



DETERMINATION D'UNE CHAINETTE DE REFERENCE POUR UNE LIGNE D'ARBRE

Séquence de fin d'étude --- Rapport mi-parcours

Sheng DU

Promotion Angers 2017

sheng.du@outlook.com

06 50 64 47 91

Tuteur industriel : **Christophe CADIOU**

Chef d'équipe d'ingénierie de maintenance

christophe.cadiou@ge.com

06 89 49 42 44

Tuteur enseignant : **Guenael GERMAIN**

Référent apprentissage : **Pierre MINNE**



GE Power

Site de la Courneuve
141 Rue Rateau, 93120 La
Courneuve, France
01 49 92 45 67

Contenu

Glossaire.....	2
Introduction	3
I.Présentation de l'entreprise	4
1.General Electric.....	4
2.Site de La Courneuve	5
II.Contexte et problématique.....	6
1.Révision.....	6
2.Lignage d'accouplement	6
3.Topographie	7
4.Correction des défauts de lignage	8
5.Etat des lieux.....	8
III.Rappel de projet SFE	10
A. Théorie, assimilation, étude de cas passés.....	10
B. Application concrète au cas de Flamanville 3.....	10
C. Points sensibles pour améliorer la précision	10
D. Autres améliorations (optionnelles).....	10
Enjeux.....	11
IV. Les missions effectuées	12
1.Détermination de la chaînette de référence avec méthode actuelle.....	12
2.Développement d'une nouvelle méthode de traitement de données.....	13
2.1 Recherche d'information	13
2.2 Construction des modèles informatiques.....	14
2.3 Validation des mesures par le client	19
3.Synthèse topographique.....	22
V. Bilan	24

Glossaire

GTA : Groupe turbo-alternateur, l'ensemble d'équipements qui a pour but de produire de l'électricité à partir de la vapeur fournie par une chaudière

Corps HP : Corps Haute Pression du GTA

Corps BP : Corps Basse Pression du GTA

EPR : Réacteur pressurisé européen, le plus puissant réacteur nucléaire du monde (1700MW). Il est installé dans la centrale nucléaire de Flamanville.

Chainette de référence : Une ligne moyenne d'arbre définie avec des mesures topographiques. Cette chainette de référence est définie lors de la construction d'une nouvelle machine. Elle est considérée parfaite en termes de lignage d'accouplement. Les défauts de lignages survenant ultérieurement seront calculés à partir de cette ligne moyenne.

Relevé topographique (nivellement) : L'opération consiste à mesurer la différence d'altitude entre deux points avec lunettes optique.

CalculZ : Un logiciel libre de calcul topographique permettant de déterminer la chainette de référence à partir des relevés topographiques. Il ne fonctionne que sous les systèmes d'exploitation 32 Bits. GE et son client EDF se sont mis en accord pour obtenir la chainette de référence avec la méthode incorporée dans ce logiciel.

Smart : Un logiciel que GE a fait développer par une entreprise informatique dans le but de traiter des relevés topographiques. Il comprend de diverses fonctionnalités. Parmi lesquelles, celle de la détermination de la chainette de référence est jugée imprécise par le client. Ce logiciel rencontre de problèmes de compatibilité lors de son installation sous le système Windows 10.

CNPE : Centre nucléaire de production d'électricité

CNEPE : Centre national d'équipement de production d'électricité. C'est un centre d'ingénierie du parc nucléaire français. Il est chargé de la maintenance des centrales nucléaires.

SFE : Stage de fin d'études

BE : Bureau d'étude

Introduction

Dans le cadre de mon alternance chez GE Power, je réalise un projet de fin d'études au sein du service d'ingénierie de maintenance. Ce document est un rapport de mi-parcours dont l'objectif est de faire un point d'étape conséquent quant à l'avancement de mon SFE. Après une présentation de mon entreprise et de mon projet de SFE, je vais présenter les différentes démarches et missions que j'ai effectuées pendant les périodes passées dans mon entreprise ainsi que des résultats obtenus. À la fin de ce document, je ferai un bilan des travaux réalisés et je présenterai les missions qui sont à faire dans la suite du projet.

I. Présentation de l'entreprise

1. General Electric

General Electric a été fondée en 1892 par la fusion d'une partie de Thomson-Houston Electric Company et d'Edison General Electric Company.

La firme possède 36 filiales dans plus de 142 pays. General Electric Company est un groupe diversifié. Ce conglomérat américain a réalisé un chiffre d'affaires de 105 milliards d'euros en 2016. Le CA par activité se répartit comme suit:

- Fabrication d'équipements d'infrastructures (43,1%) : moteurs d'avions, locomotives, turbines à gaz, équipements pétroliers et gaziers, centrales clés en main, etc. ;
- Fabrication de systèmes d'aviation (21,2%) ;
- Fabrication de systèmes d'imagerie médicale (14,7%) ;
- Fabrication de biens d'équipements domestiques et industriels (12,2%)

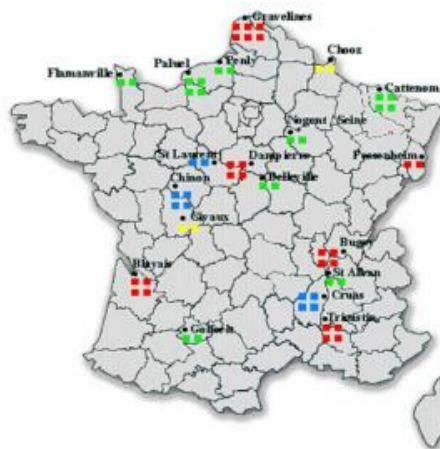
Mon stage s'est déroulé dans la branche énergie. GE Power est un des leaders dans la production d'électricité que ce soit en termes de centrales thermiques, nucléaires ou en termes d'énergies renouvelables (hydroélectricité, éolien...). Voici une représentation du parc nucléaire en France :

■ Parc 900 MW CP0/CP1

■ Parc 900 MW CP2

■ Parc 1300 MW
P4/P'4

■ Parc 1500 MW N4



2.Site de La Courneuve

Le site de La Courneuve (93120) appartenait à Alstom Power Service, il a été racheté par GE en 2015. Le site compte 6 services pour 700 salariés. Ce site est notamment chargé de la maintenance et de l'allongement du cycle de vie des centrales. Son bureau d'étude livre des conseils techniques et ses deux ateliers assurent la remise en état des pièces.

Après le rachat, son organisation évolue d'une manière constante. Néanmoins, on peut identifier trois équipes au sein du BE :

1. Ingénierie de maintenance des turbo-alternateurs dans des centrales électriques
2. Ingénierie de maintenance des turbo-alternateurs pour des industriels
3. Ingénierie de maintenance des pompes et des compresseurs

Je fais mon alternance dans la première équipe dont mon tuteur industriel est le responsable. Les sujets que j'ai traités sont en lien avec la maintenance des machines.

II. Contexte et problématique

1. Révision

Le principal client de GE Power en France est EDF. Les turbines à vapeur dans les centrales nucléaires d'EDF sont principalement fabriquées et suivies par GE. Comme le cœur nucléaire a besoin d'être chargé régulièrement, on arrête la tranche chaque année ou tous les 18 mois selon le type de machines. C'est pendant ce temps-là que l'on va réaliser des opérations de maintenance sur les turbines à vapeur, comme une vérification de lignage, par exemple.

2. Lignage d'accouplement

Le lignage est l'opération qui consiste à aligner l'axe géométrique des rotors d'une ligne d'arbres de façon à avoir tous les plateaux d'accouplement parallèles et concentriques lors du fonctionnement.

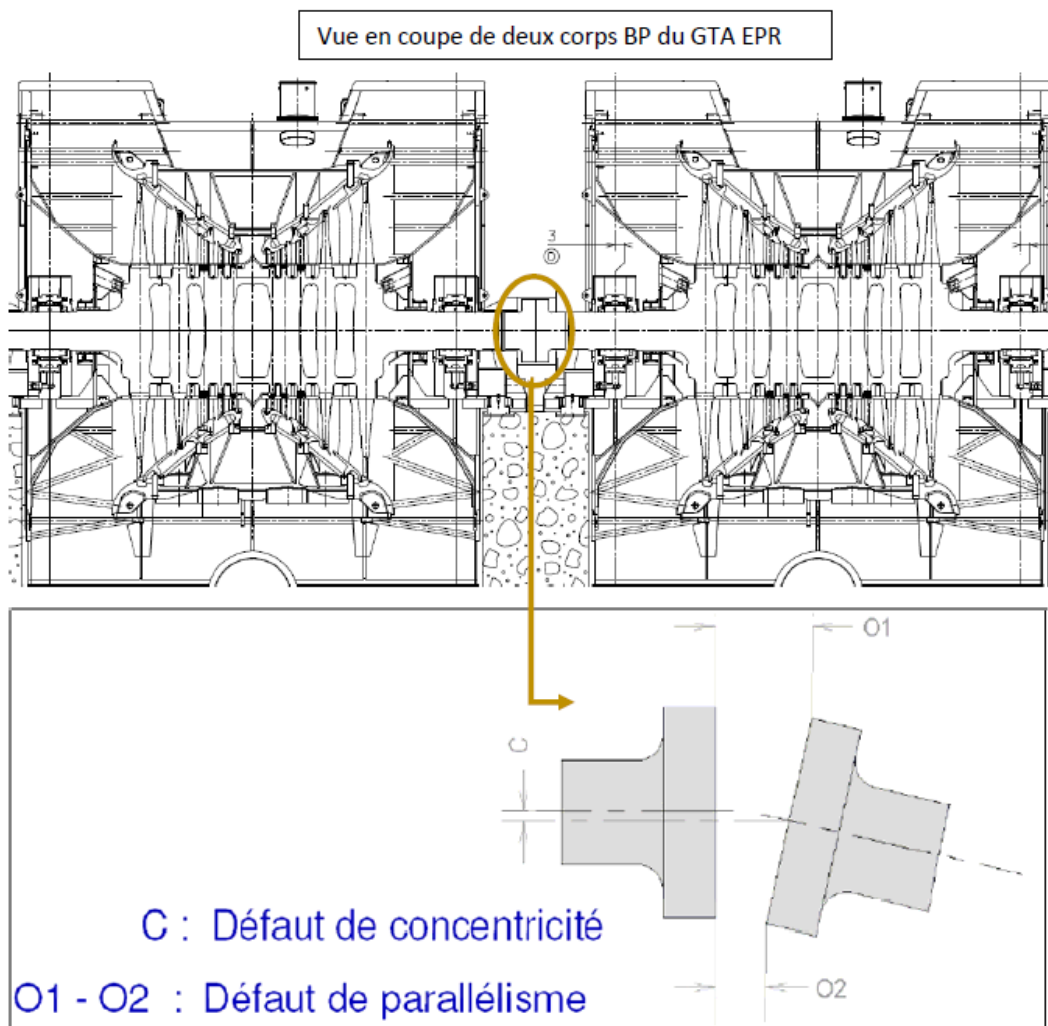


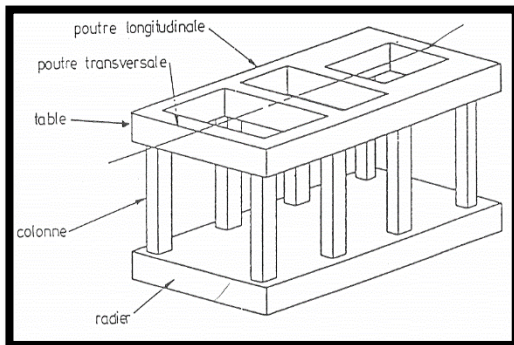
Figure 1. Défauts de concentricité et de parallélisme d'un accouplement

Le but du lignage est de limiter les reports de charge entre paliers et de maintenir les contraintes de flexion alternées dans les plateaux d'accouplement à un faible niveau. Un délignage peut avoir des conséquences graves sur le fonctionnement du groupe turbo-alternateur.

3.Topographie

Dans les centrales électriques, le groupe turbo-alternateur repose sur une fondation. Celle-ci se compose :

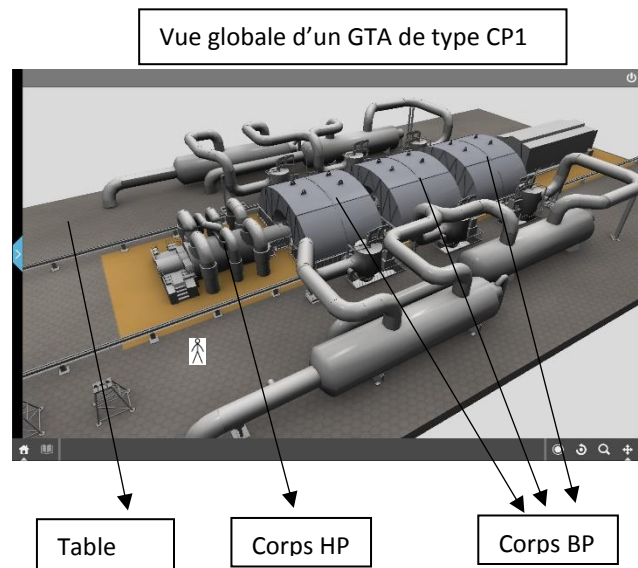
- D'une table qui supporte le GTA, constituée de parties longitudinales et transversales
- Des piliers sur lesquels repose la table et entre lesquels se trouvent le condenseur et les tuyauteries
- D'un radier posé sur le sol et sur lequel sont dressés les piliers



Vue globale de la table de fondation



Vue globale d'un GTA de type N4



Les mesures topographiques consistent à mesurer le nivellement entre chaque point topographique précisément défini, dont l'ensemble forme une boucle autour de la table. La topographie permet de connaître les altimétries de chaque endroit sur la table de fondation ainsi que leurs évolutions dans le

temps. Comme le GTA est posé sur la table, on peut en déduire les évolutions d'altitude des points d'appui rotors.

4. Correction des défauts de lignage

Il y a deux moyens pour mesurer le lignage. Le premier consiste à ouvrir l'accouplement entre deux rotors et à procéder à des mesures avec des instruments comme un comparateur ou un laser. Le deuxième moyen consiste à effectuer des mesures topographiques autour du rotor. À partir des valeurs mesurées, un logiciel permet d'estimer le défaut de lignage sans ouvrir l'accouplement.

Pour corriger les défauts de lignage d'accouplement, on peut soit changer le calage directement en dessous des rotors soit changer le calage dans des boîtes à ressort, si la fondation en possède, situées au niveau des piliers de la table. Pour corriger un défaut de lignage, il faut ouvrir un ou deux corps du GTA si on décide de faire la correction sous rotors.

L'exploiteur ne peut pas ouvrir tous les corps du GTA pendant un arrêt de tranche en raison des contraintes matérielles et financières. Généralement, un seul, parfois deux, corps sont ouverts pendant une révision, ce qui est suffisant pour un GTA composant de trois corps. Les nouvelles générations de turbine à vapeur sont de plus en plus puissantes et le nombre de corps ne cesse d'augmenter ; les GTA de type N4 et type EPR sont constitués de cinq corps. Sans savoir au préalable où sont les défauts de lignage, l'exploiteur ne peut plus suivre ses évolutions et par conséquent, assurer la maintenance de son GTA. C'est là que l'intérêt de la topographie intervient.

Avec des mesures topographiques et des traitements informatiques de ces dernières, l'entreprise de la maintenance peut connaître, à une précision près, tous les défauts de lignage du GTA et les corriger sans ouvrir les corps. Dans les cas critiques où le calage dans les boîtes à ressort ne permet pas de corriger tous les défauts de lignage, la topographie permet tout de même de déterminer le(s) corps à ouvrir dans la prochaine révision. Connaissant cette information, l'entreprise pourrait préparer en avance les outillages et organiser les opérateurs pour la correction, ce qui représente un gain de temps, mais aussi une énorme économie, car un jour d'arrêt est estimé à une perte d'environ un million d'euros pour l'exploitant de la centrale. L'avantage de la topographie est donc double, tant sur l'aspect fonctionnement du GTA que sur l'aspect financier.

5. État des lieux

À l'époque, GE et EDF ont chacune un expert de la topographie qui s'occupe du traitement des mesures topographiques. L'expert de GE ne connaît pas lui-même la théorie et les algorithmes du traitement, grâce au partenariat entre EDF et Alstom (avant d'être racheté par GE), l'expert de GE envoie les relevés des mesures à l'expert d'EDF pour effectuer les traitements. Aujourd'hui, les deux experts sont partis fâchés à la retraite avec leurs compétences dans le domaine de la topographie. GE et EDF souffrent d'une perte de compétence.

Actuellement, GE ne possède aucune ressource documentaire sur la théorie du traitement mathématique, mais seulement un logiciel libre presque obsolète qui calcule la chaînette, mais pas les

précisions associées. EDF possède un logiciel permettant de tout calculer, mais il ne sait plus comment le logiciel fonctionne, ni faire des modifications dans ce logiciel.

Le démarrage de la centrale nucléaire EPR à Flamanville nécessite l'établissement d'une chaînette de référence et des écarts-types associés, à chaque point de la chaînette, qui caractérisent les précisions de chaque altitude du rotor. Cette chaînette de référence sera déterminée à partir de quatre séries de mesure sur la table de fondation. GE et son client EDF ont signé un contrat commercial qui oblige GE à fournir quatre séries de mesure ainsi que la chaînette de référence à EDF sous peine de pénalité financière (La fourniture de ces éléments aboutira à un paiement de 250 000 euros de la part du client).

GE et EDF réaliseront ensemble ces quatre mesures. Ils effectueront chacun leurs traitements informatiques. EDF validera les résultats de GE en fonction de leur résultat de traitement. Chez GE, François a été nommé responsable de la topographie. Anciennement travaillé dans la mise en service du GTA, il ne connaît guère le domaine de la topographie.

GE rencontre une impasse : le partenariat entre GE et EDF étant fini, l'entreprise doit déterminer lui-même la chaînette de référence ainsi que les écarts type associés, et ce avec son personnel non formé et un logiciel obsolète. De plus, EDF envisage de construire de nouvelles centrales nucléaires en France, GE n'est plus la seule à avoir l'offre comme il était à l'époque. Une concurrence rude va se créer entre Siemens, Mitsubishi et GE. GE doit augmenter sa compétitivité pour vaincre ses concurrents et obtenir les offres.

III. Rappel de projet SFE

Mon projet de SFE porte sur les problématiques topographiques en lien avec le lignage d'accouplement. Dans le cadre de la mise en service d'une centrale nucléaire EPR à Flamanville, ce projet a pour objectif global d'améliorer la précision des mesures topographiques afin d'avoir une meilleure estimation du lignage. Ce projet permet également de récupérer le savoir-faire perdu et de développer des nouvelles compétences dans le domaine de la topographie.

Voici une description des tâches dans mon projet de SFE :

A. Théorie, assimilation, étude de cas passés

1. Étude de la théorie de la topographie
2. Familiarisation avec les outils d'analyse (méthode à la lunette, logiciel Smart)
3. Lien entre topographie et aspect mécanique (formation lignage)
4. Passage en revue d'anciens rapports topographiques
5. Rédaction d'une synthèse capitalisant ces connaissances pour les rendre accessibles à un novice dans le domaine

B. Application concrète au cas de Flamanville 3

1. Analyse de données disponibles et manquantes
2. Construction du modèle sur base topographique
3. Construction du modèle sur base lignage d'accouplement
4. Définir une chaînette de référence (avec Smart)

C. Points sensibles pour améliorer la précision

1. Intégrer le logiciel Calcul Z (la méthode des moindres carrées)
2. Développer la méthode des écarts-types
3. Mise à jour de la chaînette de référence
4. Mise à jour de la théorie

D. Autres améliorations (optionnelles)

1. Utilisation de la mesure laser pour le lignage des accouplements
Revue et amélioration des procédures applicables pour éviter les erreurs
2. Amélioration du logiciel Smart

IV. Les missions effectuées

En raison des contraintes sur les délais de la livraison de la chaînette de référence au client, j'ai commencé par déterminer la chaînette de référence du GTA type EPR de Flamanville, donc la partie B et la partie C. J'ai ensuite rédigé la synthèse topographique (la partie A du projet) en prenant compte le savoir-faire et les compétences que j'ai pu récupérer et développés dans la partie B et la partie C.

1. Détermination de la chaînette de référence avec méthode actuelle

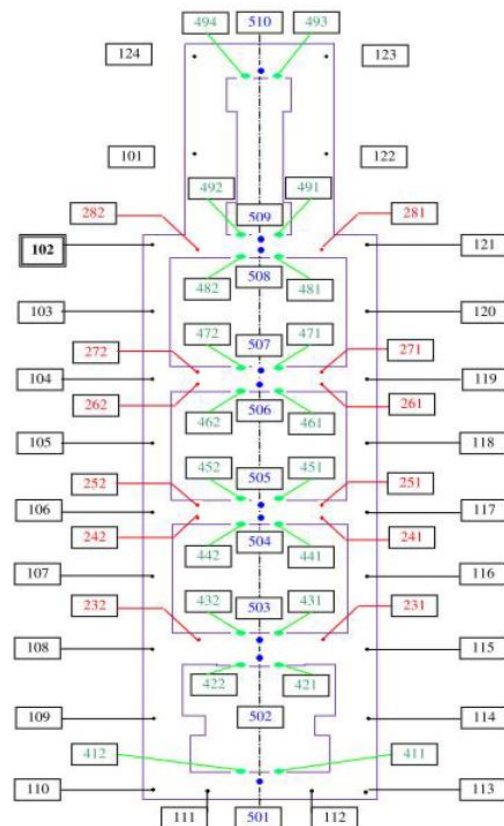
Pour déterminer cette chaînette de référence, j'ai commencé par me renseigner sur les différentes étapes intermédiaires pour le faire. Ces informations sont renseignées dans les documents internes de GE. Avec des explications de mon collègue François : j'ai récapitulé la procédure de la détermination de la chaînette de référence lors du démarrage d'une nouvelle machine :

1. Réaliser quatre couples de mesures topographiques & lignage sur site avec le client
2. Rentrer les quatre mesures topographiques dans le logiciel Smart pour sortir quatre chaînettes mesurées
3. Corriger les quatre chaînettes mesurées à partir des défauts de lignage associés
4. Moyenner les quatre chaînettes corrigées pour obtenir la chaînette de référence

Ci-dessous un schéma d'une vue du dessous de la table avec les repères topographiques :

À l'heure de l'écriture de ce document, trois couples de mesures ont été réalisés dont deux avec la présence du client. Comme l'entreprise doit fournir un rapport intermédiaire sur la chaînette de référence au client, la chaînette incluse dans ce rapport sera calculée à partir des trois mesures réalisées. Cette partie ne présente pas de difficultés particulières, les données sont traitées directement par le logiciel Smart et la correction des quatre chaînettes mesurées se fait sur un fichier Excel avec un programme VBA. La chaînette de référence a été calculée sans problème.

Cependant, cette chaînette ne répond pas l'exigence du client. En effet, selon le contrat, l'algorithme dans le logiciel Smart pour calculer les chaînettes mesurées doit être changé afin d'atteindre une meilleure précision. De plus, l'entreprise doit fournir les précisions sur chaque point de la chaînette de référence alors que Smart ne sort aucune précision. Cette partie va donc introduire la partie C dans laquelle je vais développer et mettre en place une nouvelle méthode de calcul.



2. Développement d'une nouvelle méthode de traitement de données

2.1 Recherche d'information

Comme évoqué précédemment, les ressources disponibles sont très limitées. Au moment où j'ai commencé à développer cette méthode de traitement, à l'entreprise il n'y a aucun document sur la théorie de cette méthode et il n'y a personne qui sait comment fonctionner cette méthode, y compris l'expert de la topographie parti à la retraite. On a seulement deux indices sur la méthode. La première est celle du client : dans une réunion, un ingénieur chez EDF a mentionné que cette méthode emploie le principe des moindres carrées. La deuxième est un logiciel libre (CalculZ). Ce logiciel obsolète sort les altitudes des points topographiques validés par le client, mais il ne donne pas de précision. L'entreprise n'a toujours pas réussi à contacter le développeur du logiciel, mais dans la notice de ce logiciel est mentionnée que la méthode de traitement employée est une méthode de « calcul par bloc ».

Comme les résultats de CalculZ sont en partie validés par le client, il est très intéressant de savoir comment fonctionner ce logiciel. J'ai donc choisi de contacter le développeur de CalculZ par mail en précisant mon statut étudiant Arts et Métiers. En parallèle, par recherche sur internet, j'ai remarqué que le calcul par bloc est une méthode de calcul très spécifique dans le domaine de la topographie. Je n'ai pas trouvé la théorie de cette méthode, mais quelques programmes de calcul en ligne. J'ai contacté les auteurs de ces programmes pour leur demander la théorie de cette méthode. Également, j'ai sollicité les enseignants en mathématique de mon école pour aide.

Les topographes que j'ai contactés m'ont conseillé d'acheter des livres de topographie dans lesquels sont présentées les cultures générales et les méthodes de traitement en topographie. Après une réunion avec mon tuteur d'entreprise et mon collègue François, on a décidé d'acheter deux livres dans le but de me former et de compléter le patrimoine de l'entreprise dans le domaine de la topographie.

La réponse du développeur de CalculZ m'a fait beaucoup progresser dans mon projet. Cet enseignant de la topographie m'a envoyé une autre version de CalculZ qui peut s'exécuter avec un émulateur. Dans le mail, il m'a expliqué que le calcul par bloc et le calcul par les moindres carrées sont deux méthodes différentes aboutissant au même résultat. La méthode du calcul par bloc est une méthode itérative, il permet de calculer les altimétries des points topographiques de manière approximative. Plus il y a d'itération, plus le résultat se rapproche au résultat par le calcul par les moindres carrées. Elle ne donne pas l'information sur les précisions. **La méthode des moindres carrées** est une méthode précise permettant calculer en une fois, **les altimétries des points avec les précisions associées**.

Le besoin a été donc largement clarifié, on a compris que c'est la méthode des moindres carrées qui peut répondre aux exigences du client. Je me suis focalisé sur la recherche de documents sur la méthode des moindres carrées. En basant sur les deux livres topographiques, j'ai finalement trouvé, sur un site anglais, un PPT présentant cette méthode. Le développeur de CalculZ m'a confirmé qu'il s'agit bien la bonne méthode. J'ai ensuite collecté de différentes documentations sur cette méthode mathématique qui va me servir de base théorique dans la construction du modèle informatique.

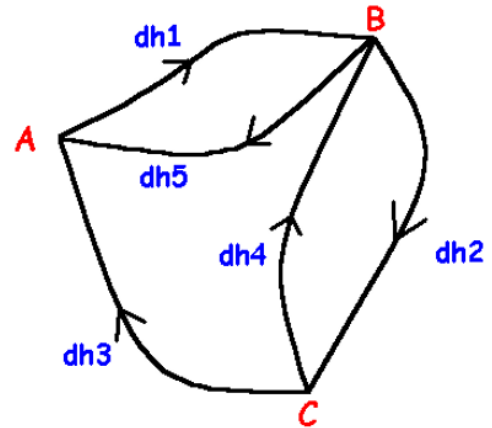
2.2 Construction des modèles informatiques

Tests & Essais

J'ai commencé à tester cette méthode en construisant un modèle informatique de taille réduite sous Mathematica en ligne, un logiciel de calcul formel dont j'ai eu l'accès grâce à mon inscription à mon école. Voici l'exemple que j'ai pris lors de l'établissement de mon premier modèle :

Il s'agit un réseau de nivellement simple avec trois points A, B et C. On veut déterminer les altitudes des points B et C en connaissant l'altitude du point A et les cinq différences d'altitude (dénivelées) :

- HA = 124.18
- dh1 = + 6.14
- dh2 = + 8.34
- dh3 = -14.48
- dh4 = - 8.35
- dh5 = - 6.16



À partir des informations connues, on établit un système d'équations. Les inconnues (HB et HC) sont écrites à gauche. Comme les mesures sont faites en redondance, on ajoute un résidu dont on ne connaît pas encore la valeur sur chaque équation pour la compensation :

- HB = HA + dh1 + v1
- HB - HC = -dh2 + v2
- HC = HA - dh3 + v3
- HC - HB = -dh4 + v4
- HB = HA - dh5 + v5

On écrit le système d'équations sous forme matricielle :

$$\begin{array}{c}
 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & -1 \\ 0 & 1 \\ -1 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} HB \\ HC \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} HA + dh1 \\ -dh2 \\ HA - dh3 \\ -dh4 \\ HA - dh5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v1 \\ v2 \\ v3 \\ v4 \\ v5 \end{bmatrix} \\
 \begin{array}{ccc}
 A & x & l \\
 | & | & | \\
 \text{coefficients} & \text{Inconnues} & \text{Observations} \quad \text{Résidus}
 \end{array} \\
 \end{array}
 \quad \rightarrow \quad
 \begin{array}{c}
 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & -1 \\ 0 & 1 \\ -1 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} HB \\ HC \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 130.32 \\ -8.34 \\ 138.66 \\ 8.35 \\ 130.34 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v1 \\ v2 \\ v3 \\ v4 \\ v5 \end{bmatrix}
 \end{array}$$

Le critère des moindres carrés indique que la meilleure estimation pour x est celle qui va minimiser la somme des carrés des résidus (écarts entre les observations et les valeurs estimées assignées à chaque observable). C'est à dire l'estimation pour laquelle $v^t v$ est minimum.

$$v^t v = (Ax - l)^t (Ax - l) = \min$$

Après une dérivée première, on peut démontrer que le vecteur X permettant de minimiser la somme des carrés des résidus se calcule de la manière suivante :

$$\hat{x} = (A^t A)^{-1} A^t l$$

Comme il s'agit d'une valeur d'estimation, le symbole $\hat{}$ est ajouté au-dessus de X .

Les mêmes données ont été entrées dans CalculZ pour obtenir un résultat servant de faire une comparaison. Avec des modifications et des ajustements sur mon modèle, j'ai finalement obtenu le même résultat de traitement que CalculZ avec les mêmes données d'entrée. Cela a confirmé la validité de mon modèle.

Premier modèle

Une fois que les résultats sont fiables, la prochaine étape consiste à implémenter ce modèle dans un support de l'entreprise. Une réunion a eu lieu avec mon tuteur d'entreprise et mon collègue François pour choisir le support informatique de ce modèle. On a listé des moyens pour réaliser ce modèle en fonction de mes compétences informatiques :

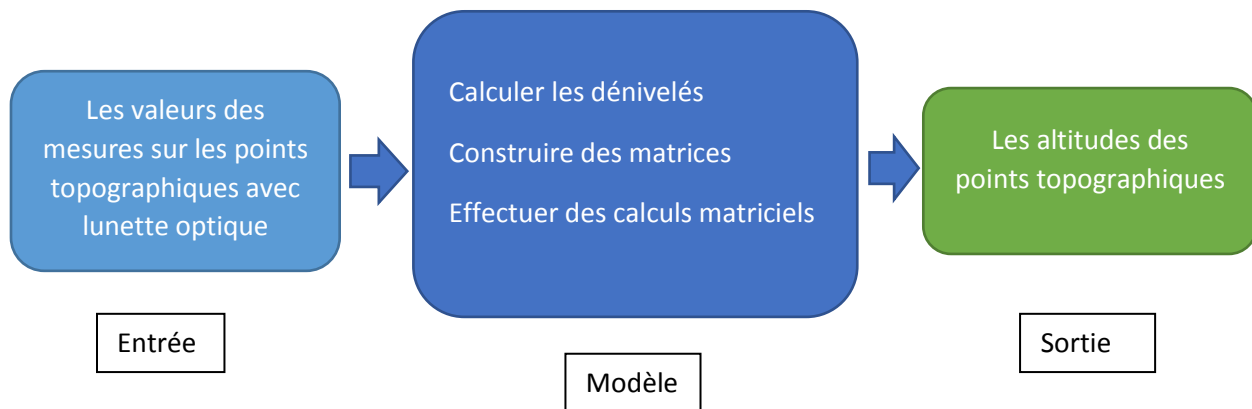
- Sous Excel sans ou avec VBA
- Sous python
- Sous Matlab / Octave
- Sous d'autres langages de programmation

On a également établi les critères pour effectuer ce choix :

- Il faut que le modèle pérennise dans le temps malgré les changements d'environnement comme des mises à jour des Windows
- Il faut que le modèle soit accessible pour les autres collaborateurs afin qu'ils fassent des modifications ultérieurement

Après discussion, on a décidé d'utiliser la fonction tableur d'Excel qui est la plus couramment utilisée en entreprise et qui est plus accessible.

À la suite des essais, j'ai donc réalisé un premier modèle sous Excel qui transforme les valeurs de mesures brutes en altitudes des points topographiques. Voici un schéma décrivant les fonctionnalités de ce modèle :



Il y a au total 151 nivellements et chacun est mesuré 10 fois dont 5 en aller et 5 en retour. La moyenne des mesures en aller et celle en retour de chaque nivellement, soit 302 valeurs au total, sont renseignées dans le modèle en tant que les données d'entrée. Les matrices construites sont de taille 151X45. À la sortie, on obtient 45 valeurs qui correspondent aux altitudes des 45 repères topographiques.

Enjeux du premier modèle

La réalisation de ce modèle informatique permet l'entreprise de se débarrasser du logiciel Calculz qui ne fonctionne plus sous Windows 10 et qui rencontre parfois des défaillances lors des calculs. Ce modèle pourrait être utilisé au moment du démarrage d'une centrale électrique pour contribuer à l'établissement d'une chaînette de référence. Il peut également être utilisé lors de chaque mesure topographique pour traiter des données. Il s'agit donc pour l'entreprise, une modernisation de ses outils informatiques.

Cependant, une fonctionnalité doit être ajoutée dans ce modèle : celle d'estimer les incertitudes sur chaque altitude calculée. Le livrable de ces incertitudes est contractuel. En effet, **GE n'a jamais su déterminer ces incertitudes**. À l'époque où GE(Alstom) était partenaire d'EDF, ce dernier a calculé ces incertitudes à la place de GE du fait de leur alliance. Suite au rachat de la branche Énergie d'Alstom par GE, l'alliance cesse et GE doit calculer lui-même les incertitudes.

Modèle avec précision

La théorie du modèle avec précision (modèle stochastique) se trouve dans les ouvrages que j'ai pu trouver par recherche d'information. Pour déterminer les écarts-types caractérisant les incertitudes de chaque altitude calculée, il faut introduire une matrice de poids dans le calcul. Cette matrice permet de pondérer les mesures. En effet, les mesures physiques ou expérimentales n'ont pas la même précision (elles ont été effectuées en utilisant des instruments différents, par des gens différents, dans des conditions différentes, etc.). Ces différences doivent être intégrées dans le processus d'estimation par moindres carrés, en affectant un poids connu à chaque mesure. P sera la matrice des poids (matrice qui a ces poids pour éléments).

Ci-dessous la matrice de poids pour un réseau de nivellement :

$$P = \begin{pmatrix} \mathbf{1} & \dots & 0 \\ \sigma_1^2 & \dots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \frac{\mathbf{1}}{\sigma_n^2} \end{pmatrix}$$

Chaque σ représente la précision d'une mesure, il y a autant de lignes/ colonnes que de mesures. Plus une mesure est supposée précise, moins son σ est élevé et plus $1/\sigma^2$ est élevé, donc plus de poids cette mesure va prendre dans le calcul. Cette matrice de poids sera ensuite utilisée pour déterminer $C_{\hat{x}\hat{x}}$, la matrice de variance-covariance du vecteur d'inconnues.

$$C_{\hat{x}\hat{x}} = \hat{\sigma}^2 (A^t P A)^{-1}$$

De la matrice de variance-covariance des inconnues, on peut extraire les écarts-types caractérisant les incertitudes des inconnues. Dans notre cas, les inconnues sont des altitudes.

Il n'y a pas de règle précise pour construire la matrice du poids, cela va dépendre de la manière dont on va juger la qualité de chaque mesure. Plusieurs réunions ont été lieu avec François pour définir la matrice du poids. Comme les écarts-types calculés seront ensuite comparés avec les écarts-types du client pour validation, on doit essayer de pondérer nos mesures de la même manière que le client pour que les résultats soient comparables. En basant sur de divers ouvrages en topographie et sur quelques notes laissées par l'ancien expert topographique de GE, on a choisi une méthode de pondération :

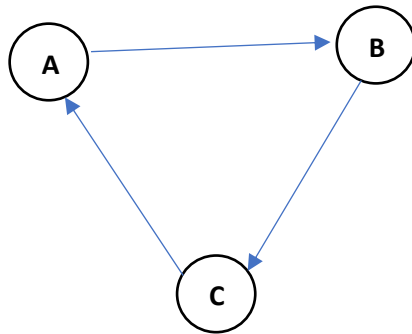
$$\sigma_F = \sigma \times \sqrt{n}$$

Où :

- σ_F est la précision pour la mesure d'un paramètre
- n est le nombre de mesures intermédiaires réalisées pour obtenir ce paramètre
- σ est la précision d'une seule mesure

Plus le point mesuré est éloigné du point de référence, moins la mesure de ce point est précise.

Exemple :



A est le point de référence avec son altimétrie connue. On réalise les dénivelés entre A et B, B et C ainsi que C et A pour calculer l'altitude du point B, C et l'erreur de fermeture. La précision de la mesure du point B est donc $\sigma \times \sqrt{2}$, la précision du point C est $\sigma \times \sqrt{4}$. La précision de la boucle est $\sigma \times \sqrt{6}$.

Les précisions définies sont ensuite renseignées dans la matrice du poids pour effectuer le calcul. J'ai donc obtenu les premiers écarts-types.

Ces écarts-types nous semblent trop faibles par rapport aux ceux du client. Nos écarts-types sont compris entre 0.01 et 0.02mm et ceux du client sont compris entre 0.04 et 0.06mm. De plus, l'écart-type caractérisant l'incertitude de l'instrument de mesure étant 0.025mm, nos écarts-types paraissent trop optimistes.

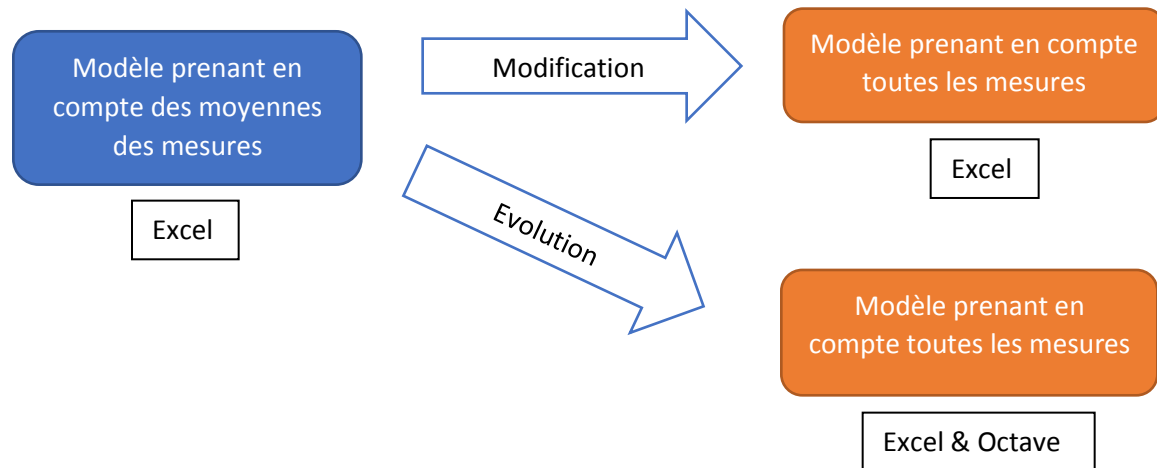
Amélioration & Modification du modèle

Après avoir fait plusieurs essais sur mon modèle, j'ai assuré qu'il n'y avait pas d'erreur de calcul dans mon modèle. N'ayant pas d'idée sur la raison pour laquelle nos écarts-types sont si faibles, j'ai sollicité des experts. En interne de GE, cette problématique a attiré l'attention de mon N+3, Monsieur DAVID, comme un paiement d'une somme importante est en jeu. J'ai donc eu une réunion Skype avec Monsieur DAVID et un mathématicien de GE dans le but de résoudre la problématique des écarts-types. À l'extérieur de l'entreprise, j'ai eu des échanges avec le développeur de CalculZ sur ce sujet. Ces échanges m'ont fait réaliser que la méthode des moindres carrés est basée sur la redondance de mesures. Plus il y a de mesures entrées dans le modèle, plus le résultat est précis. J'ai eu l'idée d'entrer toutes les mesures topographiques dans le modèle au lieu de n'entrer que leurs moyennes.

Cette opération a également intéressé l'entreprise. En effet, le client a voulu refuser une campagne de mesure faite par GE du fait des mesures hors tolérances. Le fait de pouvoir d'entrer toutes les dix mesures sur un nivellement au lieu d'entrer leur moyenne permet d'éliminer les mesures hors tolérances ce qui constitue un bon argument pour que le client accepte cette campagne de mesure.

J'ai donc modifié mon modèle sous Excel pour qu'il prenne en compte toutes les mesures. Cette action a fait grossir mon modèle. J'ai dû refaire des matrices de taille beaucoup plus importante avec des cellules. Pour rendre les modifications ultérieures plus simples, j'ai réalisé une deuxième version de mon modèle sous Excel et Octave (Version gratuite de Matlab). Les données d'entrée seront renseignées dans le fichier Excel et Octave récupère ces données pour effectuer le calcul. Il suffit de modifier le script Octave pour modifier le programme.

Ci-dessous le schéma de l'évolution de mon modèle :



Avec mon modèle évolué, on a lancé de nouveaux calculs, cependant les écarts-types sont restés très faibles. Ces écarts-types et les altimétries ont été envoyés au client malgré les doutes pour avoir un retour constructif. Suite à cela, plusieurs réunions ont eu lieu avec le client pour discuter sur la pertinence de la méthode de calcul employée.

Enjeux du modèle avec précision.

La réalisation du modèle avec précision permet l'entreprise de calculer des écarts-types associés à chaque point topographique. Il s'agit d'une remontée en compétence pour l'entreprise, car ce calcul n'a toujours pas été fait.

Les résultats en sortie de ce modèle permettent également au client d'employer une méthode de validation de mesures que je vais présenter dans les parties suivantes.

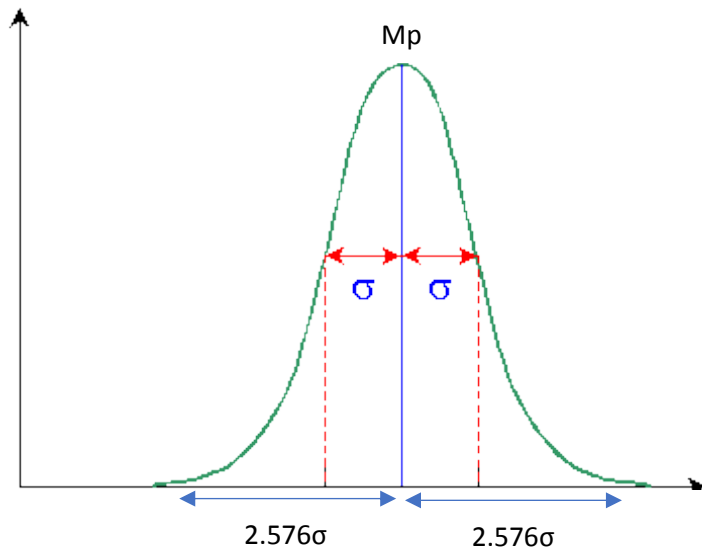
2.3 Validation des mesures par le client

Moyenne pondérée

EDF utilise une méthode de moyenne pondérée pour valider les résultats de mesures topographiques. Il s'agit de faire la moyenne pondérée **M_p** entre la valeur d'altitude de GE et celle d'EDF. La pondération se fait en fonction de l'écart-type, plus la valeur d'altitude a un écart-type élevé, moins il aura de poids dans le calcul de la moyenne. Ensuite, l'écart-type de GE et celui d'EDF seront combinés pour avoir un écart-type général.

Avec la moyenne pondérée et l'écart-type général, on construit un intervalle de tolérance dans laquelle il y a 99% de possibilité que la valeur soit bonne :

$$M_p - 2.576\sigma < M_p < M_p + 2.576\sigma$$



Pour valider les mesures, il faut que la valeur d'altitude de GE et celle d'EDF soient comprises dans cet intervalle. Sinon, GE et EDF doivent tous les deux reprendre leur mesure ensemble pour atteindre une convergence.

Pour que les résultats de GE et ceux d'EDF convergent, il est nécessaire que :

1. Les mesures soient faites dans les mêmes conditions
2. Le traitement informatique que vont subir les mesures soit identique

Actuellement, EDF et GE réalisent leurs mesures en même temps sur le site, les conditions de mesures devraient être identiques. Dans cette période, nous avons mis en place plusieurs réunions pour échanger sur les méthodes du traitement informatique.

Erreur systématique

N'ayant plus l'accès sur leur programme, EDF ne sait pas nous expliquer exactement leur méthode de traitement. Les mesures brutes de GE ont été transmises à EDF pour obtenir des résultats issus du traitement EDF. Ces résultats ont été ensuite comparés à ceux de GE. Nous avons constaté que les valeurs d'altitudes de GE et celles d'EDF sont sensiblement coïncidentes, mais qu'il y a des différences significatives dans les écarts-types. Après des analyses et des recherches documentaires, j'ai trouvé que nous avons omis une composante d'écart-type.

En effet, selon la théorie des erreurs (en annexe), une erreur possède deux composantes, à savoir une composante **aléatoire (accidentelle)** et une composante **systématique**. La méthode des moindres carrés est une méthode permettant d'estimer des erreurs de mesures. Les écarts-types à l'issue de ce calcul correspondent donc à des erreurs aléatoires. Il faut les combiner avec l'erreur systématique due à l'imprécision de la lunette optique et aux cheminements de mesures pour obtenir les incertitudes types des altitudes sur les points topographiques.

Après des analyses et des observations des écarts-types (incertitudes type) d'EDF, nous avons défini les erreurs systématiques associées à chaque point topographique. L'erreur systématique du point de référence est supposée nulle, plus on est éloigné de la référence, plus l'erreur systématique s'accumule.

Les nouvelles incertitudes type calculées en prenant compte des erreurs systématiques sont déjà de même ordre grandeur que ceux d'EDF. Le dernier point à clarifier dans le traitement informatique est la matrice de poids que dépendent principalement les erreurs aléatoires. La matrice de poids a fait objet d'une discussion avec le client ; finalement nous avons retenu une matrice d'identité pour la matrice de poids du fait que les erreurs aléatoires sont relativement petites devant les erreurs systématiques.

Analyse des divergences sur des mesures brutes

Suite à ces convergences, EDF et GE effectuent le même traitement informatique sur leurs mesures topographiques. Néanmoins, des divergences assez significatives sur les mesures brutes et des négligences dans la procédure font que certaines séries de mesures n'ont pas été acceptées.

Ci-dessous un tableau de validation pour les trois relevés topographiques réalisés :

Date du relevé	Validation	Commentaires
18/07/2018	Non	La tolérance du 0.05mm lors du relevé n'a pas été respectée Trop de points sont hors tolérance selon la méthode de la moyenne pondérée
19/02/2019	Non	GE a réalisé les mesures sans la présence d'EDF, la comparaison n'est pas possible
05/03/2019	Oui, mais	les mesures sont globalement cohérentes

Après des analyses, nous avons trouvé plusieurs causes conduisant à la non-validation des mesures. En effet, ce n'est pas facile d'obtenir les cinq mesures qui présentent un écart de moins de 0.05mm du fait des contraintes du terrain et du matériel. De plus, les topographes écrivaient les résultats du relevé à la main sur une feuille de contrôle. Ils peuvent faire des erreurs quand ils jugent si les mesures sont hors tolérance. Pour la campagne de mesure qui a été lieu le 19 février en 2019, une mauvaise planification de mesures et une ignorance du processus d'acceptation des mesures ont fait que GE a réalisé ces mesures seul.

Nous avons mis des améliorations pour pallier ces problèmes. Avec mon collègue François, nous avons créé un fichier Excel qui remplace la feuille de contrôle. Les topographes remplissent directement ce fichier Excel avec un pad. Une formule permet de mettre en lumière les mesures hors tolérance pour que les topographes refassent les mesures.

3. Synthèse topographique

En parallèle, j'ai écrit une première version de ma synthèse topographique qui détaille toutes les étapes dans la relevée topographique ainsi que dans le traitement des mesures.

Ci-dessous le sommaire de cette synthèse :

Introduction	1
1.Généralité	3
1.1. Description de la fondation du GTA.....	3
1.1.1. Introduction	3
1.1.2. Fondation lourde (high tune-heavy concrete).....	4
1.1.3. Fondation légère avec boîte à ressort (low tune - thin concrete)	5
1.1.4. Etude EDF.....	7
1.2. Présentation du lignage	8
1.2.1. Raisons pour réaliser un lignage correct.....	8
1.3. Présentation de la topographie en lien avec le lignage	9
2. Mesures topographiques	12
2.1. Les conditions de mesures.....	12
2.2. Suivi de la topographie à chaud.....	13
2.2. Les points topographiques.....	14
2.3. Les instruments de mesure.....	15
2.4. Le processus de mesure	16
3.Traitement de données topographiques	19
3.1. Les logiciels utilisés	19
3.2. Méthodes de traitement Smart	19
3.3. Théorie de la méthode des moindres carrées appliquée à la topographie.....	22
3.3.1. Introduction générale	22
3.3.2. La théorie des statistiques	23
3.3.3. Modèle mathématique	24
3.3.4. Modèle stochastique	26
3.3.5. Application concrète	27
3.3.6. Spécificités de la table de fondation.....	30
4. Etablissement des chaînettes	30
4.1. Chaînette des arbres	30
4.2. Chaînette de référence	30

5. Estimation des défauts de lignage d'accouplement	32
6. Précisions de l'estimation des défauts de lignage	34
FAQ.....	36

Dans la première partie «Généralité», j'ai essayé de présenter toutes les structures de la fondation GTA existante et les études réalisées sur les fondations GTA en France. Pour ce faire, il m'a fallu un travail important de recherche d'information dans les ressources documentaires dans les locaux de GE, mais aussi dans le serveur en ligne. Mon tuteur et mes collègues m'ont orienté et m'ont conseillé pour ma recherche. Pour la présentation du lignage d'accouplement, il y a déjà un carnet d'expérience réalisé par un collègue. Après avoir lu et compris ce document, j'ai synthétisé l'essentiel de ce document dans ma synthèse topographique et ai ajouté une indication pour orienter les gens intéressés vers le carnet d'expérience du lignage.

Pour la partie «Mesure topographique», j'ai sollicité mon collègue François, le responsable de la topographie, pour trouver des différentes procédures afin d'effectuer les mesures topographiques ainsi que les informations concernant les instruments de mesure. Après avoir fait une présentation générale de la topographie, j'ai synthétisé les procédures dans ma synthèse en mettant les noms des documents de référence.

Dans la partie «Traitement des données topographiques», j'ai voulu présenter d'abord les logiciels existant en entreprise pour réaliser de différents calculs. Pour ce fait, j'ai les ai installé sur mon ordinateur de travail et j'ai pris du temps pour tester et maîtriser leurs fonctionnalités. J'ai également échangé avec mes collègues pour savoir comment ils utilisent ces logiciels quotidiennement. Après cela, j'ai décrit leurs fonctionnalités et j'ai analysé leurs limites dans ma synthèse. Pour le logiciel Smart, j'ai fait un tutoriel pour former un nouvel arrivant qu'il soit rapidement opérationnel sur ce logiciel.

La partie suivante de la synthèse concernant la théorie de la moindre carrée appliquée à la topographie est le fruit d'un travail long qui a duré plusieurs mois. Un très gros travail de recherche d'information a été nécessaire pour trouver et valider la bonne méthode mathématique. Pour franchir cette étape, j'ai sollicité des enseignants topographes universitaires ainsi que des professeurs en statistiques. Dans mon entreprise, mon supérieur hiérarchique a invité un mathématicien de GE pour m'expliquer les statistiques. De mon côté, j'ai acheté deux livres de topographie qui détaillent des méthodes de traitement pour me former. J'ai également fait des recherches sur de nombreux sites pour trouver des informations. Une fois la méthode trouvée, il m'a fallu encore du temps pour construire des modèles, faire des tests et comparer les résultats avec le client, tout cela avec l'accompagnement du responsable topographique. Dans ma synthèse, j'ai présenté de manière détaillée, la théorie de la moindre carrée appliquée à la topographie ainsi que des exemples concrets pour illustration. Une fois la version finale de mon modèle informatique réalisé et validé, j'ajouterai un tutoriel pour former mes collègues à l'utiliser.

Dans la partie «Établissement de la chaînette», j'ai récapitulé les différents traitements à réaliser sur les mesures topographiques pour avoir des chaînettes d'arbres. Dans la partie FAQ, j'ai listé des questions fréquentes venant du client ou d'un novice concernant la mesure topographique sur la fondation GTA. Ce FAQ est basé sur des enquêtes de mes collègues.

La première version de ma synthèse a été relue par mon tuteur et le responsable topographique. Des suggestions ont été faites pour que je fasse quelques modifications. Ils ont globalement validé le contenu de cette synthèse.




V. Bilan

Dans ces périodes passées en entreprises, j'ai globalement respecté mon planning. La rédaction de la synthèse est faite, il reste juste quelques modifications et des mises à jour qui viendront dans la suite du projet. La partie B « Application concrète au cas de Flamanville 3 » a été finie. Je suis en avance sur mon planning comme j'ai beaucoup avancé sur la partie C « Point sensible pour améliorer la précision ».

Dans la réalité, le client nous demande des chaînettes calculées par la nouvelle méthode des moindres carrés dans les délais. J'étais contraint de travailler prioritairement sur la partie B et la partie C afin de fournir au client des livrables intermédiaires. La rédaction de la synthèse est réalisée pendant et après le calcul des chaînettes d'arbres.

Mois (en 2019)	Juin					Juillet					Aout					Septembre					Octobre					Novembre					Décembre				
semaine	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52						
Congé annuel																																			
Etude, assimilation, étude des cas passés																																			
Etude de la théorie de la topographie																																			
Familiarisation avec les outils d'analyse																																			
Lien entre topographie et aspect mécanique																																			
Passage en revue d'anciens rapport topo																																			
Rédaction de synthèse																																			
Application concrète au cas de Flamanville 3																																			
Analyse de données disponibles et manquantes																																			
Construction du modèle sur base topographique																																			
Construction du modèle sur base lignage																																			
Définir une chaînette de référence(simple)																																			
Points sensible pour améliorer la précision																																			
Intégrer le logiciel CalculZ																																			

Mois (en 2020)	Janvier					Février					Mars					Avril					Mai					Juin					Juillet				
semaine	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31				
Congé annuel																																			
Points sensible pour améliorer la précision																																			
Intégrer le logiciel CalculZ																																			
Développer la méthode des écarts type																																			
Mise à jour de la chaînette de référence																																			
Mise à jour de la théorie																																			
Autres améliorations																																			
Utilisation de mesure laser pour lignage																																			
Amélioration du logiciel Smart																																			

Semaine en entreprise:  Semaine à l'école:  Congé payé:  Liv: livrable attendu

Planning prévisionnel du SFE

Dans la suite du projet, les tâches suivantes seront réalisées :

- Choisir un support pour finaliser mon modèle informatique
- Documenter mon modèle informatique
- Me rendre sur site pour suivre la prochaine campagne de mesure topographique
- Mettre à jour des procédures de mesure et automatiser le remplissage des feuilles de relevé
- Faire des propositions d'amélioration pour le logiciel Smart
- Travailler sur l'utilisation de mesure laser pour lignage