

**ÉTUDE DE PRÉCISION ET DÉVELOPPEMENT D'UNE APPLICATION POUR
LES CONTRÔLES DE PLANÉITÉ PAR LASERGRAMMÉTRIE TERRESTRE
APPLICATION AUX DALLES ANTISISMQUES DU SITE DE CONSTRUCTION DE
L'USINE D'ENRICHISSEMENT D'URANIUM GBII**

Société d'accueil : France Ingénierie Topographie – Établissement de LYON

PFE présenté par : **Alexandre TOUBOIS**

Directeurs du PFE : M. David LE ROUX

M. Éric RABAUD

Correcteurs : M^{me} Tania LANDES

M^{me} Sophie RICOUR



Introduction

Areva a lancé en 2004 le projet de remplacement de son usine d'enrichissement d'uranium sur le site du Tricastin (dans la vallée du Rhône, entre le département de la Drôme et celui du Vaucluse), l'ancienne usine étant arrivée au terme de sa durée de vie. De plus, d'un point de vue économique, sa technologie d'enrichissement par diffusion gazeuse était pénalisée par sa forte consommation d'électricité (puissance électrique de 3000 MW à pleine capacité, soit 5% de la consommation électrique française). La nouvelle usine utilise la technologie de centrifugation. La société FIT a en charge les contrôles topographiques et métrologiques du contrôle extérieur de construction sur le site de la nouvelle usine nommée Georges Besse II. Dans ce projet, nous ne nous intéressons qu'au contrôle de planéité à la règle.

Les dalles antisismiques des halls sont soumises à des exigences de planéité importantes. Elles font l'objet de contrôles lors de leur réception. La méthode utilisée est celle de la norme DIN 18202:2005-10 (cf. figure 1) : contrôle de planéité à la règle (parfois nommée *méthode de la barre*). Ces vérifications représentent 6 km de contrôle linéaire par hall (le chantier comporte 2 unités de 8 halls chacune).

Une règle est positionnée en fonction d'un calepinage donné sur la dalle. À l'aide d'un régllet, la distance entre la règle et le sol est mesurée. Ces mesures sont répétées le long d'une direction établie. Pour un même point, plusieurs mesures sont réalisées, l'écart retenu est la valeur maximale.

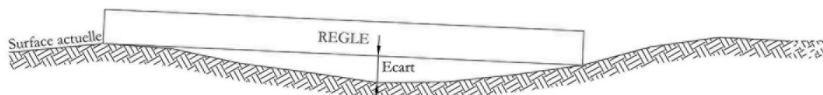


Figure 1 : Principe de mesure à la règle

Des tolérances de flèche sont établies par la norme en fonction de la longueur de la règle. Les dalles antisismiques sont classées dans le groupe 4, l'un des plus exigeants en terme d'ondulation de surface. Par exemple pour une règle de 1 m, les écarts mesurés sont considérés conformes s'ils respectent le critère de tolérance de 3 mm. Aucun écart ne doit excéder cette valeur.

En l'espace d'une dizaine d'années, les scanners laser ont démontré leur efficacité dans la production de nuages de points denses. Cette technologie est déjà employée dans diverses applications. Les objectifs de ce projet de fin d'étude sont la réalisation d'une étude de précision du scanner afin de connaître l'ordre de grandeur des défauts décelables par cette méthode et le développement d'une application permettant le traitement des données scanner pour obtenir les écarts à la règle (conformément à la norme).

1. Étude de précision du scanner laser

1.1 Caractéristiques techniques du Leica HDS6000

La société FIT dispose de deux scanners laser qui se distinguent par leurs télémètres. Pour ce projet, le scanner laser Leica HDS6000 a été utilisé. C'est un scanner à différence de phase plus adapté à la mesure de faibles distances. Les précisions théoriques données par le constructeur indiquent une précision sur la mesure de distance de 4 mm, et 8 mgon pour la mesure d'angle. Enfin la précision de positionnement d'un point quelconque est de 6 mm.

1.2 Sources d'erreurs sur des mesures TLS

Les sources d'erreurs influençant les mesures par laser scanner sont nombreuses, pour certaines corrélées et difficiles à mettre en évidence. La conception de scanners laser est assez complexe et diffère selon les modèles, avec de nombreux éléments électriques et mécaniques, chacun contribuant à l'erreur totale.

Une étude théorique des différentes sources d'erreurs des mesures lasergrammétriques est menée.

Nous distinguons les erreurs instrumentales sur la mesure de distance et d'angles, les erreurs provenant des caractéristiques de l'objet, les erreurs environnementales et les erreurs méthodologiques.

Les erreurs de mesures de distance sont en relation directe avec le mécanisme d'estimation de la différence de phase (erreur cyclique de phase, erreur de fréquence, erreur de zéro, erreur d'échelle). L'effet de bord est une conséquence de la divergence du faisceau qui occasionne des échos multiples lorsque l'empreinte laser rencontre l'arête d'un objet.

Les erreurs angulaires sont identiques à celles des tachéomètres pour les scanners utilisant un unique miroir rotatif.

Les erreurs provenant des caractéristiques de l'objet dépendent essentiellement de la réflectance de l'objet et de son angle d'incidence.

Les erreurs environnementales sont issues des interférences dans la propagation de l'onde laser (conditions atmosphériques).

Les erreurs méthodologiques englobent les erreurs liées à la consolidation et au géoréférencement des différents nuages.

1.3 Précision du scanner laser Leica HDS6000

La précision des scanners, qui sont fabriqués en petites séries, varie d'un instrument à l'autre. Elle dépend de l'étalonnage individuel et du soin avec lequel l'instrument a été traité depuis son dernier étalonnage. C'est pourquoi des tests sont nécessaires pour mettre en évidence la précision effective.

La précision d'un point du nuage est difficile à apprécier, car pour obtenir la distance sur un point caractéristique tel qu'une cible, une modélisation est réalisée par le logiciel du scanner sur un nombre important de points pris sur l'objet. Trois catégories de tests ont été réalisées : la première vise à mettre en exergue, soit la précision de mesure de distance, soit la précision de la mesure d'angles individuellement. Ensuite des tests visant à démontrer l'influence de l'objet sur la précision de la mesure ont été menés. Enfin un modèle global a permis de déterminer des systématismes dans les mesures ainsi que la détermination simultanée des précisions angulaires et de distances. Pour cette dernière catégorie, un modèle d'erreur a été défini en assimilant le scanner à une station totale automatisée, ainsi les corrections suivantes ont été recherchées :

- Pour la distance : une constante et un coefficient proportionnel à la distance mesurée
- Pour l'angle horizontal : corrections de l'influence des erreurs de collimation horizontale et de tourbillonnement
- Pour l'angle vertical : un appoint corrigeant l'erreur d'index vertical

La correction des observations par ces facteurs n'a pas permis d'améliorer significativement les précisions de positionnement des points et des observations. Ils n'ont cependant mis en évidence aucun dérèglement de l'instrument depuis le dernier étalonnage effectué par le constructeur. La modélisation utilisée n'est pas forcément la plus adaptée, mais dans le cas des scanners il est très difficile d'identifier les biais.

Les *emq* des observations sont plus importantes dans le cas d'une recherche simultanée des différentes précisions. Il semble qu'elles sont trop optimistes lors d'une détermination individuelle.

2. Développement et mise en application au projet

2.1 Développement informatique

Le développement d'une application est nécessaire afin de pallier à des manquements dans les logiciels commerciaux, aucun d'entre eux ne propose ce type de contrôle de planéité. En général, ils proposent un comparatif entre un plan moyen et le nuage de points, cette inspection ne permet de mettre en évidence que les défauts de grande ondulation.

Le langage de programmation choisi pour répondre aux spécifications fonctionnelles est *MATLAB*, qui permet nativement les calculs matriciels sans l'ajout de bibliothèques mathématiques. C'est un langage de haut-niveau. Bien qu'ayant été développé dans l'environnement de développement intégré *MATLAB*, il n'est pas nécessaire d'acquérir ce logiciel pour utiliser l'application.

On distingue deux parties à l'application : la fonction de calcul et l'interface graphique utilisateur.

Pour faciliter la programmation, l'application n'interviendra pas directement sur le nuage de points mais sur un fichier au format *ASCII* comprenant la projection de la direction du passage de la règle sur le sol (profil en long). Pour obtenir ce fichier, il suffira d'utiliser les commandes implémentées dans les logiciels à disposition. La procédure est très simple et pourra être réalisée avec la plupart des logiciels de traitements de nuage de points existants. Il suffit de mailler le nuage, de projeter une polygone sur le maillage rééchantillonné et d'exporter la projection. Les formats pris en charge par l'application sont les formats **.dxf*, **.asc* et **.txt*.

La fonction de calcul intervient donc sur un profil de points. La règle est positionnée sur le premier point, puis son second point d'appui est calculé (plusieurs cas sont à distinguer : il peut s'agir d'un point du nuage ou d'un point interpolé entre deux points du profil). Ensuite l'équation du plan de la règle est fixée pour mesurer les écarts de chaque point sous la règle. Ces écarts remplacent ceux précédemment mesurés s'ils sont supérieurs. Le calcul s'effectue dans une boucle ayant comme incrément chaque point du profil. Le calcul recommence donc en positionnant la règle sur chaque point du profil. La fonction de calcul a été validée par contrôle sur un échantillon de points test créé sous *AutoCAD*. Bien que travaillant par profil, l'application permet des inspections plus surfaciques en densifiant l'espacement entre les traces de contrôle.

Les commandes de l'interface utilisateur permettent de procéder aux calculs selon divers paramètres sans passer par des lignes de commande. Une capture d'écran est présentée sur la figure 2. Un des critères qui a dicté la programmation de l'interface est sa convivialité et simplicité d'utilisation. Pour cela les commandes sont clairement identifiées et intuitives, l'interface ne dispose pas d'une surabondance d'informations conduisant à l'illisibilité des renseignements demandés. L'utilisateur a le choix de la méthode de calcul, ce qui permet d'adapter l'affichage en conséquence. Les calculs peuvent s'effectuer sur un fichier isolé, ou sur l'ensemble des fichiers présents dans un même dossier.

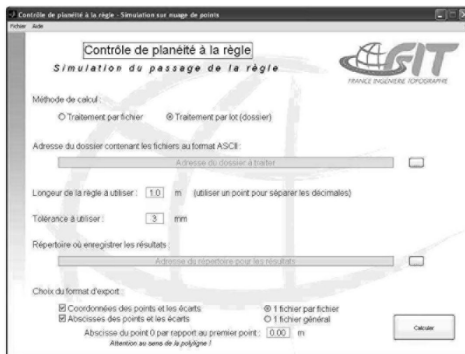


Figure 2 : Interface graphique utilisateur de l'application

L'export peut se faire selon deux formats de fichiers. Le premier exporte les coordonnées cartésiennes des points en remplaçant l'altitude par l'écart à la règle. Ce format permet d'utiliser le fichier obtenu pour générer des points topographiques sur le fond de plan et d'afficher directement les résultats par l'intermédiaire d'un attribut d'altitude sur le bloc. Le second format d'export sert pour la génération des rapports de contrôle de planéité. Les points hors tolérance sont localisés à l'aide d'une distance à partir d'un point 0. L'application nécessite l'abscisse de ce point zéro pour calculer les distances à celui-ci. Une ligne supplémentaire apparaît dans la boîte de dialogue lors de la sélection de cette option afin de renseigner l'abscisse de ce point.

2.2 Mise en place des procédures d'acquisition et de traitements

La méthodologie d'acquisition mise en place n'est en aucune manière particulière d'un point de vue technique. Cependant la configuration des lieux et les dimensions des halls imposent une répartition optimale des stations et références. Après consolidation, il est conseillé de supprimer les zones de recouvrement entre les stations de scan. Si l'une des stations n'est pas correctement nivelée, la superposition des nuages peut accentuer le bruit. Sur la base des nuages géoréférencés, un maillage triangulaire est ajusté. Ensuite le calepinage est importé et projeté sur la surface. Enfin ces projections sont exportées dans un fichier texte pouvant être lu par l'application. Après simulation du passage de la règle, l'application exporte des fichiers permettant de générer facilement un rapport de contrôle (cartographie des défauts et tableau récapitulatif).

2.3 Analyse des résultats

Après acquisition sur site, traitement des données et simulation du passage de la règle sur le nuage de points, les résultats ont pu être comparés à ceux figurant sur le rapport de contrôle de planéité.

Avant même la simulation du passage de la règle, l'analyse du maillage laisse apparaître des irrégularités, impossibles lorsque l'on connaît la quasi-perfection de la surface scannée. Ces anomalies altimétriques caractérisent le bruit dans le nuage. Des algorithmes de réduction du bruit, d'élimination de pic et de lissage du maillage ont permis de réduire le nombre et les valeurs des anomalies restantes. Cependant, les résultats laissent apparaître des centaines de points hors-tolérance. Ces points ne sont pas isolés mais regroupés en plusieurs zones. En raison de la résolution spatiale du scan, l'espacement entre les points sur le profil n'est pas régulier, ainsi par endroit un groupe important, d'une centaine de points, peut ne représenter qu'une zone d'environ 15 cm de longueur sur le profil.

Les zones considérées hors tolérance par le calcul ne coïncident pas avec les quelques points du contrôle manuel. Le contrôle par lasergrammétrie considère par endroit des zones sans défaut comme hors tolérance, et certaines zones qui sont véritablement hors tolérance ne sont pas détectées. De fait, il n'est même pas possible d'utiliser ces résultats pour effectuer le contrôle en deux étapes. La première consistant à déterminer des zones hors tolérance par lasergrammétrie, puis à affiner ces zones par méthode manuelle.

Ces mauvais résultats ne sont pas la conséquence d'erreur de programmation au sein de l'application développée, puisque le nuage de points a également été inspecté au sein du logiciel *TMS Office*. Celui-ci ne réalise pas ces contrôles à la règle le long d'un profil mais dans toutes les directions et sur l'ensemble de la surface. Les résultats obtenus par cette application ne laissent apparaître que 50% de points pour lesquels l'écart était inférieur à la tolérance. Alors que sur la zone de 22 m² utilisée pour ce test, un unique point était hors tolérance.

Conclusion

Le projet a permis d'expérimenter des méthodologies mettant en évidence la précision effective du scanner. Bien que la modélisation des erreurs de l'instrument n'ait pas réussi à corriger significativement les observations, la technique utilisée permet au moins de contrôler les scanners. En effet, ces instruments ne disposent d'aucune procédure de contrôle hormis les tests d'étalonnage réalisés par les constructeurs. Mais il ne fait aucun doute que des solutions seront proposées par les constructeurs au sein de leur appareil pour effectuer des contrôles réguliers de la précision de leurs instruments, afin de se conformer au plan d'assurance qualité auquel de nombreuses sociétés sont sensibles.

L'objectif initial de déceler des défauts de 3 mm était ambitieux. Le bruit de la mesure est supérieur à cette valeur, et la précision des mesures insuffisante. Néanmoins, l'algorithme développé trouve application dans d'autres domaines moins exigeants tels que les contrôles de planéité sur des ponts de navire, lors de contrôles de dalles ou chassées sur des routes et des tunnels où la précision exigée est moindre.