & analyses

Afin d'avoir une idée de la répétabilité de la mesure du défaut d'horizontalité de l'axe de visée de ces niveaux, l'analyse va être réalisée sur l'écart-type et l'amplitude des observations. Le détail des mesures se trouve en annexe. Le tableau suivant résume pour chacune des méthodes ces résultats ainsi que la moyenne des dix observations.

<i>Méthode</i>	Förstner	Nábauer	Kukkamäki	Japonaise
<i>Moyenne</i>				
DNA03	-5,8''	-4,5''	-7,9''	-5,4''
DiNi12	-1,8''	-2,3''	-1,7''	-0,2''
<i>Écart-type</i>				
DNA03	1,3''	1,4''	1,6''	1,9''
DiNi12	0,8''	0,8''	1,1''	0,8''
<i>Amplitude</i>				
DNA03	3,8''	4,6''	5,1''	6,2''
DiNi12	2,7''	2,1''	2,9''	2,4''

Tableau 14 : Tableau des résultats de la collimation en fonction des méthodes

Au vu des écarts-types, les collimations sont assez semblables pour le niveau DiNi12 quelle que soit la méthode utilisée compte-tenu du nombre d'observations relativement faible. En revanche, la collimation du DNA03 par la méthode Japonaise donne des résultats avec une plus grande dispersion par rapport aux autres méthodes. Ceci est peut-être dû à une lecture réalisée sur une distance courte de 2,5m. Les données issues de cette méthode seront écartées pour la suite de l'analyse. Les écarts-types du DiNi12 sont plus faibles que ceux du DNA03, environ 0,8'' contre 1,5''. Concernant l'amplitude, l'observation est logiquement la même. Celle du DiNi12 se situe aux alentours de 2,5'' contre 4,5'' pour le DNA03.

En prenant l'écart-type moyen sur la détermination de la collimation et pour une différence de portée maximale de 18m, l'erreur due à la collimation est de 7 centièmes de millimètre pour le DiNi12 et 13 centièmes pour le DNA03. En répétant le même calcul en utilisant cette fois-ci la demi-amplitude des appareils, l'erreur passe à 11 centièmes de millimètre pour le DiNi12 contre 20 centièmes pour le DNA03. Ces erreurs ne sont pas négligeables puisqu'elles sont supérieures aux écarts-types des niveaux pour ce type de mesures. Le DNA03 présente lui des erreurs quasiment deux fois supérieures à celles du DiNi12.

IV.3.3 Conclusion

Le test montre un problème de collimation certain pour ces deux niveaux digitaux. Lorsque que le nivellement ne permet plus le respect de l'égalité des portées, l'erreur résiduelle est assez importante comparée à l'écart-type des appareils. À noter que la méthode Japonaise semble donner des résultats avec moins de répétitivité que les trois autres pour le DNA03.

Les résultats obtenus lors de ces tests sont comparables aux résultats obtenus par Nicolas Malaquin lors de la comparaison de ces deux niveaux. Son test, sur dix mesures en suivant la méthode de Förstner, avait donné un écart-type de 0,7'' pour le DiNi12 contre 1,7'' pour le DNA03. L'amplitude était de 1,9'' pour le DiNi12 et de 4,4'' pour le DNA03.

En comparant les résultats obtenus lors du nivellement avec ces résultats, il est possible de dire que les écarts observés sont plus dus à la précision de la mesure de cette erreur qu'à sa variation. La différence entre ces deux appareils provient peut-être de la précision de leur compensateur à pendule, 0,2'' pour le DiNi12 [8] contre 0,3'' pour le DNA03 [7]. Ce facteur un tiers entre la précision des pendules est quasiment celui entre les écarts-types sur les déterminations.

IV.4 Tests de mesure longue durée

IV.4.1 Présentation

Le test de mesure longue durée a été imaginé par Michel Kasser, actuellement professeur de géodésie à l'École d'Yverdon-les-Bains en Suisse, suite à une visite dans le tunnel du LHC. Il a pour but de répondre à plusieurs interrogations à propos de la divergence des ajustements des alésages "Sortie" et "Tilt" ainsi que sur la répétabilité des mesures dans des conditions météorologiques changeantes.

Lors des ajustements des différents secteurs du LHC, l'ajustement séparé des alésages "Sortie" et "Tilt" révèle une divergence. L'une des hypothèses avancées est une moins grande répétabilité des lectures sur les alésages "Tilt". La cause pourrait être due à des changements de gradients de température au-dessus de l'aimant engendré par une différence de température entre la masse de l'aimant et l'air ventilé. Outre la température de l'aimant, durant certains nivellements ont été rapportées des variations de température d'un jour à l'autre. Le nivellement réalisé dans le secteur 8-1 du LHC a connu très souvent des contrôles de séquences "Aller-Retour" hors tolérance. Ceci a été mis en relation avec une chute de température ressentie par les opérateurs. Comme il l'a été évoqué précédemment, un phénomène de flamboiement a également perturbé les lectures sur mire à certains endroits du tunnel. Ceci est la conséquence de la puissance de ventilation insufflée dans le tunnel pour le renouvellement de l'air. Pour autant, les variations qui en résultent sur les lectures ne sont pas quantifiées.

Pour accepter ou rejeter les hypothèses et quantifier les variations sur les mesures, une procédure a été établie. Ainsi le test va être réalisé sur une période minimum de 6h à différents endroits du tunnel. Un logiciel de communication a pour but de piloter le niveau à partir d'un ordinateur et prendre des mesures à intervalle régulier. Les paramètres météorologiques sont mesurés au niveau et à la mire à l'aide de capteurs température et humidité. Ces capteurs peuvent prendre et enregistrer des mesures à un intervalle de temps régulier sur un période donnée. N'ayant pas d'appareil pouvant prendre et enregistrer les mesures de pression, celle-ci est prise manuellement en début et fin de test. Les capteurs ont une résolution de 0,05°C et 0,1% d'humidité.

À noter que les capteurs température et humidité ont fait l'objet d'un étalonnage entre eux préalablement aux tests. Cela a permis de s'assurer de leur bon fonctionnement et de déterminer la présence d'un delta entre eux, mais ce ne fut pas le cas. L'important dans ces mesures n'est pas d'avoir une valeur absolue de ces paramètres mais de connaître la différence de ces paramètres entre le niveau et la mire.

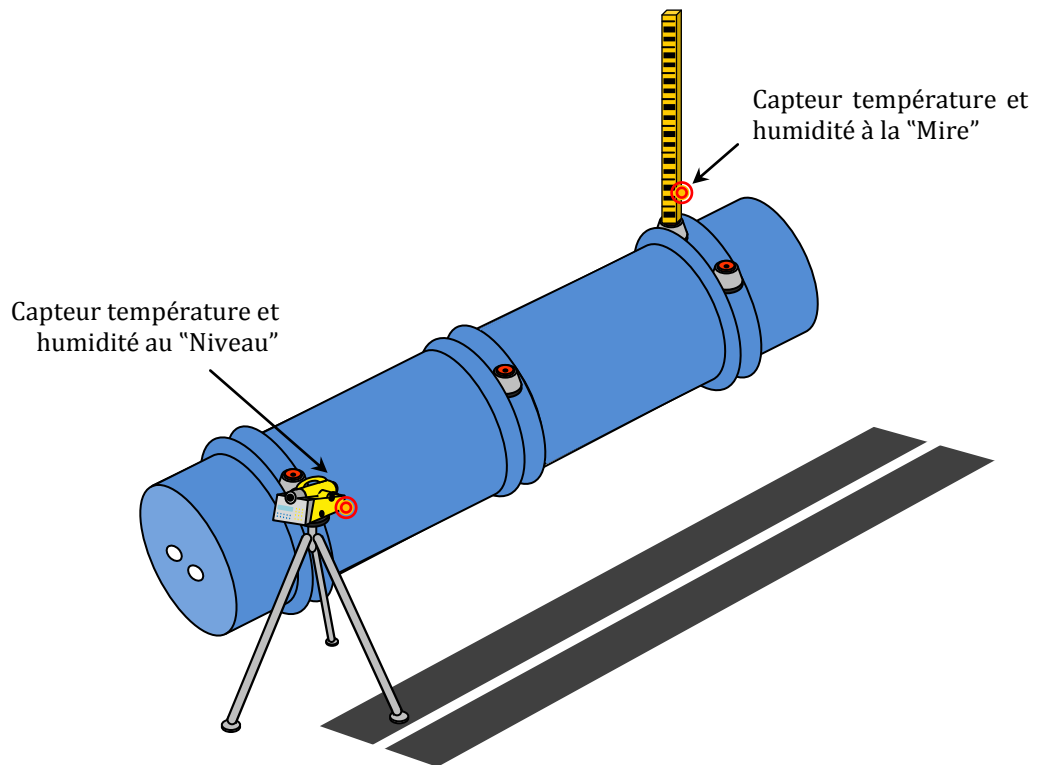


Figure 22 : Schéma du dispositif de mesure longue durée

IV.4.2 Logiciel LTL

Le logiciel LTL (Longue Time Leveling) a été spécialement développé par mes soins pour le test de mesure longue durée. Il assure la communication entre un ordinateur et un niveau digital. Le développement a été réalisé sur Microsoft Visual Studio 2010 Express. Le programme a pour objectif d'envoyer les mesures et de les enregistrer à un intervalle de temps régulier.

Le logiciel permet de communiquer avec le niveau DiNi12 de Trimble associé à la mire Nedo. La raison de ce choix est que ce niveau a donné des résultats légèrement meilleurs par rapport au DNA03. Avec plus de temps, ces mêmes tests auraient été également réalisés avec le DNA03 pour effectuer une comparaison. L'interface donne la possibilité de choisir l'intervalle de temps entre les mesures, la durée du test et le port de communication. Le choix de l'intervalle de temps doit être absolument supérieur à une quinzaine de seconde pour respecter le délai entre l'envoi et la réception des données.

IV.4.3 Résultats

IV.4.3.1 Comparaison entre l'alésage Sortie-Tilt

Lors de ce test, des mesures ont été réalisées d'abord sur l'alésage "Tilt" pendant 12 heures. Ensuite le même test a été effectué sur l'alésage "Sortie". Prévu pour une durée également de 12 heures, mais un problème sur la batterie de l'éclairage de la mire a empêché le test de se poursuivre au-delà de 4 heures. Le test sur l'alésage "Sortie" a de nouveau été exécuté sans toucher à l'appareil. Le graphique suivant présente les résultats

sur les deux alésages. Pour pouvoir mieux comparer les résultats, les lectures ont été réduites par rapport à la première lecture enregistrée sur chacun des tests.

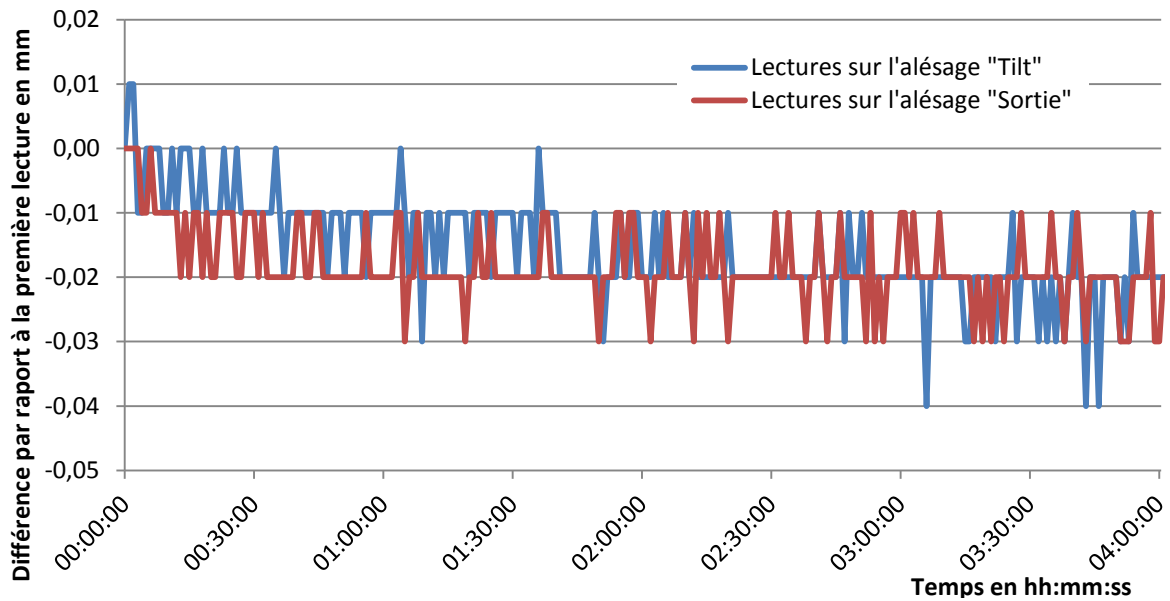


Figure 23 : Comparaison du test longue durée sur les alésages “Tilt” et “Sortie”

Seules les quatre premières heures sont représentées pour chacun des alésages. Les huit heures suivantes du test sur l’alésage “Tilt” ou les mesures enregistrées sur le second test sur l’alésage “Sortie” sont aussi stables que les deux dernières heures du graphique.

Les résultats sont similaires entre les deux tests, les moyennes sont de -0,02mm et les écarts-types de 0,01mm. L’écart-type des lectures sur l’alésage “Tilt” n’est supérieur que de deux microns. Ceci n’est pas suffisant pour confirmer l’hypothèse d’une perturbation des lectures passant au-dessus de l’aimant engendré par un éventuel gradient de température de celui-ci.

Ce graphique montre un phénomène sur la première demi-heure de mesures avec une diminution des lectures de deux à trois centièmes de millimètre. Cette période correspond peut-être à la mise en température du système de mesures, c’est-à-dire le niveau, la mire et/ou le trépied. La mire étant en invar donc avec un coefficient de dilatation faible, 1,5ppm (partie par million) soit 1,5 micron par mètre et par degré, elle ne doit pas être en cause dans la baisse des lectures enregistrées. En revanche les mécanismes internes du niveau et le trépied sont plus sujets à la dilatation.

IV.4.3.2 Test de l’influence de la température

Ce test a pour objectif de vérifier s’il existe une corrélation entre les variations des conditions atmosphériques et celle des mesures. Dans l’hypothèse où cette relation est présente, il faudra savoir si elle peut être corrigée. Le graphique fait le lien, s’il en existe un, entre l’écart de température mesuré au niveau et à la mire avec les lectures enregistrées par l’appareil.

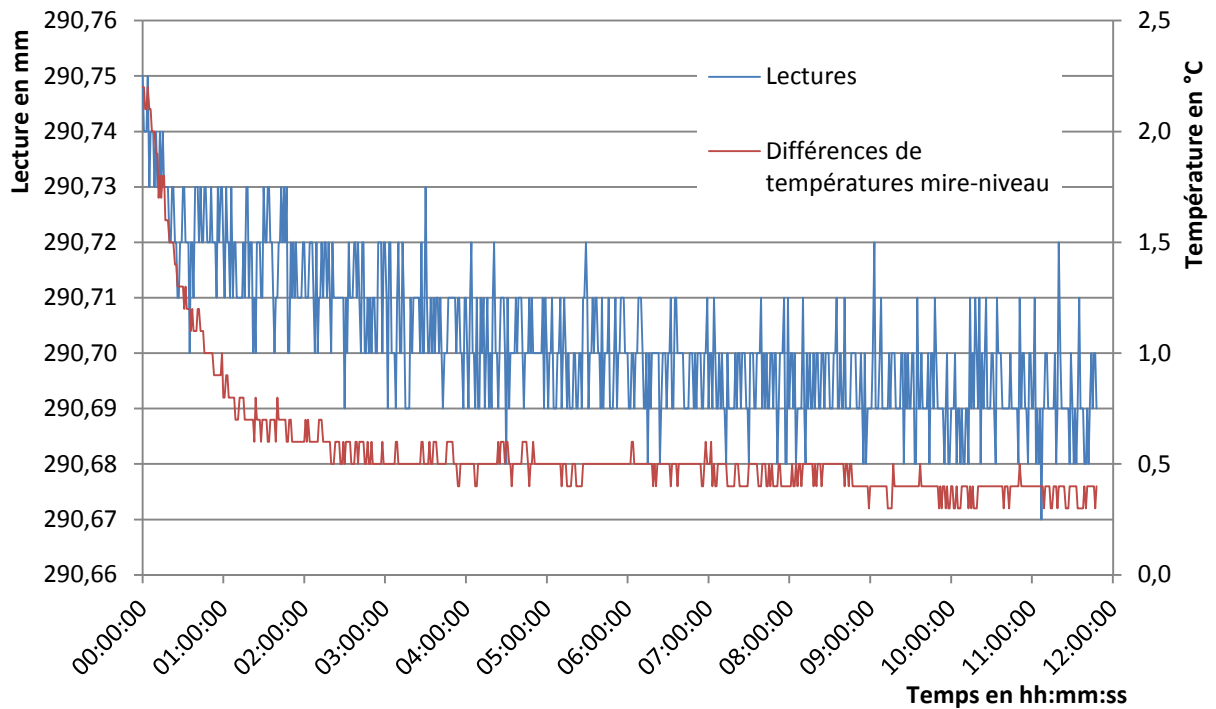


Figure 24 : Relation entre l'évolution de la température et les lectures

À noter que l'évolution de la différence d'humidité à la mire et au niveau est symétrique par rapport à l'axe des ordonnées. Elle débute à -0,7% avant de se stabiliser aux alentours de 0,1%.

Sur ce test, les lectures diminuent au cours du temps sans se stabiliser aux environs des 30 minutes de mesures comme les précédents tests. La diminution est effective tout au long du test, soit 12 heures, mais est plus intense dans les deux premières heures. La courbe de température suit approximativement la même forme que l'évolution des lectures. Pour avoir une idée chiffrée du lien qui existe entre les lectures et les différences de température, il faut passer par le calcul du coefficient de corrélation. Ainsi les deux courbes sont corrélées à 69,8%. Il existe donc un lien a priori entre l'évolution de la température et celle des mesures.

La variation des lectures est certainement due à la déviation des rayons lumineux entre le niveau et la mire à cause de la réfraction atmosphérique. Pour corriger ce phénomène, un module de réfraction atmosphérique est incorporé dans les appareils, dont la valeur est généralement 0,13. Cette valeur varie en fonction des conditions météorologiques. L'enjeu serait de faire varier cette valeur en fonction des paramètres atmosphériques (température, pression, humidité, pression) pour que la dispersion des lectures soit plus faible.

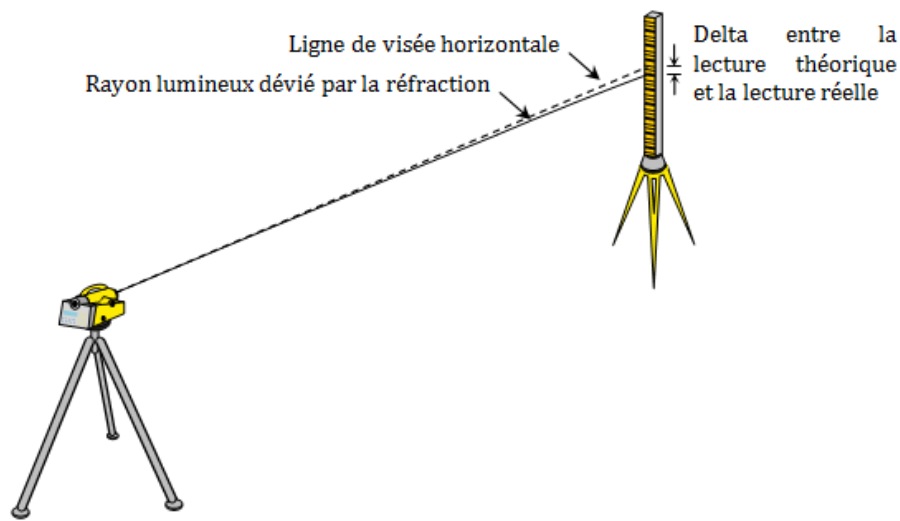


Figure 26 : Schéma de la déviation des lectures

Le module de réfraction atmosphérique (mra) correspond au gradient vertical d'indice de réfraction (∇n). L'indice de réfraction (n) dépend de la température, de l'humidité et de la pression. La variation de cet indice augmente proportionnellement avec l'altitude. En revanche, le gradient évolue inversement à l'indice comme le montre le schéma ci-contre.

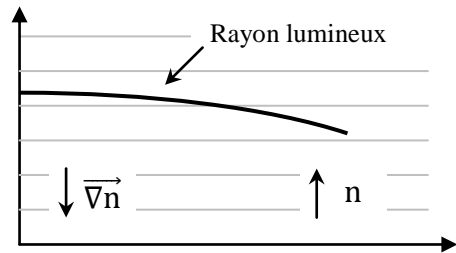


Figure 25 : Schéma de la déviation des rayons lumineux en fonction de l'indice

Pour arriver à un modèle de correction des mesures, il faut passer par le calcul des indices de réfraction au niveau et à la mire. Plusieurs équations permettent d'arriver à ce résultat, la formule de Barrel et Sears ou celle d'Edlén sont parmi les plus connues. Après cette étape, il est possible d'obtenir le module de réfraction atmosphérique à chaque instant et donc le delta entre la lecture théorique et réelle. En utilisant la correction de l'équation modifiée de Edlén par K. P. Birch et M. J. Downs [13], le gradient de température est inversé par rapport à celui présenté sur le schéma précédent. Pour obtenir la correction, il faut se référer au cours d'optique de J. Cali [15]. Ainsi la correction à apporter aux mesures est négative pour obtenir la lecture théorique. L'ensemble des calculs est résumé en annexe. Le graphique suivant présente les lectures réelles et celles corrigées.

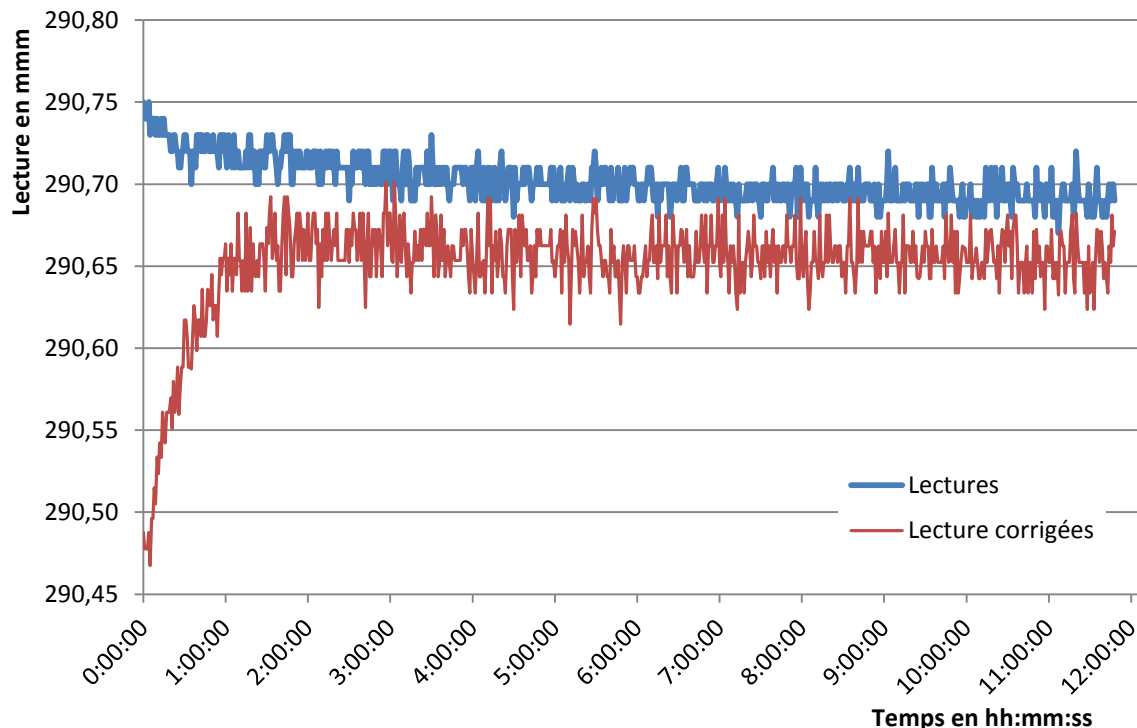


Figure 27 : Relation entre l'évolution de la température et les lectures

Ce graphique montre très clairement que le modèle de correction appliqué aux lectures dégrade la dispersion des mesures. Plusieurs raisons peuvent expliquer ce phénomène dont la première est la précision recherchée. En effet, l'écart maximal entre les lectures brutes ne dépasse pas le dixième de millimètre. Le modèle mathématique tout comme la résolution des capteurs météorologiques ne permettent peut-être pas de corriger une aussi faible dispersion. Une autre possibilité est que la baisse des lectures enregistrées n'est pas liée aux variations des conditions atmosphériques.

À noter que les stations durent entre trois et cinq minutes pour le nivellement rapide. Sur une période de cinq minutes, pour ce test, l'écart-type ne dépasse pas un centième de millimètre. Ainsi, l'évolution de température ne paraît pas assez rapide pour avoir le temps de perturber les mesures sur une station. Mais ce test ne permet pas de répondre directement à l'hypothèse de l'influence de la température sur les mesures de dénivelée. Dans le cas d'une température homogène dans la zone de nivellement, et cela quelle que soit la température, la mesure de dénivelée n'est pas perturbée. En effet, si la température est la même au niveau de chaque alésage mesuré et que l'égalité des portés est respectée, le delta entre la lecture théorique et celle réelle sera la même pour toutes les mesures. Les dénivelées calculées à partir de ces mesures n'en seront donc pas affectées. Dans le cas contraire, si l'une des deux conditions n'est pas réunie, le delta varie d'une lecture à une autre.

IV.4.3.3 Test dans un endroit perturbé par la ventilation

Lors des précédents nivellements, les opérateurs se plaignaient du flamboiemment qui les perturbait pour réaliser les lectures sur la mire. Il a été décidé de baisser la ventilation, principale cause de ce phénomène. Malgré cela, certains endroits sont encore sujets à ces problèmes et notamment aux niveaux des entrées et sortie de ventilation.

Ce test a pour but de quantifier les variations sur les lectures dues au flamboiement. La mesure est réalisée sur l'alésage "Tilt" à proximité d'une sorties de ventilation. À cet endroit, la vitesse du vent est approximativement de 2 à 3 m.s⁻¹.

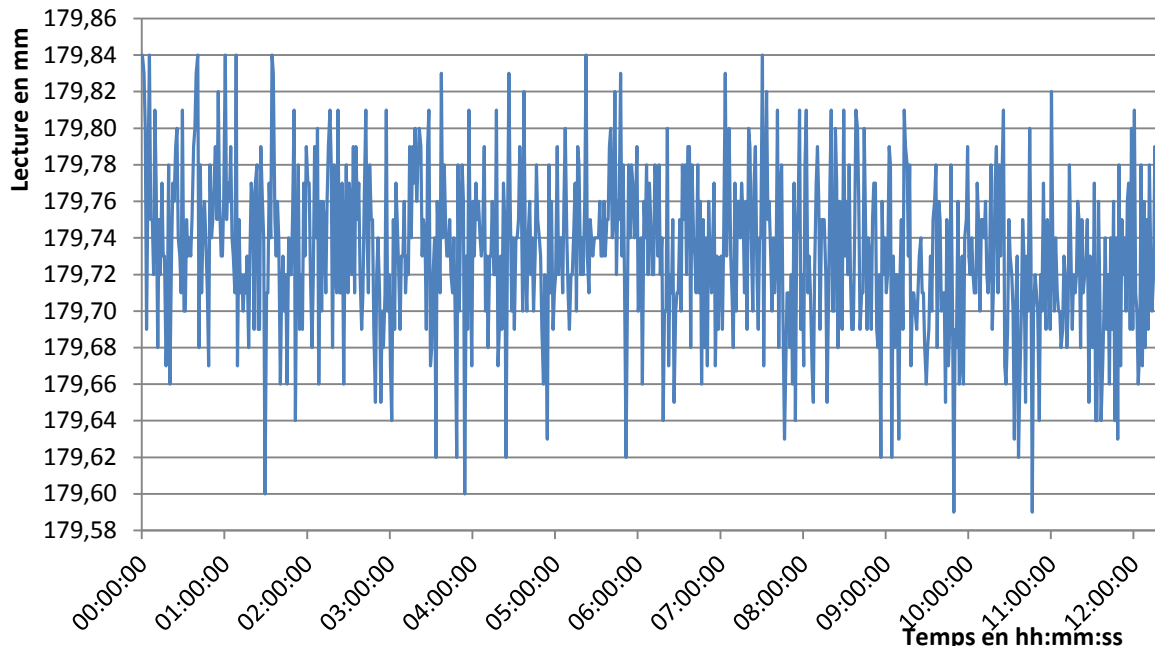


Figure 28 : Influence du flamboiement sur les lectures de nivellement

La moyenne des lectures est de 179,73mm avec un écart-type de 0,04mm. Les lectures se trouvent dans un intervalle compris entre 179,59 et 179,84mm soit 25 centièmes de millimètre d'amplitude. Comme pour le test précédent, en prenant une période de 5 minutes, l'écart-type maximale est de 8 centièmes de millimètre. Ces résultats sont importants pour un travail de précision. La solution évidente serait de baisser la ventilation mais celle-ci permet de régénérer l'air dans le tunnel pour le bien-être et la sécurité des travailleurs.

Pour avoir une idée de la répartition des lectures, le graphique suivant recense les effectifs pour chaque lecture.

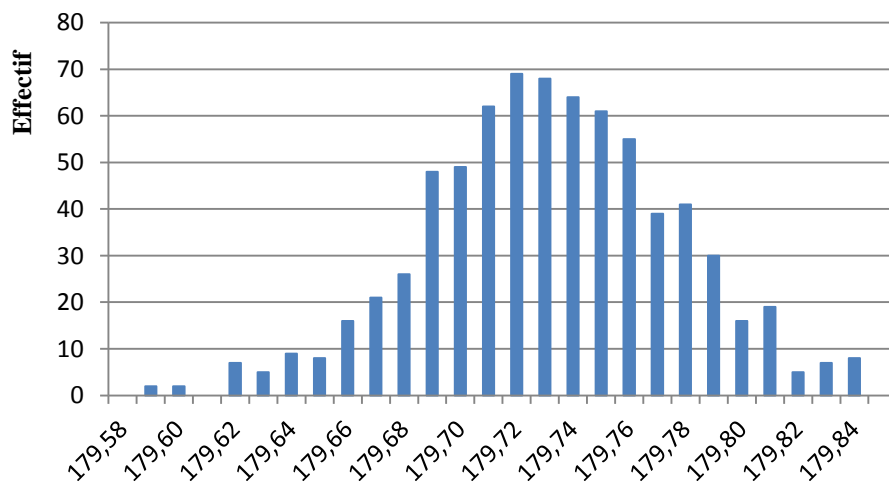


Figure 29 : Répartition des lectures

Visuellement, les effectifs suivent une répartition gaussienne. Ainsi pour pallier un maximum au phénomène de flamboiement, il faudrait répéter les mesures sur chaque alésage et les moyennner afin d'avoir un résultat plus proche de la réalité.

Lors de l'acquisition de mesures de nivellement par l'intermédiaire de PFB, les lectures enregistrées correspondent à la moyenne d'une série de trois lectures successives. En réalisant des moyennes des lectures prises dans un intervalle de temps de 2 minutes, soit trois lectures, l'écart à la moyenne de l'ensemble du fichier est de plus ou moins 9 centièmes de millimètre. En faisant de même pour des moyennes des mesures comprises dans un intervalle de 8 minutes, soit neuf lectures, l'écart passe à plus ou moins 5 centièmes. Ainsi, dans des conditions fortement perturbé par le flamboiement, il serait préférable de ne plus moyennner sur trois mais sur neuf lectures pour réduire son influence.

IV.4.4 Conclusion

Le test avait pour objectif de vérifier trois hypothèses, dont une s'est avérée fausse. En effet, les mesures sur l'alésage "Tilt" n'ont pas une plus grande dispersion que celles sur l'alésage "Sortie". L'hypothèse d'un gradient de température des aimants perturbant les lectures passant au-dessus d'eux n'est donc pas juste.

Concernant l'hypothèse menant à un lien entre l'évolution des conditions atmosphériques et celle des lectures, elle n'a pas été réellement validée de manière significative. Avec des conditions météorologiques similaires sur les différents points nivelés et en respectant l'égalité des portées, ce phénomène à des répercutions très faibles compte tenue du temps de stationnement restreint.

Le dernier test a permis de mettre en évidence la grande dispersion des lectures due au flamboiement causé par la ventilation. Pour pallier cela, il faut répéter les mesures afin de pouvoir les moyennner ou réduire encore un peu plus le débit de la ventilation.

Conclusion

Ce Travail de Fin d'Étude était l'occasion pour la section SU de répondre à plusieurs interrogations sur le nivellement dans le but d'être toujours plus précis. Les principaux objectifs définis au début de cette période de stage étaient de réaliser une comparaison de systèmes niveaux-mires lors d'un nivellement opérationnel, et non plus dans les conditions laboratoire. Parmi les autres demandes, la compréhension et la quantification de phénomènes propres au tunnel des accélérateurs faisaient partie intégrante de ce travail.

Concernant la comparaison des systèmes niveaux-mires, il s'est avéré que les niveaux digitaux avaient donné de meilleurs résultats que le niveau optique NA2. En revanche, parmi les niveaux digitaux, même si le DiNi12 paraît légèrement meilleur par rapport au DNA03, il est difficile de l'affirmer pour autant. Cette analyse est confirmée par le test sur les écarts-types des niveaux dans des conditions similaires, d'un point de vue stabilité, à celle du tunnel. En revanche, la répétabilité de la mesure du défaut d'horizontalité de l'axe de visée est meilleure pour le niveau DiNi12.

Pour toutes ces raisons, les prochains nivellements pourraient être bouleversés. Lors des nivellements rapides, je propose de remplacer les niveaux optiques par des niveaux digitaux. Ce remplacement a le triple avantage de pouvoir "gagner" en précision, en efficacité et d'apporter un réel confort de travail pour les opérateurs sur le terrain. Les niveaux DiNi12 seraient préférés aux DNA03 pour la réalisation du nivellement de lissage. La meilleure stabilité de la collimation est la raison de ce changement compte tenu de la grande variabilité des distances de portées.

Durant les différents nivellements, plusieurs hypothèses ont été évoquées pour expliquer la perte de précision et les fermetures hors tolérances. Celles-ci ne demandaient qu'à être vérifiées et le test de longue durée a apporté un début de réponse pour quelques-unes. Il a notamment permis de quantifier l'influence non négligeable de la ventilation sur la dispersion des lectures. Par contre, les hypothèses attribuant une plus grande dispersion des mesures sur les alésages "Tilt" que sur les alésages "Sortie" ou une influence de la température sur les lectures n'ont pas pu être confirmées. Il fut très intéressant mais n'a pas pu être utilisé avec tout son potentiel. Le test étant nouveau, les temps de conception et de mesures furent trop restreints pour pouvoir l'affiner en fonction des premiers résultats obtenus.

Ce TFE aura été une expérience très enrichissante sur le plan personnel. J'ai pu apprendre énormément au sein d'un groupe qui repousse les limites de la précision et sait faire preuve d'ingéniosité pour répondre à des besoins uniques. Ce stage aura été l'occasion de gagner en autonomie et mettre en pratique les connaissances acquises au cours de mon cursus scolaire. Il m'aura également permis de rencontrer un chercheur de classe internationale en la personne de Cédric Villani, médaille Fields 2010.

Bibliographie

- [1] Touzé T., 2005. « Contrôle des systèmes de mesure de nivellement digital au CERN ». Travail de Fin d'Étude, École Supérieure des Géomètres et Topographes, 88 p.
- [2] Sarret J., 2006. « Vers la maîtrise des mesures des niveaux digitaux ». Travail de Fin d'Étude, École Supérieure des Géomètres et Topographes, 95 p.
- [3] Malaquin N., 2009. « Étude comparative des niveaux digitaux Leica DNA03 et Trimble DiNi12 dans le cadre de l'ESRF ». Travail de Fin d'Étude, École Supérieure des Géomètres et Topographes, 88 p.
- [4] CERN. CERN Accelerating science, [en ligne]. Disponible sur : <home.web.cern.ch>. (consulté le 8 Mars 2013)
- [5] Duquenne M., 2012. « Le laser de poursuite AT401 peut-il servir à l'alignement précis des composants des accélérateurs de particules du CERN? ». Projet de Fin d'Études, Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg, 97 p.
- [6] Leica Geosystems, version 2.0. « Leica NA2/NAK2 Mode d'emploi ».
- [7] Leica Geosystems, version 1.1. « DNA03/DNA10 Mode d'emploi ».
- [8] Trimble. « DiNi 12, 12T, 22 User Guide ».
- [9] Nedo. Technique de mesure moderne pour des applications professionnelles, [en ligne]. Disponible sur : <<http://www.nedo.com/index.pl?Lang=FRENCH&Page=products/vmg/invarlatten.html>> (consulté le 8 Mars 2013)
- [10] Rakotomalala R., 2010. « Comparaison de populations ». Cours de statistique, Université Lumière Lyon 2, 109 p. Disponible sur : <http://eric.univ-lyon2.fr/~ricco/cours/cours/Comp_Pop_Tests_Parametriques.pdf>. (consulté le 18 Avril 2013).
- [11] Rakotomalala R., 2012. « Analyse de corrélation ». Cours de statistique, Université Lumière Lyon 2, 89 p. Disponible sur : <http://eric.univ-lyon2.fr/~ricco/cours/cours/Analyse_de_Correlation.pdf>. (consulté le 19 Avril 2013).
- [12] ISO, 2001. Partie 2 : Niveaux. « Optique et instruments d'optique – Méthodes d'essai sur sites des instruments géodésiques et d'observation », ISO 17123-2. Suisse.
- [13] Birch K. P., Downs M. J.. *Correction to the Updated Edlén Equation for the Refractive Index of Air*. Metrologia, 31 May 1994, p. 315-316.
- [14] Assemblé des radiocommunications de l'UIT. « Effets de la réfraction troposphérique sur la propagation des ondes radioélectriques », Recommandation UIT-R P.834-3. Disponible sur : <http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.834-3-199910-S!!PDF-F.pdf>. (consulté le 16 Mai 2013).
- [15] Cali J., 2010. « Cours de Physique ». Cours de physique, École Supérieure des Géomètres et Topographes, 121 p

Table des annexes

Annexe 1 Caractéristiques techniques des niveaux utilisés.....	48
Annexe 2 LHC 2013 - version 1: ALLER/RETOUR - ALLER - RETOUR	49
Annexe 3 LHC 2013 - version 2: ALLER/RETOUR - ALLER - RETOUR	50
Annexe 4 Test de Levene – comparaison de k variances	51
Annexe 5 Test de Fischer – comparaison de 2 variances	53
Annexe 6 Test d'ANOVA – comparaison de k moyennes.....	54
Annexe 7 Résultats du test sur les écarts-types des systèmes niveaux-mires	56
Annexe 8 Résultats du test de collimation sur les niveaux digitaux	60
Annexe 9 Équations de correction des lectures	64

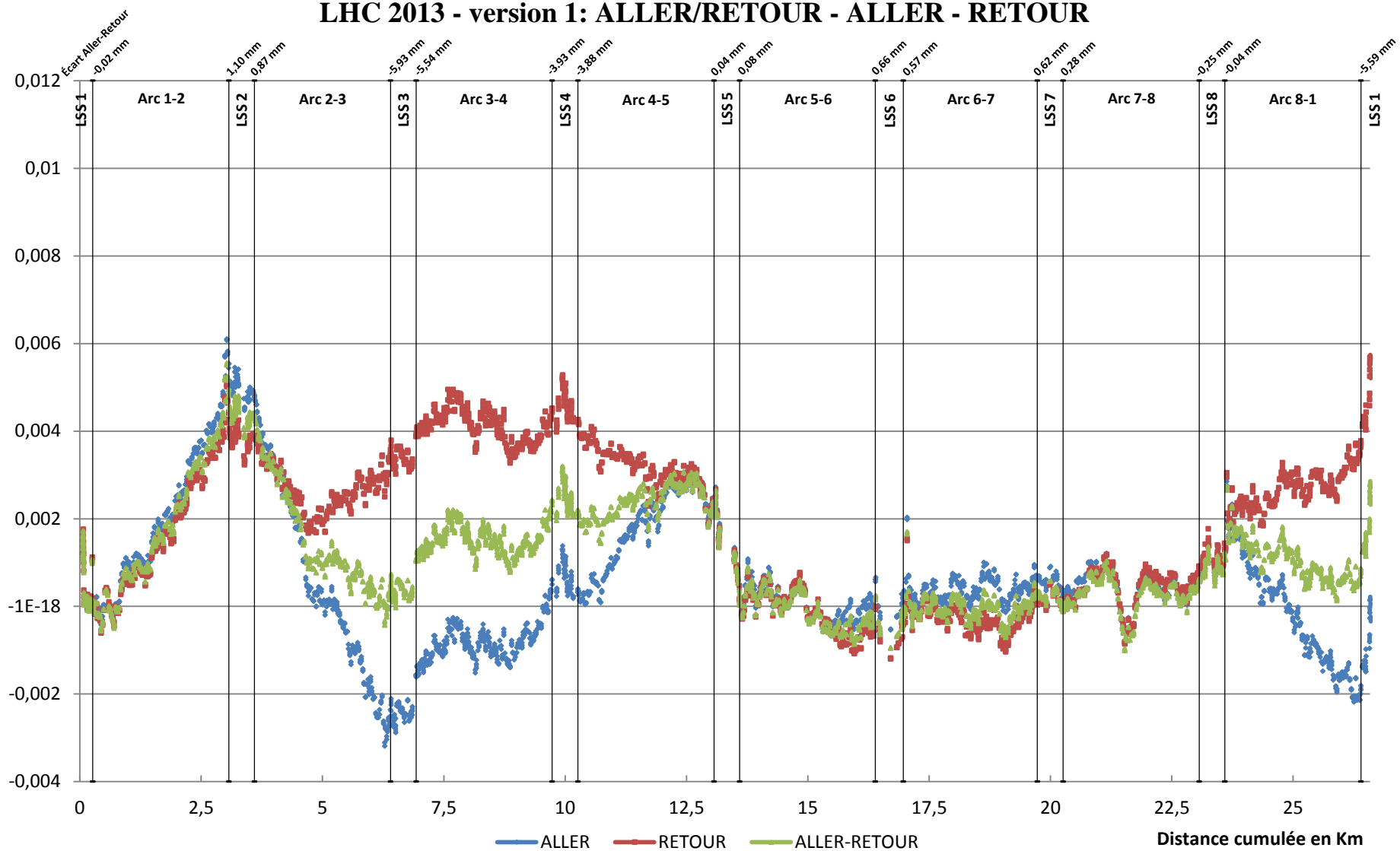
Annexe 1

Caractéristiques techniques des niveaux utilisés

Niveau Fabriquant Type	NA2 Leica Geosystems Optique	DNA03 Leica Geosystems Digital	DiNi12 Trimble Digital
Précision (Cheminement double de 1km)			
<i>Nivellement optique</i>			
Suivant mire	jusqu'à 0,7 mm	2,0 mm	1,5 mm
Avec micromètre	0,3 mm	-	-
<i>Nivellement électronique</i>			
Mire standard	-	1,0 mm	1,0 mm
Mire invar	-	0,3 mm	0,3 mm
Portée			
Mesure optique	à partir de 1,6 m	à partir de 0,6 m	à partir de 1,3 m
Mesure électronique	-	1,8 – 110 m	1,5 – 100 m
Télescope			
Grossissement	x 32	x 24	x 32
Diamètre	45 mm	36 mm	40 mm
Compensateur à pendule			
Plage	± 30'	± 10'	± 15'
Écart-type	0,3''	0,3''	0,2''
Nivelle sphérique			
Sensibilité	8' / 2 mm	8' / 2 mm	8' / 2 mm

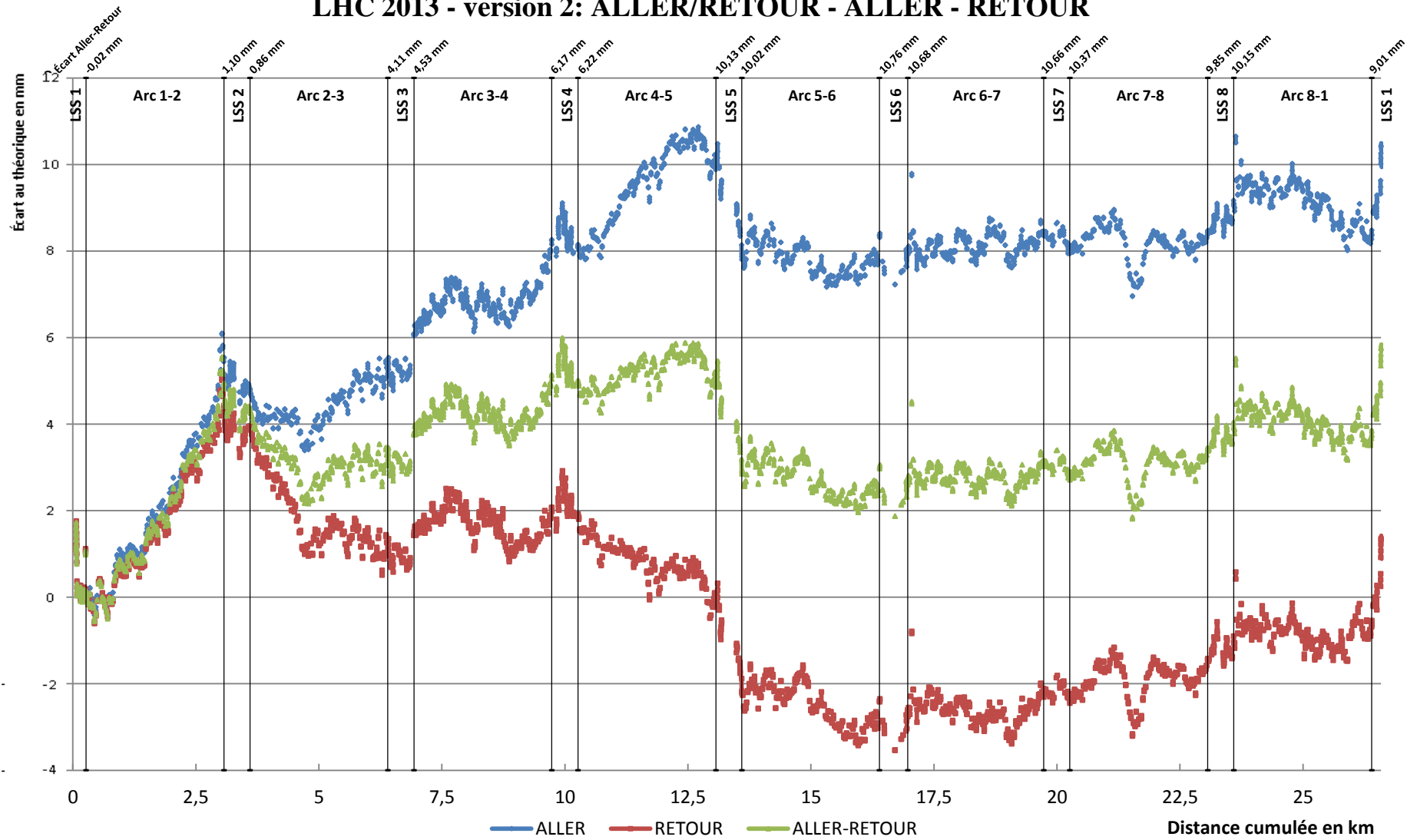
Annexe 2

LHC 2013 - version 1: ALLER/RETOUR - ALLER - RETOUR



Annexe 3

LHC 2013 - version 2: ALLER/RETOUR - ALLER - RETOUR



Annexe 4

Test de Levene – comparaison de k variances

Les formules qui suivent sont issues du cours de statistique rédigé par R. Rakotomalala [7].

- **Étape 1** : Formulation de l'hypothèse nulle et de l'hypothèse alternative

$$\begin{cases} H_0 : \text{Toutes les variances sont égales } (\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots = \sigma_K^2) \\ H_1 : \text{Au moins deux variances sont différentes} \end{cases}$$

- **Étape 2** : Choix du seuil de signification du test et de l'effectif d'échantillonnage

Le seuil de signification du test, noté α , correspond à la probabilité maximale acceptable de l'erreur. Généralement, elle est fixée à 0,05 ou 0,01.

L'effectif d'échantillonnage, noté n , est le nombre d'individu dans la population.

- **Étape 3** : Détermination de la distribution pour effectuer le test

Le test de Levene s'effectuant à partir de rapports de variances, la distribution est donc une distribution F de Fischer.

- **Étape 4** : Définition de la région critique

La région critique du test avec un risque α s'écrit :

$$W \geq F_{1-\alpha}(K-1, n-K)$$

Où K est le nombre de sous population.

- **Étape 5** : Établissement de la règle de décision

$$\begin{cases} \text{Maintien de } H_0 \text{ si } W < F_{1-\alpha}(K-1, n-K) \\ \text{Rejet de } H_0 \text{ si } W \geq F_{1-\alpha}(K-1, n-K) \end{cases}$$

- **Étape 6** : Calculs nécessaires

Le test de Levene procède en deux étapes. La première consiste en une transformation de variable :

$$z_{ik} = |x_{ij} - \bar{x}_k|$$

Où \bar{x}_k est la moyenne de la sous population.

La seconde est le calcul de la statistique W :

$$W = \frac{(n - K) \sum_{k=1}^K n_k (\bar{z}_{ik} - \bar{z})^2}{(K - 1) \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{n_k} (z_{ik} - \bar{z}_k)^2}$$

Annexe 5

Test de Fischer – comparaison de 2 variances

Les formules qui suivent sont issues du cours de statistique rédigé par R. Rakotomalala ^[7].

- **Étape 1** : Formulation de l'hypothèse nulle et de l'hypothèse alternative

$$\begin{cases} H_0 : \text{Toutes les variances sont égales } (\sigma_1^2 = \sigma_2^2) \\ H_1 : \text{Les variances sont différentes } (\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2) \end{cases}$$

- **Étape 2** : Choix du seuil de signification du test et de l'effectif d'échantillonnage

Le seuil de signification du test, noté α , correspond à la probabilité maximale acceptable de l'erreur. Généralement, elle est fixée à 0,05 ou 0,01.

L'effectif d'échantillonnage, noté n , est le nombre d'individu dans la population.

- **Étape 3** : Détermination de la distribution pour effectuer le test

Le test de Fischer s'effectuant à partir de rapports de variances, la distribution est donc une distribution F de Fischer.

- **Étape 4** : Définition de la région critique

La région critique du test avec un risque α s'écrit :

$$\begin{cases} F \leq F_{\frac{\alpha}{2}}(n_1 - 1; n_2 - 1) \\ F \geq F_{1-\frac{\alpha}{2}}(n_1 - 1; n_2 - 1) \end{cases}$$

- **Étape 5** : Établissement de la règle de décision

$$\begin{cases} \text{Maintien de } H_0 \text{ si } F_{\frac{\alpha}{2}}(n_1 - 1; n_2 - 1) < F < F_{1-\frac{\alpha}{2}}(n_1 - 1; n_2 - 1) \\ \text{Rejet de } H_0 \text{ si } F \leq F_{\frac{\alpha}{2}}(n_1 - 1; n_2 - 1) \text{ ou } F \geq F_{1-\frac{\alpha}{2}}(n_1 - 1; n_2 - 1) \end{cases}$$

- **Étape 6** : Calculs nécessaires

La statistique F s'écrit :

$$F = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2}$$

Annexe 6

Test d'ANOVA – comparaison de k moyennes

Les formules qui suivent sont issues du cours de statistique rédigé par R. Rakotomalala [7].

- **Étape 1** : Formulation de l'hypothèse nulle et de l'hypothèse alternative

$$\begin{cases} H_0 : \text{Toutes les moyennes sont égales } (\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_K) \\ H_1 : \text{Au moins deux moyennes sont différentes} \end{cases}$$

- **Étape 2** : Choix du seuil de signification du test et de l'effectif d'échantillonnage

Le seuil de signification du test, noté α , correspond à la probabilité maximale acceptable de l'erreur. Généralement, elle est fixée à 0,05 ou 0,01.

L'effectif d'échantillonnage, noté n , est le nombre d'individu dans la population.

- **Étape 3** : Détermination de la distribution pour effectuer le test

Le test d'ANOVA s'effectuant à partir de rapports de variances, la distribution est donc une distribution F de Fischer.

- **Étape 4** : Définition de la région critique

La région critique du test avec un risque α s'écrit :

$$F_{Obs} \geq F_{1-\alpha}(K - 1, n - K)$$

Où K est le nombre de sous population.

- **Étape 5** : Établissement de la règle de décision

$$\begin{cases} \text{Maintien de } H_0 \text{ si } F_{Obs} < F_{1-\alpha}(K - 1, n - K) \\ \text{Rejet de } H_0 \text{ si } F_{Obs} \geq F_{1-\alpha}(K - 1, n - K) \end{cases}$$

- **Étape 6** : Calculs nécessaires

Le résumé de la décomposition de la variance se lit le tableau d'analyse de la variance ci-après :

Source	Somme des carrés	Degré de liberté	Carrés Moyens	F
Expliquée	SCE	$K - 1$	CME	F_{Obs}
Résiduelle	SCR	$n - K$	CMR	-
Total	SCT	$n - 1$	-	-

Où la somme des carrés se calcul telle que:

$$SCE \text{ (Somme des carrés inter-classes)} = \sum_{k=1}^K n_k (\bar{x}_k - \bar{x})^2$$

$$SCR \text{ (Somme des carrés intra-classes)} = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{n_k} (x_{ik} - \bar{x}_k)^2$$

$$SCT \text{ (Somme des carrés totaux)} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = SCE + SCR$$

Où les carrés moyens se calcul tel que:

$$CME \text{ (Carrés moyens inter-classes)} = \frac{SCE}{K - 1}$$

$$CMR \text{ (Carrés moyens intra-classes)} = \frac{SCR}{n - K}$$

Où la statistique du test F se calcul tel que:

$$F_{Obs} = \frac{\frac{SCE}{K - 1}}{\frac{SCR}{n - K}} = \frac{CME}{CMR}$$

Annexe 7

Résultats du test sur les écarts-types des systèmes niveaux-mires

Mesure

Niveau : NA2

Mire : Graduée

Distance entre les deux mires : 40,90m

j	x _{A,j} mm	x _{B,j} mm	d _j mm	r _j mm	r _j ² mm ²	j	x _{A,j} mm	x _{B,j} mm	d _j mm	r _j mm	r _j ² mm ²
1	376,38	371,61	4,77	0,01	0,000	21	375,81	371,04	4,77	0,04	0,002
2	375,49	370,68	4,81	0,05	0,002	22	374,99	370,22	4,77	0,04	0,002
3	374,28	369,57	4,71	-0,05	0,003	23	375,77	370,81	4,96	0,23	0,054
4	375,03	370,30	4,73	-0,03	0,001	24	374,58	369,94	4,64	-0,09	0,008
5	374,11	369,45	4,66	-0,10	0,010	25	374,55	369,98	4,57	-0,16	0,025
6	374,93	370,24	4,69	-0,07	0,005	26	374,66	369,99	4,67	-0,06	0,003
7	374,99	370,36	4,63	-0,13	0,017	27	375,45	370,67	4,78	0,05	0,003
8	375,91	371,08	4,83	0,07	0,005	28	376,32	371,59	4,73	0,00	0,000
9	376,79	371,98	4,81	0,05	0,002	29	377,09	372,41	4,68	-0,05	0,002
10	377,61	372,80	4,81	0,05	0,002	30	378,08	373,24	4,84	0,11	0,013
11	378,51	373,68	4,83	0,07	0,005	31	378,96	374,21	4,75	0,02	0,001
12	378,60	373,82	4,78	0,02	0,000	32	378,24	373,47	4,77	0,04	0,002
13	377,90	373,10	4,80	0,04	0,002	33	377,41	372,66	4,75	0,02	0,001
14	377,12	372,30	4,82	0,06	0,004	34	376,52	371,87	4,65	-0,08	0,006
15	376,10	371,38	4,72	-0,04	0,002	35	375,60	370,90	4,70	-0,03	0,001
16	374,44	369,71	4,73	-0,03	0,001	36	374,17	369,41	4,76	0,03	0,001
17	375,04	370,37	4,67	-0,09	0,008	37	375,46	370,78	4,68	-0,05	0,002
18	375,89	371,13	4,76	0,00	0,000	38	376,22	371,55	4,67	-0,06	0,003
19	376,60	371,80	4,80	0,04	0,002	39	376,99	372,34	4,65	-0,08	0,006
20	378,28	373,43	4,85	0,09	0,008	40	377,47	372,72	4,75	0,02	0,001
Σ	7524,00	7428,79	95,21	0,00	0,08	Σ	7524,34	7429,80	94,54	0,00	0,13

$$\bar{d}_1 = 4,76$$

$$\bar{d}_2 = 4,73$$

Calcul

- Différence des moyennes $\delta = 0,03\text{mm}$
- Écart-type sur les mesures $s = 0,07\text{mm}$
- Écart-type ramené sur un cheminement double de 1km $s_{ISO-LEV} = 0,26\text{mm}$

Essais statistiques (pour un risque α de 5%)

- Écart-type expérimentale est plus petit ou égal que celui indiqué par le fabricant

$$s_{ISO-LEV} \leq \sigma \times \sqrt{\frac{\chi_{1-\alpha}^2(n-m)}{n-m}} \quad \text{soit} \quad 0,26 \leq 0,36$$

- Les deux écarts-types expérimentaux appartiennent à la même population

$$\frac{1}{F_{1-\frac{\alpha}{2}}(n-m, n-m)} \leq \frac{s^2}{\bar{s}^2} \leq F_{1-\frac{\alpha}{2}} \quad \text{soit} \quad 0,52 \leq 0,59 \leq 1,91$$

- la différence des décalages du point zéro de mire est nulle

$$|\delta| \leq s_\delta \times t_{1-\frac{\alpha}{2}}(n-m) \quad \text{soit} \quad 0,03 \leq 0,05$$

Mesure

Niveau : DNA03

Mire : CERN

Distance entre les deux mires : 40,90m

j	xA,j mm	xB,j mm	dj mm	rj mm	rj2 mm2	j	xA,j mm	xB,j mm	dj mm	rj mm	rj2 mm2
1	565,42	560,89	4,53	0,05	0,002	21	563,83	558,78	5,05	0,03	0,001
2	565,58	561,03	4,55	0,07	0,004	22	564,00	558,97	5,03	0,01	0,000
3	565,42	560,95	4,47	-0,01	0,000	23	564,07	559,06	5,01	-0,01	0,000
4	565,32	560,78	4,54	0,06	0,003	24	564,23	559,31	4,92	-0,10	0,011
5	565,26	560,72	4,54	0,06	0,003	25	564,44	559,43	5,01	-0,01	0,000
6	565,09	560,66	4,43	-0,05	0,003	26	564,54	559,55	4,99	-0,03	0,001
7	565,08	560,63	4,45	-0,03	0,001	27	564,67	559,63	5,04	0,02	0,000
8	565,12	560,71	4,41	-0,07	0,005	28	564,76	559,83	4,93	-0,09	0,009
9	565,04	560,55	4,49	0,01	0,000	29	564,92	559,88	5,04	0,02	0,000
10	564,79	560,43	4,36	-0,12	0,015	30	565,03	559,96	5,07	0,05	0,002
11	564,84	560,33	4,51	0,03	0,001	31	565,10	560,02	5,08	0,06	0,003
12	564,68	560,28	4,40	-0,08	0,007	32	565,16	560,20	4,96	-0,06	0,004
13	564,44	559,97	4,47	-0,01	0,000	33	565,28	560,31	4,97	-0,05	0,003
14	564,38	559,84	4,54	0,06	0,003	34	565,44	560,37	5,07	0,05	0,002
15	564,23	559,69	4,54	0,06	0,003	35	565,57	560,43	5,14	0,12	0,013
16	564,08	559,63	4,45	-0,03	0,001	36	565,64	560,65	4,99	-0,03	0,001
17	563,96	559,44	4,52	0,04	0,001	37	565,90	560,81	5,09	0,07	0,004
18	563,78	559,27	4,51	0,03	0,001	38	566,02	560,94	5,08	0,06	0,003
19	563,52	559,02	4,50	0,02	0,000	39	566,09	561,08	5,01	-0,01	0,000
20	563,40	558,95	4,45	-0,03	0,001	40	566,30	561,30	5,00	-0,02	0,001
Σ	11293,43	11203,77	89,66	0,00	0,06	Σ	11300,99	11200,51	100,48	0,00	0,06

$$\bar{d}_1 = 4,48$$

$$\bar{d}_2 = 5,02$$

Calcul

- Différence des moyennes $\delta = -0,54\text{mm}$
- Écart-type sur les mesures $s = 0,06\text{mm}$
- Écart-type ramené sur un cheminement double de 1km $s_{ISO-LEV} = 0,19\text{mm}$

Essais statistiques (pour un risque de 5%)

- Écart-type expérimentale est plus petit ou égal que celui indiqué par le fabricant

$$s_{ISO-LEV} \leq \sigma \times \sqrt{\frac{\chi^2_{1-\alpha}(n-m)}{n-m}} \quad \text{soit} \quad 0,19 \leq 0,36$$

- Les deux écarts-types expérimentaux appartiennent à la même population

$$\frac{1}{F_{1-\frac{\alpha}{2}}(n-m, n-m)} \leq \frac{s^2}{\bar{s}^2} \leq F_{1-\frac{\alpha}{2}} \quad \text{soit} \quad 0,52 \leq 0,95 \leq 1,91$$

- la différence des décalages du point zéro de mire est nulle

$$|\delta| \leq s_\delta \times t_{1-\frac{\alpha}{2}}(n-m) \quad \text{soit} \quad 0,54 \leq 0,03$$

Mesure

Niveau : DNA03

Mire : Nedo

Distance entre les deux mires : 40,90m

j	x _{A,i} mm	x _{B,i} mm	d _i mm	r _i mm	r _i ² mm ²	j	x _{A,i} mm	x _{B,i} mm	d _i mm	r _i mm	r _i ² mm ²
1	538,70	534,16	4,54	-0,22	0,048	21	538,36	533,67	4,69	-0,03	0,001
2	538,00	533,27	4,73	-0,03	0,001	22	537,79	533,11	4,68	-0,04	0,001
3	537,59	532,76	4,83	0,07	0,005	23	537,22	532,57	4,65	-0,07	0,005
4	536,92	532,26	4,66	-0,10	0,010	24	536,65	531,91	4,74	0,02	0,000
5	536,29	531,47	4,82	0,06	0,004	25	535,82	531,15	4,67	-0,05	0,002
6	536,42	531,73	4,69	-0,07	0,005	26	536,85	532,19	4,66	-0,06	0,003
7	537,28	532,60	4,68	-0,08	0,006	27	537,71	532,94	4,77	0,05	0,003
8	538,11	533,30	4,81	0,05	0,003	28	538,46	533,76	4,70	-0,02	0,000
9	538,81	534,02	4,79	0,03	0,001	29	539,17	534,47	4,70	-0,02	0,000
10	539,59	534,77	4,82	0,06	0,004	30	539,96	535,31	4,65	-0,07	0,005
11	540,39	535,63	4,76	0,00	0,000	31	540,72	535,96	4,76	0,04	0,002
12	541,12	536,24	4,88	0,12	0,015	32	541,40	536,68	4,72	0,00	0,000
13	541,82	536,97	4,85	0,09	0,008	33	541,81	537,11	4,70	-0,02	0,000
14	540,72	535,93	4,79	0,03	0,001	34	541,11	536,23	4,88	0,16	0,026
15	540,37	535,59	4,78	0,02	0,000	35	540,03	535,35	4,68	-0,04	0,001
16	539,79	535,06	4,73	-0,03	0,001	36	539,62	534,79	4,83	0,11	0,013
17	539,31	534,55	4,76	0,00	0,000	37	539,11	534,36	4,75	0,03	0,001
18	538,86	534,04	4,82	0,06	0,004	38	538,57	533,78	4,79	0,07	0,005
19	538,13	533,41	4,72	-0,04	0,001	39	538,24	533,63	4,61	-0,11	0,012
20	537,82	533,11	4,71	-0,05	0,002	40	537,67	532,94	4,73	0,01	0,000
Σ	10776,04	10680,87	95,17	0,00	0,12	Σ	10776,27	10681,91	94,36	0,00	0,08

$$\bar{d}_1 = 4,76$$

$$\bar{d}_2 = 4,72$$

Calcul

- Différence des moyennes $\delta = 0,04\text{mm}$
- Écart-type sur les mesures $s = 0,07\text{mm}$
- Écart-type ramené sur un cheminement double de 1km $s_{ISO-LEV} = 0,25\text{mm}$

Essais statistiques (pour un risque α de 5%)

- Écart-type expérimentale est plus petit ou égal que celui indiqué par le fabricant

$$s_{ISO-LEV} \leq \sigma \times \sqrt{\frac{\chi^2_{1-\alpha}(n-m)}{n-m}} \quad \text{soit} \quad 0,25 \leq 0,36$$

- Les deux écarts-types expérimentaux appartiennent à la même population

$$\frac{1}{F_{1-\frac{\alpha}{2}}(n-m, n-m)} \leq \frac{s^2}{\bar{s}^2} \leq F_{1-\frac{\alpha}{2}} \quad \text{soit} \quad 0,52 \leq 1,46 \leq 1,91$$

- la différence des décalages du point zéro de mire est nulle

$$|\delta| \leq s_\delta \times t_{1-\frac{\alpha}{2}}(n-m) \quad \text{soit} \quad 0,04 \leq 0,05$$

Mesure

Niveau : DiNi12

Mire : Nedo

Distance entre les deux mires : 40,90m

j	x _{A,i} mm	x _{B,i} mm	d _i mm	r _i mm	r _i ² mm ²	j	x _{A,i} mm	x _{B,i} mm	d _i mm	r _i mm	r _i ² mm ²
1	575,37	570,26	5,11	-0,10	0,010	21	575,57	570,34	5,23	0,00	0,000
2	575,70	570,52	5,18	-0,03	0,001	22	575,54	570,41	5,13	-0,10	0,010
3	575,92	570,72	5,20	-0,01	0,000	23	576,27	571,05	5,22	-0,01	0,000
4	576,49	571,30	5,19	-0,02	0,000	24	576,73	571,53	5,20	-0,03	0,001
5	576,98	571,84	5,14	-0,07	0,005	25	577,27	572,06	5,21	-0,02	0,000
6	576,89	571,69	5,20	-0,01	0,000	26	577,10	571,94	5,16	-0,07	0,005
7	577,43	572,20	5,23	0,02	0,000	27	577,68	572,43	5,25	0,02	0,000
8	577,88	572,64	5,24	0,03	0,001	28	578,03	572,79	5,24	0,01	0,000
9	578,27	573,09	5,18	-0,03	0,001	29	577,74	572,60	5,14	-0,09	0,008
10	577,60	572,33	5,27	0,06	0,004	30	577,24	572,08	5,16	-0,07	0,005
11	577,11	571,67	5,44	0,23	0,054	31	576,82	571,51	5,31	0,08	0,007
12	576,58	571,32	5,26	0,05	0,003	32	576,87	571,59	5,28	0,05	0,003
13	576,51	571,39	5,12	-0,09	0,008	33	576,32	571,01	5,31	0,08	0,007
14	576,17	570,97	5,20	-0,01	0,000	34	575,78	570,55	5,23	0,00	0,000
15	575,59	570,41	5,18	-0,03	0,001	35	575,41	570,16	5,25	0,02	0,000
16	575,18	569,96	5,22	0,01	0,000	36	574,91	569,70	5,21	-0,02	0,000
17	574,72	569,52	5,20	-0,01	0,000	37	574,48	569,16	5,32	0,09	0,008
18	574,19	569,00	5,19	-0,02	0,000	38	573,94	568,70	5,24	0,01	0,000
19	573,74	568,53	5,21	0,00	0,000	39	573,55	568,28	5,27	0,04	0,002
20	573,33	568,13	5,20	-0,01	0,000	40	573,12	567,90	5,22	-0,01	0,000
Σ	11521,65	11417,49	104,16	0,00	0,09	Σ	11520,37	11415,79	104,58	0,00	0,06

$$\bar{d}_1 = 5,21$$

$$\bar{d}_2 = 5,23$$

Calcul

- Différence des moyennes $\delta = -0,02\text{mm}$
- Écart-type sur les mesures $s = 0,06\text{mm}$
- Écart-type ramené sur un cheminement double de 1km $s_{ISO-LEV} = 0,21\text{mm}$

Essais statistiques (pour un risque α de 5%)

- Écart-type expérimentale est plus petit ou égal que celui indiqué par le fabricant

$$s_{ISO-LEV} \leq \sigma \times \sqrt{\frac{\chi^2_{1-\alpha}(n-m)}{n-m}} \quad \text{soit} \quad 0,21 \leq 0,36$$

- Les deux écarts-types expérimentaux appartiennent à la même population

$$\frac{1}{F_{1-\frac{\alpha}{2}}(n-m, n-m)} \leq \frac{s^2}{\bar{s}^2} \leq F_{1-\frac{\alpha}{2}} \quad \text{soit} \quad 0,52 \leq 1,57 \leq 1,91$$

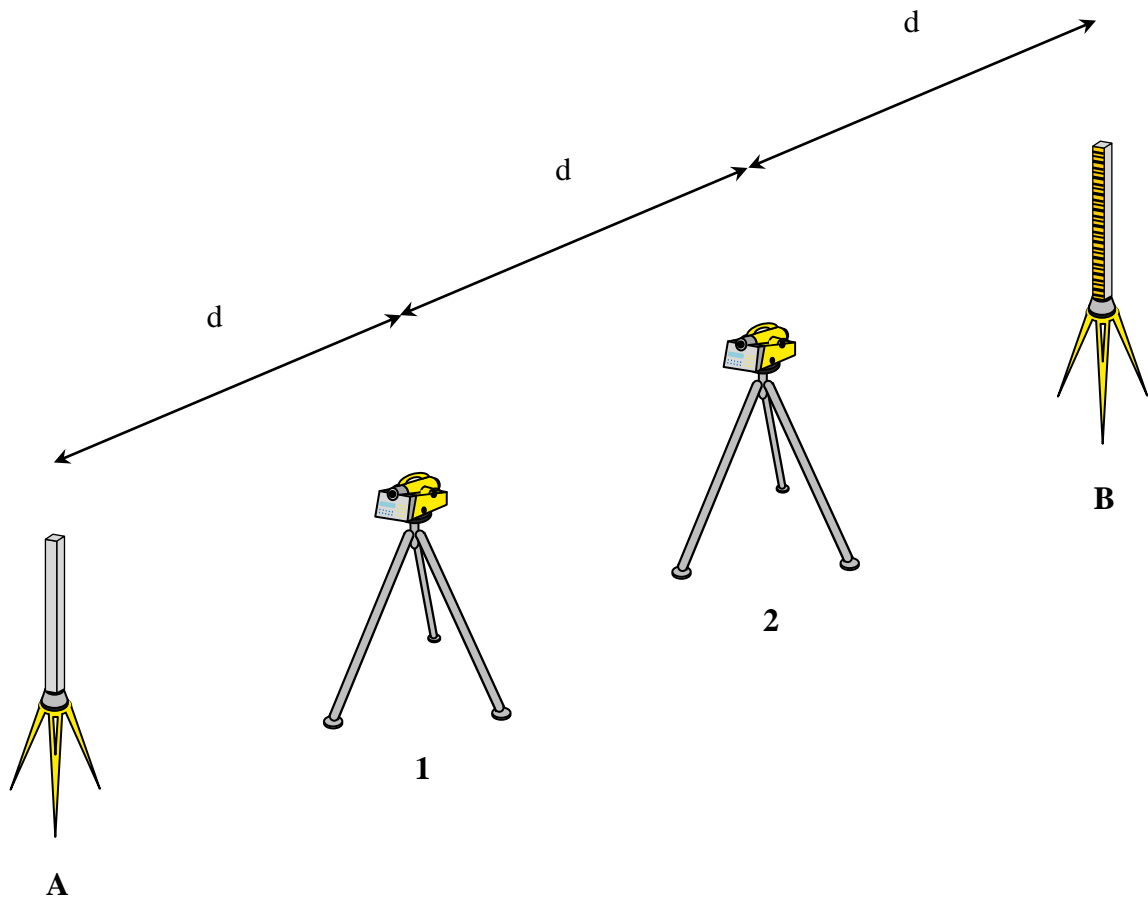
- la différence des décalages du point zéro de mire est nulle

$$|\delta| \leq s_\delta \times t_{1-\frac{\alpha}{2}}(n-m) \quad \text{soit} \quad 0,02 \leq 0,04$$

Annexe 8

Résultats du test de collimation sur les niveaux digitaux

Méthode Förstner

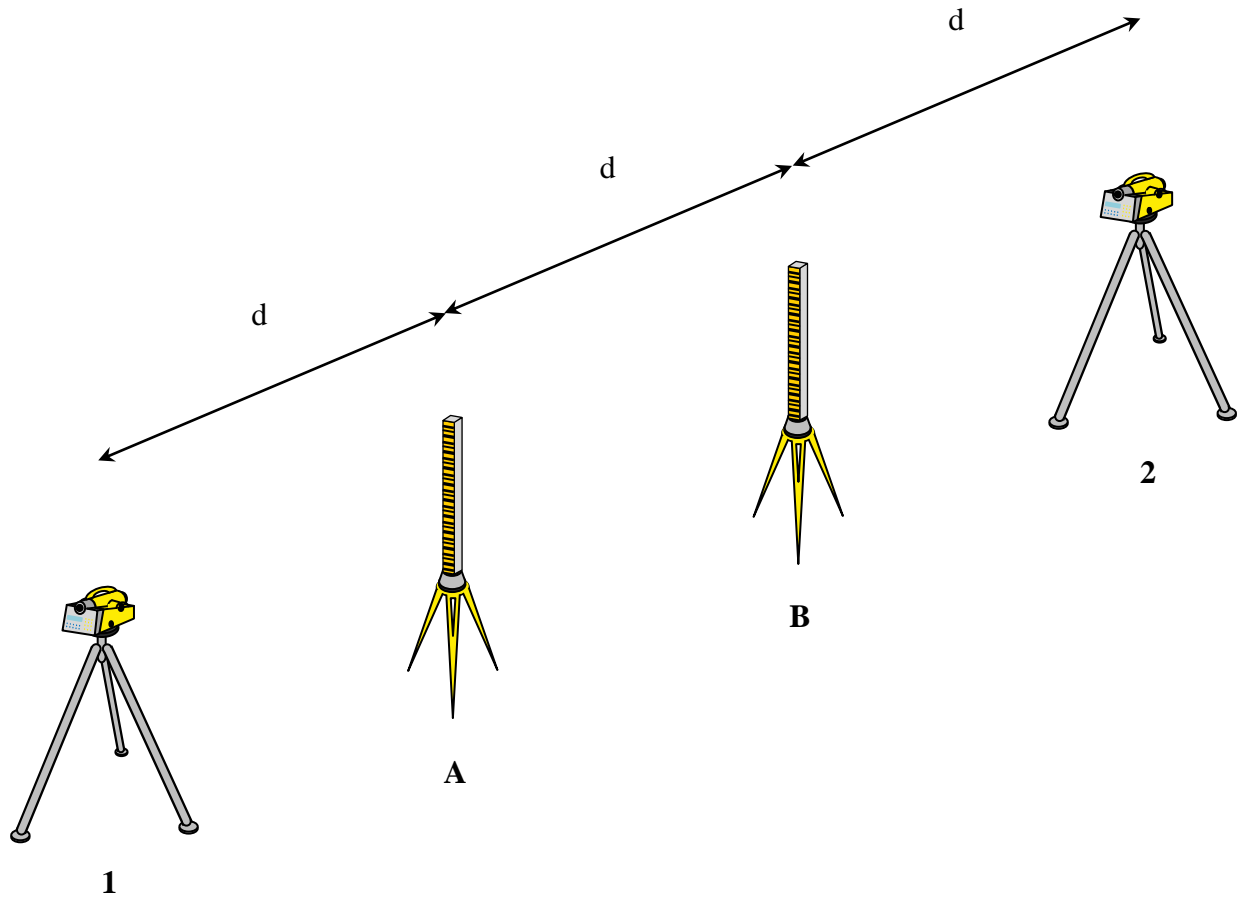


Distance d : 13,63m ± 0,03m

Mesure	DNA03	DiNi12
1	-5,1''	-2,5''
2	-5,2''	-1,3''
3	-6,6''	-2,4''
4	-3,9''	-2,8''
5	-6,3''	-1,5''
6	-6,7''	-2,3''
7	-7,6''	-1,4''
8	-6,5''	-0,1''
9	-6,5''	-1,9''
10	-3,8''	-1,6''

Moyenne	-5,8''	-1,8''
Écart-type	1,3''	0,8''

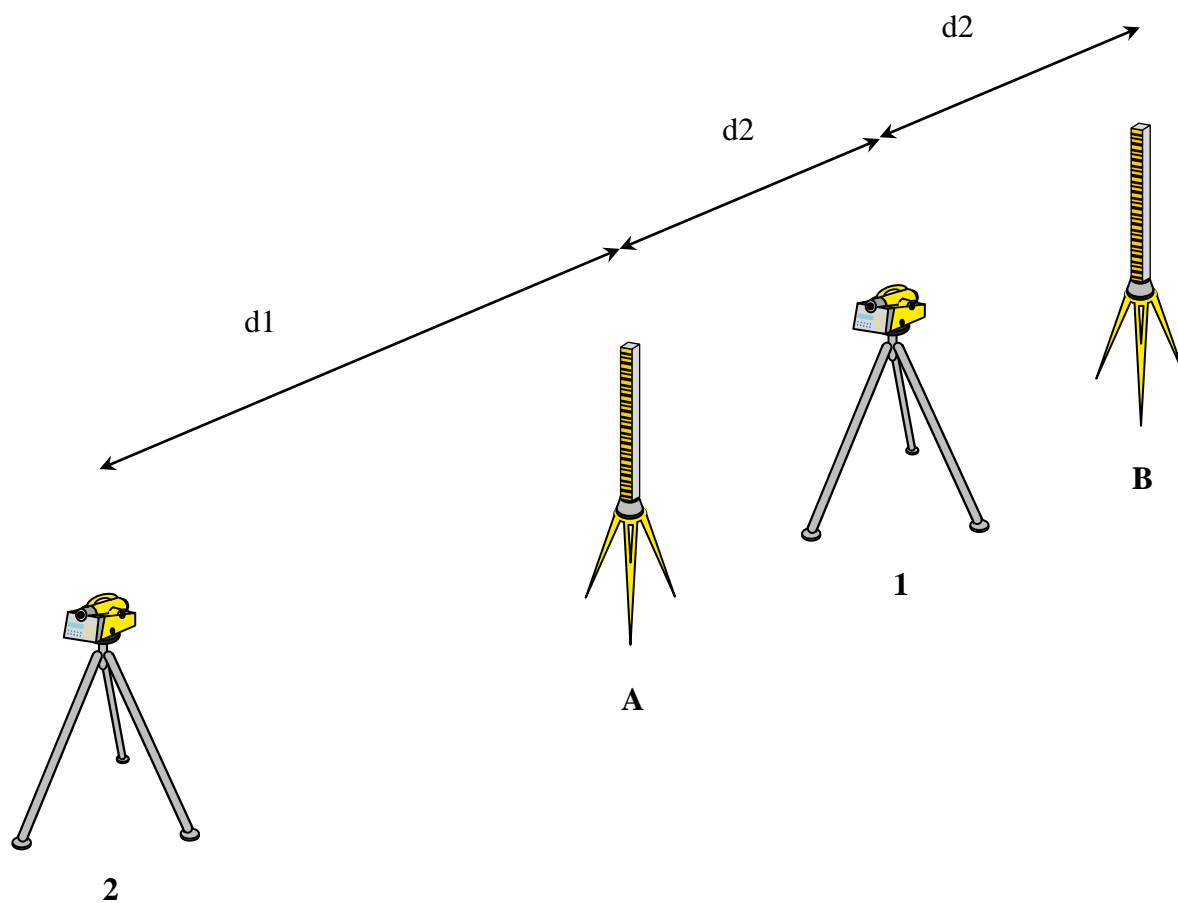
Méthode Näbauer



Distance d : 13,38m ± 0,03m

Mesure	DNA03	DiNi12
1	-5,4''	-1,3''
2	-3,5''	-2,9''
3	-4,4''	-2,1''
4	-3,4''	-3,0''
5	-4,2''	-2,9''
6	-5,8''	-2,4''
7	-2,3''	-1,4''
8	-5,9''	-3,4''
9	-3,4''	-1,4''
10	-6,9''	-2,0''
Moyenne	-4,5''	-2,3''
Écart-type	1,4''	0,8''

Méthode Kukkamäki



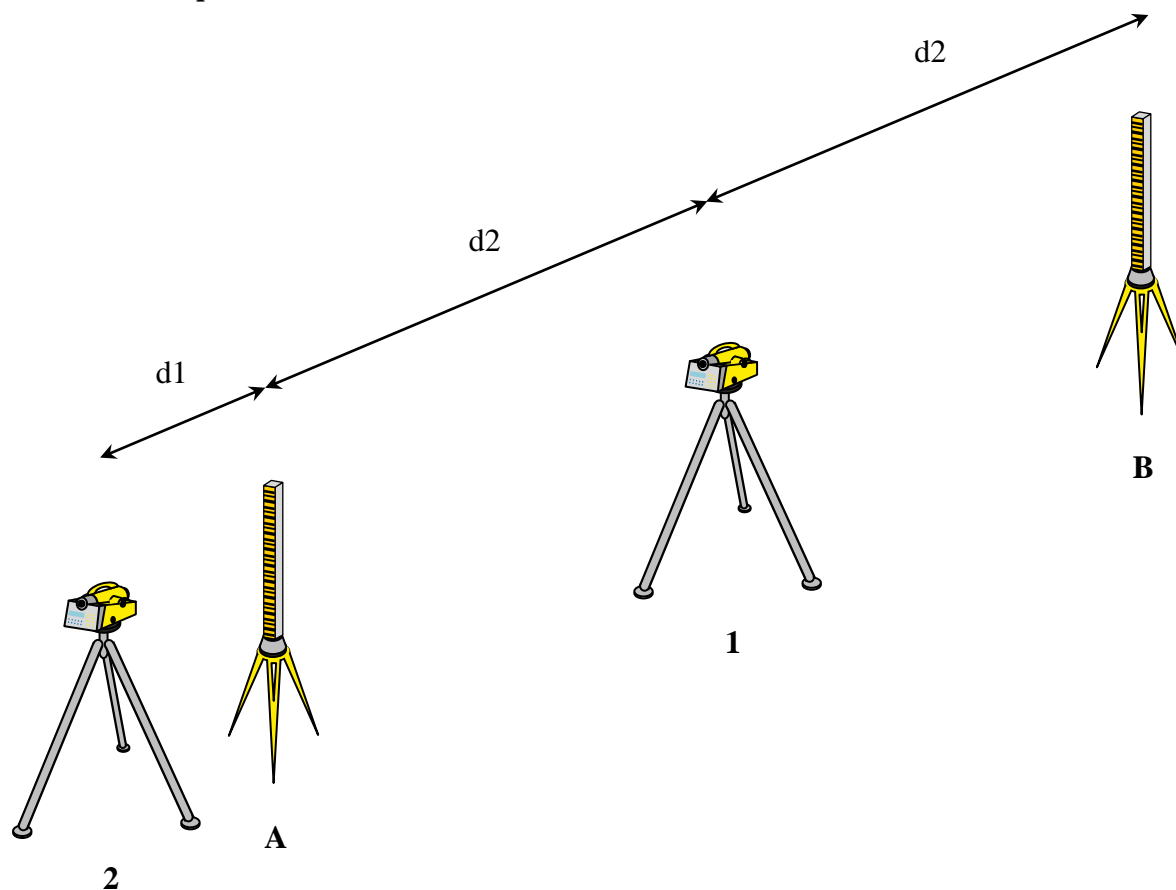
Distance d1 : 20,29m ± 0,03m

Distance d2 : 10,14m ± 0,03m

Mesure	DNA03	DiNi12
1	-9,4''	-0,1''
2	-4,9''	-0,7''
3	-6,2''	-0,9''
4	-8,1''	-2,7''
5	-8,1''	-0,9''
6	-8,9''	-2,3''
7	-6,1''	-2,9''
8	-9,1''	-1,0''
9	-8,2''	-2,2''
10	-10,0''	-3,0''

Moyenne	-7,9''	-1,7''
Écart-type	1,6''	1,1''

Méthode Japonaise



Distance d1 : 15,01m ± 0,03m

Distance d2 : 2,52m ± 0,03m

Mesure	DNA03	DiNi12
1	-5,1''	-1,0''
2	-7,2''	-0,9''
3	-1,8''	-0,3''
4	-3,3''	-1,2''
5	-5,4''	-0,3''
6	-8,0''	0,8''
7	-7,3''	0,7''
8	-4,2''	0,0''
9	-4,9''	1,2''
10	-6,5''	-0,5''

Moyenne	-5,4''	-0,2''
Écart-type	1,9''	0,8''

Annexe 9

Équations de correction des lectures

- **Étape 1 :** Calcul des indices de réfraction n selon la correction de l'équation modifiée d'Edlén tel que l'évoque K.P. Birch et M. J. Downs [13].

L'équation de dispersion, en fonction de la longueur d'onde λ (en μm) s'écrit :

$$(n - 1)_s \times 10^8 = 8342,54 + 2406147 \times \left(130 - \frac{1}{\lambda^2}\right)^{-1} + 15998 \times \left(38,9 - \frac{1}{\lambda^2}\right)^{-1}$$

L'équation permettant de calculer l'indice de réfraction de l'air, à partir de la température t (en $^\circ\text{C}$) et de la pression (en Pa), est :

$$(n - 1)_{tp} = \frac{p \times (n - 1)_s}{96095,43} \times \frac{[1 + (0,601 - 0,00972 \times t \times p) \times 10^{-8}]}{(1 + 0,0036610 \times t)}$$

L'équation permettant d'intégrer la pression de la vapeur d'eau f (en Pa) dans le calcul de l'indice est :

$$(n - 1)_{tpf} = (n - 1)_{tp} - f \times \left(3,7345 - 0,0401 \times \frac{1}{\lambda^2}\right) \times 10^{-10}$$

La pression de vapeur d'eau dans l'air peut s'obtenir à partir du pourcentage d'humidité dans l'air R_h (en %) et de la température t (en $^\circ\text{C}$) tel que le mentionne J.W. Marini et C.W. Murray dans «Correction of Laser range tracking data for atmospheric refraction at elevation above 10 degrees».

$$f = \frac{R_h}{100} \times 6,11 \times 10^{\frac{7,5 \times t}{237,3 + t}}$$

- **Étape 2 :** Calcul du rayon de courbure du rayon lumineux ρ tel que le mentionne l'Assemblée des radiocommunications de l'UIT [14].

$$\rho = -\frac{n}{\cos(\varphi)} \times \frac{1}{\nabla n} = -\frac{n}{\cos(\varphi)} \times \frac{dh}{dn}$$

- **Étape 3 :** Calcul du module de réfraction atmosphérique mra et la correction à apporter à la lecture brute tel que l'indique J. Cali [15] dans le cours d'optique enseigné à l'École Supérieur des Géomètres et Topographes.

L'équation du module de réfraction atmosphérique dépend du rayon de la Terre R_T et du rayon de courbure du rayon lumineux ρ .

$$mra = \frac{R_T}{\rho}$$

L'équation de la correction sur les lectures Δh est fonction du module de réfraction atmosphérique mra , de la longueur de la portée dh et du rayon de la Terre R_T .

$$\Delta h = mra \times \frac{dh^2}{2 \times R_T}$$

Liste des figures

Figure 1 : Schéma des accélérateurs du CERN	iii
Figure 2 : Schéma du LHC	3
Figure 3 : Schéma d'un secteur du LHC	3
Figure 4 : Schéma des fiducielles	4
Figure 5 : Représentation de la séquence standard utilisée pour l'écartométrie	5
Figure 6 : Niveau NA2 de Leica.....	6
Figure 7 : Niveau DNA03 de Leica.....	6
Figure 8 : Niveau DiNi12 de Trimble	7
Figure 9 : Mire à queue.....	7
Figure 10 : Représentation de la séquence standard utilisée pour le nivellement rapide du LHC	9
Figure 11 : Représentation de la séquence standard utilisée pour le nivellement de lissage du LHC	10
Figure 12 : Schéma du contrôle de marche	10
Figure 13 : Écart au théorique de l'ajustement de l'ensemble du LHC	14
Figure 14 : Écart au théorique de l'ajustement avec les reprises de l'ensemble du LHC ...	15
Figure 15 : Comparaison des nivellements réalisés sur le secteur 3-4	16
Figure 16 : Schéma des dénivelées utilisées dans la comparaison des systèmes	18
Figure 17 : Comparaison de répartition à l'aide de boîtes à moustache.....	19
Figure 18 : Écart des valeurs de collimation entre le début et la fin de journée.....	24
Figure 19 : Schéma de la mesure d'une jauge à Tilt	25
Figure 20 : Analyse de la dispersion à l'aide de boîte à moustache.....	27
Figure 21 : Schéma du dispositif de mesure de l'écart-type instrumental.....	29
Figure 22 : Schéma du dispositif de mesure longue durée	35
Figure 23 : Comparaison du test longue durée sur les alésages "Tilt" et "Sortie"	36
Figure 24 : Relation entre l'évolution de la température et les lectures	37
Figure 25 : Schéma de la déviation des rayons lumineux en fonction de l'indice	38
Figure 26 : Schéma de la déviation des lectures.....	38
Figure 27 : Relation entre l'évolution de la température et les lectures	39
Figure 28 : Influence du flamboiement sur les lectures de nivellement.....	40
Figure 29 : Répartition des lectures	40

Liste des tableaux

Tableau 1 : Tableau des fermetures des nivellements par LSS et Arc exprimées en millimètre	13
Tableau 2 : Tableau des fermetures après reprise des secteurs 2-3 et 8-1 exprimées en millimètre	14
Tableau 3 : Tableau des premiers indicateurs de précision	17
Tableau 4 : Tableau statistique après centrage des données.....	19
Tableau 5 : Tableau d'analyse de la variance.....	20
Tableau 6 : Tableau des statistiques du test de Fischer	21
Tableau 7 : Tableau statistique après centrage des données sans le système DiNi12-mire	21
Tableau 8 : Tableau des coefficients de corrélation	22
Tableau 9 : Tableau des écarts-types a posteriori.....	23
Tableau 10 : Tableau statistique de la comparaison avec la jauge à Tilt exprimé en millimètre	26
Tableau 11 : Tableau statistique de la comparaison des ajustements avec et sans la jauge à Tilt	28
Tableau 12 : Tableau de la comparaison des écarts-types des systèmes	30
Tableau 13 : Tableau des décalages du point zéro des mires	31
Tableau 14 : Tableau des résultats de la collimation en fonction des méthodes	32

Résumé

Lors de la dernière décennie, plusieurs études ont été réalisées au CERN pour appréhender les niveaux digitaux. Bien que la maîtrise de ces appareils soit dorénavant acquise, des problèmes mal identifiés perturbent les nivellements actuels dans les tunnels des accélérateurs. Afin de répondre à cette problématique, les équipes de la section Survey du CERN ont décidé de profiter du « Long Shut-down 1 », débuté en Février 2013, pour tester des systèmes niveaux-mires non plus en laboratoire mais dans les conditions réelles du tunnel.

Ainsi deux niveaux digitaux ont été choisis pour l'étude. Le premier, actuellement utilisé au CERN, est le DNA03 de la gamme Leica qui a été associé à des mires éclairées développées au CERN et par l'entreprise Nedo. Le deuxième, prêté par l'École Supérieure des Géomètres et Topographes, est le DiNi12 de la marque Trimble qui a été couplé avec une mire éclairée Nedo. Un niveau optique a également fait partie de la comparaison. Il s'agit du NA2 de Leica, niveau couramment utilisé par les équipes de géomètres du CERN. Ces différents niveaux ont un écart-type kilométrique théorique identique d'après les constructeurs.

Cette étude fut l'occasion de vérifier d'autres hypothèses pouvant expliquer les résultats obtenus lors des nivellements des accélérateurs de particules. Celles-ci sont liées aux conditions atmosphériques rencontrées dans les tunnels et engendrées par les aimants ou la ventilation. La première repose sur une possible perturbation des lectures passant au-dessus des aimants due à un gradient de température. La deuxième hypothèse pose la question de l'incidence de l'évolution des conditions atmosphériques sur les lectures. Enfin, la dernière, concernant l'influence du phénomène de flamboiement dû à la ventilation sur la dispersion des lectures, n'est pas vraiment à vérifier mais plutôt à quantifier.

I. Comparaison des systèmes niveaux-mires

La première des comparaisons repose sur les résultats de nivellements opérationnels effectués dans une portion d'environ 3km du tunnel de l'accélérateur du LHC (Large Hadron Collider). Elle est réalisée sur les quatre systèmes présentés auparavant en utilisant la même méthodologie que celle des nivellements des accélérateurs. Ainsi, la portion a été nivelée suivant un cheminement dit de Cholesky en cheminement « Aller-Retour ».

L'analyse des fermetures « Aller-Retour » ou des contrôles de marche donne une première indication concernant la qualité des quatre nivellements mais n'est pas suffisante pour classer les systèmes suivant leur degré de précision. Il a donc été décidé de passer par les analyses statistiques relatives à la comparaison de population et au coefficient de corrélation. La première permet de déterminer si les données issues de tous les systèmes appartiennent à la même population. Cette hypothèse revient à dire quand mélangeant les données, seul de minimes changements seraient visibles lors de

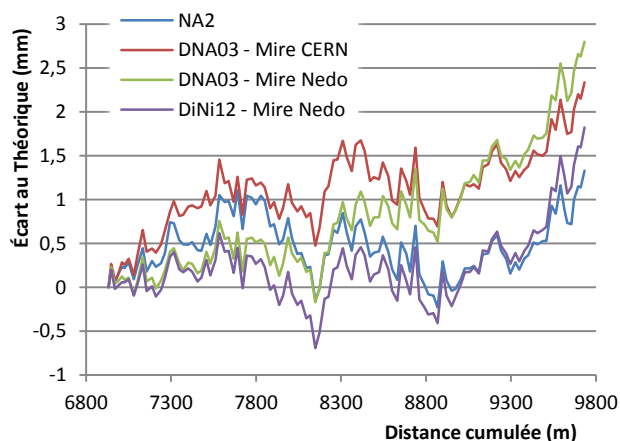


Figure 1 : Comparaison des nivellements réalisés sur le secteur 3-4

l'ajustement. La deuxième analyse sert à quantifier la force de la relation existante entre deux systèmes suivant les altitudes ajustées.

À l'issue de la comparaison de population, seul le système du niveau digital DiNi12 ne fait pas partie d'une population commune avec les trois autres systèmes. La raison de cette mise à l'écart est due à un écart-type plus faible que les autres. L'analyse sur la corrélation des résultats entre les systèmes montre que les systèmes composés par les niveaux digitaux sont assez proche avec des coefficients aux alentours de 80-85%. En revanche, le système du niveau optique NA2 est moins corrélé à ces congénères avec une moyenne se situant à 60%. Les résultats entre les niveaux digitaux et les niveaux optiques sont sensiblement différents, mais ces deux analyses ne permettent pas à elles seules de déterminer avec exactitude le meilleur système. En couplant ces résultats avec ceux des contrôles de marches, différence entre deux dénivelées mesurées à partir de deux stations différentes, il est possible d'affirmer que les niveaux digitaux sont légèrement meilleurs. En effet, ces contrôles étaient sensiblement moins performants pour le niveau optique NA2.

La comparaison des systèmes niveaux-mires aura été l'occasion de relever deux problèmes. Ils concernent l'écart-type constructeur et collimation des niveaux digitaux. À la suite des ajustements des observations de nivellement, il est apparu que l'écart-type constructeur était pessimiste compte tenu des résultats et cela pour l'ensemble des systèmes. La deuxième remarque fait part d'un manque de stabilité de la mesure de collimation des niveaux digitaux effectuée en début et fin de journée. Ainsi des tests complémentaires ont été réalisés pour vérifier ces deux observations.

Afin d'obtenir l'écart-type des systèmes, la détermination de celui-ci a été effectuée suivant la méthodologie préconisée par la norme internationale ISO dans des conditions similaires à celles des tunnels. Les résultats obtenus à l'issue du test sont comparables à ceux envisagés après l'ajustement des mesures. Cette observation est probablement due aux conditions atmosphériques généralement plus stable dans le tunnel quand extérieur dans lesquelles les niveaux sont également utilisés.

Méthode	Förstner	Näbauer	Kukkamäki	Japonaise
<i>Moyenne</i>				
DNA03	-5,8"	-4,5"	-7,9"	-5,4"
DiNi12	-1,8"	-2,3"	-1,7"	-0,2"
<i>Écart-type</i>				
DNA03	1,3"	1,4"	1,6"	1,9"
DiNi12	0,8"	0,8"	1,1"	0,8"
<i>Amplitude</i>				
DNA03	3,8"	4,6"	5,1"	6,2"
DiNi12	2,7"	2,1"	2,9"	2,4"

Figure 2 : Tableau des résultats de la collimation en fonction des méthodes

Concernant la collimation des niveaux digitaux, elle est déterminée à l'aide d'un programme interne aux appareils suivant quatre méthodes possibles. Ainsi un test de répétabilité de la mesure a été réalisé pour chacun des deux niveaux et pour chacune des quatre méthodes. Les deux niveaux digitaux sont touchés

par ce problème de stabilité et engendre des erreurs pouvant atteindre quelques centièmes voir dixièmes de millimètre sur une dénivelée lorsque l'égalité des portées n'est pas respectée. Le niveau DNA03 est quasiment deux fois plus sensible à ce phénomène que son concurrent le DiNi12. Il est donc important de privilégier le DiNi12 lors de nivellement ne pouvant être réalisé avec le respect de l'égalité des portées.

II. Test des hypothèses

Dans le but de tester les différentes hypothèses (dispersion des mesures suivant la position de la mire par rapport à l'aimant, en fonction de l'évolution des conditions

atmosphériques ou de la ventilation), l'idée de mesurer le même point sur une période assez longue a été émise. En couplant ces observations avec les mesures des paramètres atmosphériques sur la même période et le même intervalle ou en le réalisant à différentes positions du tunnel, le test a permis de répondre à ces questions.

Pour l'hypothèse évoquant une plus grande dispersion sur les mesures passant au-dessus de l'aimant, les test n'ont pas permis de l'affirmer. La comparaison de l'évolution entre des observations passant et ne passant pas au-dessus de l'aimant montre des résultats similaires. Ainsi, l'incidence d'un gradient de température provoqué par l'aimant peut être réfutée.

En ce qui concerne le lien entre l'évolution des paramètres atmosphériques et celles des observations, les graphiques laissaient présager d'une corrélation assez importante. Pourtant en essayant de corriger les mesures à partir d'un modèle mathématique, la dispersion est plus importante. Ceci peut provenir d'une résolution trop faible des capteurs météorologique ou du modèle mathématique pas approprié pour corriger des erreurs de quelques centièmes de millimètre. L'évolution des paramètres atmosphériques étant relativement lent par rapport à la durée d'une station, elle ne devrait pas avoir d'influence dans les mesures.

Le phénomène de flamboiement dû à la ventilation n'est pas à prouver et son influence sur les mesures non plus. Lors des nivellements réalisés avec les niveaux optiques NA2, les opérateurs se sont rapidement plaints de cela à différent endroit du tunnel. L'intérêt de ce test était de quantifier la dispersion induise par celui-ci. Les résultats ont montré une dispersion de plus ou moins 12 centièmes de millimètre à proximité d'un point d'extrusion. Pour une moyenne de trois mesures successives, actuellement réalisée pour les niveaux digitaux, la dispersion est de 9 centièmes. En réalisant une moyenne de neuf mesures, celle-ci passe à 5 centièmes. La solution est donc de moyenner les mesures sur une plus grande série dans ces endroits pour réduire ce phénomène.

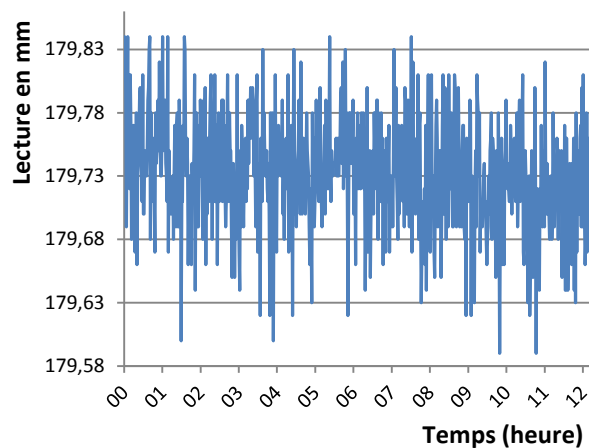


Figure 3 : Influence de la ventilation sur les lectures de nivellement

III. Conclusions

Suite à l'ensemble de cette étude, des évolutions sont envisagées dans la méthodologie des nivellements pour l'avenir. Ainsi, les niveaux digitaux seront privilégiés compte tenu des résultats sur la comparaison des systèmes. Ils présentent également le double avantage d'être plus efficace et d'apporter un confort de travail aux opérateurs. Pour les nivellements où l'égalité des portées ne pourra pas être respectée, le niveau DiNi12 devra être privilégié pour pallier la moins grande stabilité de la mesure de collimation du DNA03.

Concernant les hypothèses testées, seul des solutions relatives à celle de la ventilation seront étudiées. Si la répétition des mesures permet de limiter le phénomène, un arrêt de la ventilation serait probablement plus efficace. Cette dernière solution pourrait être compliquée à mettre en place pour des raisons de sécurité.

Nivellement des accélérateurs de particules au CERN

Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M., Le Mans 2013

RESUME

De nombreuses études ont été réalisées au cours des dernières décennies pour comprendre les résultats des niveaux digitaux afin de remplacer à terme les niveaux optiques. Cependant, lors des derniers nivellements réalisés dans les accélérateurs de particules, les résultats n'étaient pas à la hauteur des espérances de la section SU et plusieurs hypothèses pour les expliquer ont été avancées.

Ce Travail de Fin d'Étude, "Nivellement des accélérateurs de particules au CERN", est né de la volonté de tester ces hypothèses pendant le début de l'arrêt-machine. Ce mémoire a pour objectif de réaliser une étude complète de la méthodologie mise en place et de tester le matériel et les hypothèses dans les conditions réelles du tunnel.

Mots clés : CERN, nivellement, niveaux digitaux, test en tunnel, logiciel d'ajustement.

SUMMARY

In the past decades, many studies have been carried to understanding the digital levels's results in order to eventually replace the optical levels. However, during the last levellings made in particles accelerators, results were not those expected by the SU section. Assumptions are mentioned to explain that.

This work, "Levellings of particles accelerators in CERN", was born from the wish of testing these assumptions during the beginning of accelerators's shut-down. This thesis aims to make a study of established methodology and to test equipments and assumptions in tunnel's conditions.

Key words : CERN, levelling, digital levels, tunnel test, adjustment software.