

# **Étude comparative de méthodes de mesure pour la vérification des tolérances dans le domaine de la construction.**

Ing. K. HANTHAZI - ing. C. HUENAERTS - dr. ir. S. DUBOIS  
ECAM – Bruxelles

*Cette étude vise à comparer les méthodes traditionnelles et numériques pour le contrôle de la planéité dans la construction. Il guide le processus de sélection des méthodes d'inspection en sélectionnant et en comparant différentes approches. L'objectif est de choisir la méthode la plus appropriée en fonction des besoins.*

*Mots-clefs : planéité, tolérances, lasergrammétrie, photogrammétrie, numérique, surface, essais, méthodologie, contrôle.*

*The object of this work is to compare traditional and digital methods for checking flatness in construction. It guides the process of selecting inspection methods by selecting and comparing different approaches. The goal is to choose the most appropriate method according to requirements.*

*Keywords: flatness, tolerances, lasergrammetry, photogrammetry, digital, surface, testing, methodology, inspection.*

## 1. Introduction

En Belgique, le rêve largement répandu est de posséder un patrimoine immobilier propre. Pour la plupart, cela implique la construction d'une nouvelle maison ou la rénovation/extension d'une propriété existante. Cependant, de nombreux projets de construction peuvent décevoir en termes de qualité finale par rapport aux attentes, malgré un budget dédié aux travaux.

Les écarts par rapport aux aspirations sont inévitables dans la construction et peuvent survenir au niveau de la fabrication, de l'implantation ou de la mise en œuvre. Les tolérances, c'est-à-dire les variations admissibles par rapport aux valeurs théoriques, sont nécessaires pour évaluer objectivement la conformité d'une réalisation. Elles sont généralement définies dans des normes ou des documents techniques. Dans le secteur de la construction, près de 11% des demandes au département des Avis Techniques de Buildwise sont liées à des problèmes de tolérances et d'aspect.

La tolérance de planéité est l'une des plus fréquemment critiquées, que ce soit pour les parois verticales ou les planchers. Des exemples courants de problèmes liés à la planéité incluent des ondulations dans les enduits muraux en plâtre, des problèmes de stagnation d'eau sur les toits ou les terrasses ou encore des revêtements de sol carrelés présentant des sons creux.

Cet article se divise en deux parties : la première aborde les concepts théoriques liés aux tolérances dans la construction, tandis que la seconde consiste en une mise en pratique de différentes méthodes de contrôle sur des cas concrets. L'objectif est d'évaluer l'efficacité de ces méthodes.

## 2. Théorie nécessaire

### 2.1. Définition et formation du plan de référence

La norme abrogée NBN ISO 4464 "Tolérances pour le bâtiment – Liaison entre les divers types d'écarts et de tolérances utilisés pour la spécification" définissait l'écart de planéité comme étant :

*Différence entre la forme effective d'une surface et celle d'une surface plane*

Dans le cadre de la détermination des potentiels écarts, un plan de référence est choisi afin de permettre l'évaluation de ceux-ci. La norme NBN ISO 7976-1 "Tolérances pour le bâtiment - Méthodes de mesure des bâtiments et des produits pour le bâtiment - Partie 1 : Méthodes et instruments" propose et décrit différentes manières de définir celui-ci :

- Plan moyen de 4 sommets ;
- Méthode des moindres carrés ;
- Droites locales ;
- Principe du volume-enveloppe ;
- Plan passant par 3 sommets ou gauchissement.

Dans le cadre de cette étude, le choix s'est porté sur la méthode des droites locales. En effet, ce procédé consiste à l'écart entre une ligne droite et la forme réelle de cette ligne. Habituellement, cette méthode est utilisée dans le cadre de la détermination de la rectitude locale d'une arête par rapport à une droite ou un plan de référence. Par conséquent, elle peut également donner des renseignements directs sur la planéité.

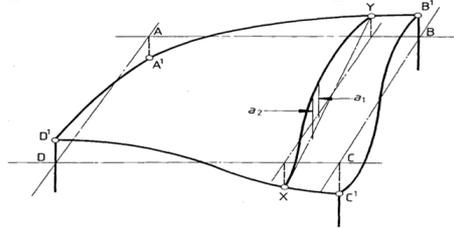


Figure 1: Mesure des écarts de planéité entre un plan de référence ou une droite de référence avec la surface réelle

## 2.2. Emplacements des points de mesure

Une fois, le plan de référence défini, l'emplacement des points de mesure est précisé. Pour ce faire, la norme NBN ISO 7976-2 "Tolérances pour le bâtiment - Méthodes de mesure des bâtiments et des produits pour le bâtiment - Partie 2 : Positions des points de mesure." mentionne le positionnement des zones à examiner. Pour le contrôle de la planéité, une description est établie en fonction de ce que l'on veut contrôler de manière globale ou locale, en usine et/ou sur chantier.

Le choix des emplacements le plus adéquat pour le contrôle de la planéité, qu'il soit sur chantier ou en usine, est porté sur la manière locale. Pour ce faire, certaines prescriptions sont nécessaires:

- Une ou plusieurs série(s) de mesures sur la surface ;
- Longueur maximale de 2 m par série de mesures ;
- L'espacement entre 2 points de mesure doit être régulier et d'une distance maximale de 50 cm ;
- Chaque série de mesures doit comprendre minimum 5 mesures réparties sur la longueur ;
- La zone sélectionnée pour la série de mesures est déterminée au hasard.

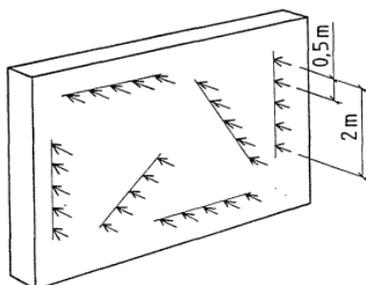


Figure 2: Emplacement des points de mesure dans le cadre d'un contrôle de planéité locale d'une surface

### 2.3. Méthodes de mesure normalisées

Après avoir déterminé les emplacements, la norme NBN ISO 7976-1 décrit des méthodes pour mesurer les défauts de planéité.

Pour un contrôle localisé, comme il est question ici, le référentiel de comparaison n'est plus un plan, mais bien une ou plusieurs droites dont chacune passe par au moins deux points en surface de l'objet. Pour le réaliser, les instruments suivants sont les plus adéquats:

- Fil ou règle droite
- Lunette astronomique
- Appareil de mesure de distances à train d'ondes
- Instrument à laser
- Coin gradué
- Règle droite
- Théodolite

### 2.4. Méthodes choisies et développement

A l'heure actuelle, le secteur de la construction est pleinement rentré dans sa phase de digitalisation. C'est pour cette raison qu'une comparaison d'une méthode de contrôle classique comme la règle droite (latte métallique de 2 m) est réalisée avec une méthode plus numérique telle que le scanner laser (différents types seront testés). Une troisième méthode de plus en plus en vue grâce à la manipulation des drones consiste à l'utilisation de la photogrammétrie.

#### *Latte métallique de 2 m*

Dans le domaine de la construction, le contrôle de planéité est le plus fréquemment exécuté au moyen d'une latte rigide métallique d'une longueur de 2 m ou de 0,2 m (pour du contrôle très local). Des taquets fixes dont l'épaisseur est égale à la tolérance sont placés aux extrémités de la règle. Un taquet mobile, similaire au coin gradué, permet de vérifier la planéité en le faisant coulisser le long de la règle métallique.

La méthode consiste à positionner la règle munie de ses deux taquets fixes sur la zone à contrôler. Comme le montre la figure reprise ci-après, deux conclusions sont donc possibles : hors des tolérances (cas nos 1 et 2) ou dans les tolérances (cas n°3).

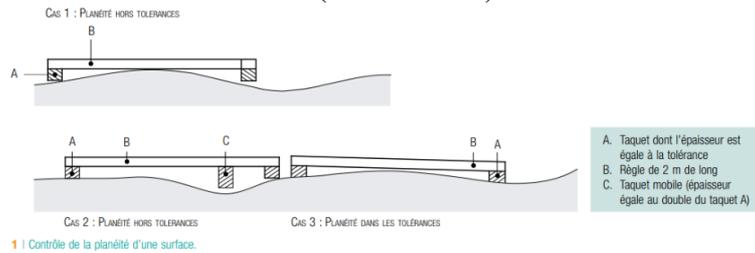


Figure 3: Mesure de planéité au moyen d'une latte métallique

### Scanner laser

Le scanner laser est un appareil qui utilise la technologie LiDAR (Light Detection and Ranging). Le principe de fonctionnement de cette dernière consiste à mesurer la distance entre un objet et le scanner au moyen de l'émission d'impulsions de lumières laser vers le sujet. Cette distance est calculée grâce à la différence de temps qu'il faut pour qu'un faisceau laser se réfléchisse sur une surface et revienne au scanner (détecté par des capteurs).

Cet appareil émet un faisceau laser qui balaye une zone en effectuant des rotations à grande vitesse. Il peut donc mesurer la distance de nombreux points sur la surface de l'objet en utilisant une technique appelée "balayage laser". Cette technique permet de créer, à la suite d'un traitement des données brutes (distances et angles), un nuage de points 3D qui représente la surface de l'objet.

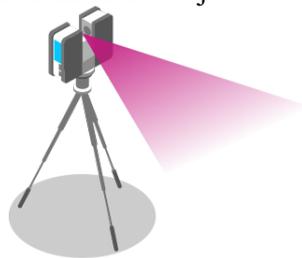


Figure 4: Mesure de planéité au moyen d'un scanner laser

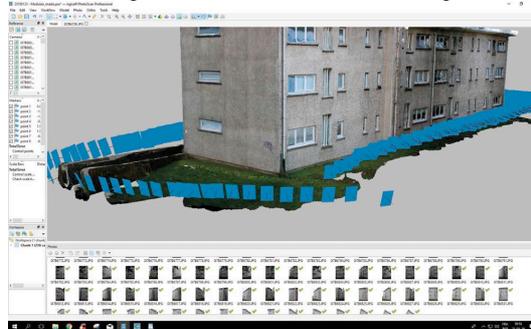
Pour cette technique, des appareils ayant des caractéristiques et des domaines d'application totalement différents ont été testés. Ces instruments proviennent de la marque Leica Geosystems:

- BLK2GO
- BLK360
- RTC360
- P40

### Photogrammétrie

La photogrammétrie est une technique de mesure et de cartographie qui utilise des photographies aériennes ou terrestres pour créer des modèles tridimensionnels d'objets ou de paysages. Elle permet également de mesurer la position, la taille, la forme et l'orientation des objets à partir d'images capturées depuis différents angles et positions.

Le processus de photogrammétrie commence par la prise de photos aériennes ou terrestres. Dans le cas de la photographie aérienne, des images sont prises depuis un avion ou un drone volant. Dans le cas de la photographie terrestre, des images sont prises depuis le sol à partir d'un appareil photo numérique. Les images sont ensuite traitées à l'aide d'un logiciel de photogrammétrie pour créer des modèles 3D, des cartes topographiques ou des plans, de la zone couverte par les images.



*Figure 5: Principe de la photogrammétrie*

. Ce processus implique l'identification et la correspondance de points clés dans les différentes images, puis la triangulation pour déterminer la position relative de chaque point dans l'espace en 3D.

## 2.5. Erreurs possibles

De manière générale, toute mesure est sujette à interprétation, mais également à certaines sources d'erreur. Par conséquent, la valeur réelle d'une mesure est généralement inconnue, car celle-ci est entachée d'approximations. En effet, de nombreux éléments peuvent influencer les mesures ainsi que leur résultat. Ces erreurs potentielles sont réparties en trois rubriques.

La première catégorie concerne les erreurs dites "grossières" qui sont typiquement des fautes de l'opérateur. Par exemple, il peut s'agir d'une mauvaise mise en station, lecture de l'appareil ou encore une mauvaise retranscription des résultats dans un carnet. Celles-ci sont inacceptables et doivent donc être éliminées.

La seconde classification se concentre sur les erreurs dénommées comme étant "systématiques" et touche généralement au matériel. Ces écarts mesurés peuvent être éliminés par méthode ou calculs.

Le troisième groupe examine les erreurs accidentelles qui ne sont pas modélisables, mais de faible ampleur et donc autorisée et donc acceptable.

Outre les erreurs de manipulation (dites grossières), quatre grandes classes peuvent être dégagées telles que les erreurs liées à l'environnement, aux instruments, à la méthode ou encore à l'interprétation des données. Afin de limiter celles-ci, et ainsi donné un caractère rigoureux et scientifique à la démarche, une méthodologie précise a été mise en place. Cette dernière sera détaillée prochainement.

## 2.6. Critères comparatifs

L'objectif final de ce travail est de pouvoir comparer différentes méthodes de mesure. Une série de critères est établie dans le but de pouvoir en tirer un classement le plus objectif possible. Ces critères sont les suivants:

- Coût  
Il est évident qu'au vu des différents instruments utilisés, les gammes de prix qui s'y associent peuvent être d'un ordre de grandeur tout autre. Il semble donc logique de prendre ce point en considération lors d'une élaboration de critères objectifs.
- Facilité de mise en place et d'utilisation  
Lors de la nécessité d'utilisation d'un instrument, la facilité d'installation et d'emploi sont typiquement des critères cruciaux dans le choix qui doit être réalisé. Dans le cas des trois méthodes, nous pouvons dire que l'ensemble des opérations d'installation et d'utilisation ne présente aucune difficulté majeure.
- Facilité de traitement des données  
Contrairement au point précédent, le traitement des données, obtenues lors de la prise de mesure, nécessite une approche différente en fonction des méthodes. La méthode de la règle droite est assez explicite et visuelle et permet une compréhension directe de la mesure. Les deux autres méthodes demandent un traitement des données sur base d'un nuage de points. L'analyse de celles-ci peut s'avérer parfois longue et laborieuse.
- Temps d'acquisition et de traitement des données  
Pour l'ensemble des méthodes développées précédemment, la durée nécessaire dans le but d'acquérir les données et leur traitement est relativement variable. En effet, dans le cadre d'un contrôle par une règle métallique, la majorité du temps consiste à la prise de mesures à proprement parler. En revanche, pour l'utilisation des scans laser et la photogrammétrie, le temps dédié à la prise de

mesures est assez réduit en comparaison avec la phase de traitements nécessaire pour sortir une valeur comparable.

- Répliquabilité  
Afin de permettre une approche scientifique du contrôle, une certaine répliquabilité des méthodes de mesure doit pouvoir être mise en place. Celle-ci passe par la détermination d'une certaine méthodologie que l'on peut répéter dans l'ensemble des configurations.
- Exactitude des mesures  
L'objectif de ce travail est de permettre la mesure des écarts de planéité et de comparer les techniques de mesures entre-elles. En fonction des précisions et des technologies utilisées, la tolérance de mesure peut être plus ou moins importante. Le but est donc d'essayer de coller au mieux aux valeurs exactes (bien qu'elles soient pratiquement impossibles à atteindre).

## 2.7. Méthodologie

Dans le but de permettre une comparaison fiable et une répétabilité des mesures réalisées, une méthodologie précise est mise en place. Parmi l'ensemble de ces étapes, reprises ci-après, certaines doivent être réalisées quelle que soit la méthode choisie tandis que d'autres seront propres à l'instrument utilisé. Celles-ci se basent par conséquent aussi bien sur les distances à respecter que sur la séquence opérationnelle lors de l'utilisation de l'appareil.

### *Généralités*

- Taille de la surface contrôlée  
Les cas de figures les plus fréquemment rencontrés sont situés au sein de cellules de logement. De ce fait, la détermination de la **taille de l'épreuve contrôlée** est importante. La dimension de la zone s'apparente à la paroi d'une pièce avec **une hauteur d'environ 2,5 m et une longueur avoisinant les 4 m.**
- Maillage et repères  
Les scanners laser et la photogrammétrie fonctionnent sur le principe de nuages de points contrairement à la méthode à la latte rigide (prises de mesures locales). Un **maillage** est réalisé afin d'avoir des points précis de comparaison des mesures réalisées par les trois méthodes. Dans le but d'être conforme à la norme, **un espacement de 50 cm entre chaque relevé sera respecté.**

Certaines surfaces sont parfois dépourvues de nuance de teinte ou de rugosité (par exemple, des peintures ou des enduits à base de plâtre), la mise au point des appareils numériques est par conséquent plus complexe à contrôler. Le

**placement de différents repères** peut faciliter le focus des mesures ainsi que l'alignement des nuages de points lors de la phase de traitements des données.

- *Distance*  
La mise au point nécessaire dans le cadre des méthodes numériques a besoin d'une certaine distance minimale/maximale entre la lentille et la surface à contrôler. Ces distances sont propres aux lentilles des appareils utilisés. En plus de ces distances, l'intervalle habituellement utilisée dans le cadre de l'évaluation en phase de réception peut aussi être prise en compte. Celle-ci est de 2 m pour des expertises intérieures et de 3 m pour des extérieures.

Une ligne repère est mise en place à égale distance des surfaces à contrôler dans le but de garantir l'équidistance tout au long de la procédure de mesures.

- *Plan de référence*  
La réalisation d'un plan de référence est obtenue par l'acquisition de données, situées aux droits des angles de la surface, au moyen d'une station totale. La création de ce plan de référence permet de comparer les différents instruments et méthodes entre eux.

### ***Points spécifiques à la lasergrammétrie***

La méthodologie appliquée pour la lasergrammétrie varie légèrement en fonction du type de scanner utilisé.

Pour le BLK2GO, la première étape demande de positionner une embase avec l'appareil dessus proche d'un angle (distance d'environ 1m) avant l'allumage. Une fois mis en place, l'appareil est mis en fonction. Lors de cette opération, il est nécessaire de maintenir fermement l'appareil sur son socle durant quelques secondes afin qu'il se connecte à l'application "BLK2GO Live" et calibre. Une fois cette partie établie, le scan s'effectue par un aller-retour sur la ligne repère située à la distance de la paroi. En vis-à-vis de chaque repère, l'opérateur maintient la position quelques secondes. La fin du scan requiert de se remettre en position sur l'embase et d'éteindre l'appareil après avoir attendu quelques secondes à nouveau.

Le contrôle de la surface par les autres scanners consiste tout d'abord au positionnement d'un trépied au milieu de la ligne repère. L'utilisation d'un seul tripode permet d'éviter les éventuelles erreurs de multiplier les mises en place de l'appareil, mais également des combinaisons des nuages de points lors du traitement. Cette opération demande d'être positionné à l'extérieur de la zone contrôlée. En effet, en positionnant le scanner au sein de la zone, une partie de celle-ci (se situant sous l'appareil) n'est pas sondée. La solution est donc de prendre une nouvelle station au sein de la zone, mais des erreurs peuvent dès lors se cumuler.

L'opération suivante réside au positionnement de l'appareil sur l'embase du pied et d'allumer ce dernier afin de l'appareiller à l'application de contrôle : BLK360 Live (BLK 360) et Cyclone Field 360 (RTC360). Une période d'attente de 10 à 15 minutes est demandée pour la mise à température de l'appareil avant l'acquisition des premières données. Généralement, les scanners utilisés sont auto-nivelant grâce aux compensateurs internes. Néanmoins, la version P40 s'apparente plus à la philosophie d'une station totale et nécessite un bullage manuel de l'appareil. Un compensateur interne est toutefois présent pour corriger de petits mouvements lors de la mesure.

### ***Points spécifiques à la photogrammétrie***

La procédure au moyen d'un appareil photo se caractérise par la mise en œuvre d'une ligne repère sur laquelle l'opérateur se déplace de manière à rester à égale distance de tous points. Par ailleurs, la prise des photographies se fait perpendiculairement à la surface à contrôler dans le but de réduire la distance entre l'objet et la lentille, mais également limiter les points pris d'un point de vue rasant.

Cette technique consiste en la prise de photographies successives présentant des recouvrements entre celles-ci. La superposition des différentes captures se fait d'un point de vue horizontal sur 80% et vertical sur 50%.

### ***Traitements des données***

Le traitement de données numériques passe d'abord par une extraction ainsi qu'un assemblage de celles-ci.

Pour la partie scanner, étant donné l'utilisation de produits Leica, une première partie du traitement est réalisée par l'application "Cyclone Register 360+". Elle permet d'optimiser et/ou assembler les nuages pris par différentes stations. La suite de cette analyse utilise un software open source (CloudCompare).

Pour la partie liée à la photogrammétrie, un autre logiciel Open Source "Agisoft Metashape 1.8.4" est utilisé. Le but de ce logiciel est de récupérer un nuage de points au travers de diverses manipulations.

## **3. Mise en pratique**

Dans le but de pouvoir comparer ces différentes méthodes de mesure, l'ensemble des techniques et instruments sont utilisés sur des supports distincts. Ceux-ci seront aussi bien des planchers que des parois de texture et aspect variables. En effet, les revêtements sélectionnés sont les suivants :

- Revêtement de sol en résine réactive

- Revêtement de sol en textile
- Paroi murale en enduit de plâtre

### 3.1. Explications des étapes et traitements

#### *Mise en place*

La première des étapes de ces essais demande la mise en place des différents éléments. Tout d'abord, la zone de contrôle est délimitée sur chacune des surfaces au moyen d'un adhésif. La ligne repère permettant de conserver une distance par rapport à la zone lors du contrôle est placée à une distance de 2 m. L'opération suivante a consisté au placement du maillage permettant la comparaison des méthodes entre elles. Enfin, les repères, qui permettront le calage 3D de l'appareil ainsi qu'à l'alignement des différents nuages de points, sont positionnés.

#### *Mesures et extraction des données*

Un relevé des angles de la zone est tout d'abord réalisé au moyen d'une station totale. Par cette opération, les données cartésiennes de chaque point sont obtenues en vue de constituer le plan de référence.

Le contrôle à la latte métallique est effectué au droit du maillage grâce à la latte métallique munie de taquets fixes (propres à la tolérance à contrôler).

Concernant la lasergrammétrie, les relevés sont effectués au niveau de la ligne repère par un aller-retour dans le cadre du BLK2GO et par la mise en place d'un trépied pour les autres scanners. Avec ces instruments, l'ensemble de la pièce est scanné. L'examen et l'optimisation des nuages de points obtenus ainsi que la compilation de ceux-ci sont réalisés via le logiciel Leica "Cyclone Register 360+".



Figure 6: Prise de mesure au moyen du laser scanner P40

Pour ce qui est de la photogrammétrie, deux méthodes distinctes sont confrontées. La première réside dans un positionnement uniquement périphérique à la zone dans le cadre de la prise des photographies. La seconde nécessite la prise d'images de

manière quasi perpendiculaire (légère inclinaison de  $15^\circ$ ) à la surface à analyser. Cette procédure impose de se positionner aussi bien en périphérie, mais également au sein de la zone.



*Figure 7: Mise en place de l'appareil photo*

Dans le cadre des deux méthodes, une reconstruction est réalisée au moyen du logiciel open source "Agisoft Metashape 1.8.4" dans le but d'obtenir un nuage de points complet.

### ***Traitement des données***

Après l'importation des données dans le logiciel, un premier nettoyage des nuages est nécessaire. Cette opération permet d'éliminer les reflets et zones non désirées du nuage. La phase suivante consiste à aligner ces différents nuages de points en sélectionnant les multiples repères positionnés. Une fois cette étape de regroupement réalisée, un second nettoyage ainsi qu'un découpage de la zone à contrôler sont exécutés. Il est à présent possible d'intégrer le plan de référence établi précédemment.

A partir de cette étape, une comparaison entre ces nuages de points et le plan de référence est possible, en paramétrant l'échelle de graduation désirée en fonction de la tolérance à appliquer.

Il est donc maintenant possible de sélectionner chaque point individuellement afin d'en connaître son écart par rapport au plan. Néanmoins, pour pouvoir le comparer à la méthode ponctuelle de la latte, un sectionnement permet d'extraire les données aux bons endroits.

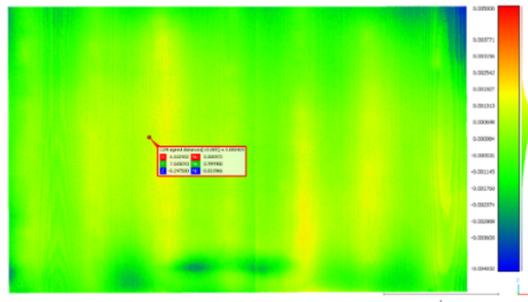


Figure 8: Mesure ponctuelle de la planité

Toutefois, les données brutes extraites ne peuvent pas être directement comparées aux mesures effectuées à la latte de 2m. En effet, le plan de contrôle des méthodes par lasergrammétrie ou photogrammétrie est constitué par l'ensemble de la zone étudiée tandis que la latte n'est que sur une distance limitée. Étant donné que l'ensemble des règles de l'art reprend une tolérance mesurée sous cet instrument, celle-ci est prise comme repère et une transformation des données est réalisée en suivant le principe suivant de la latte équivalente:

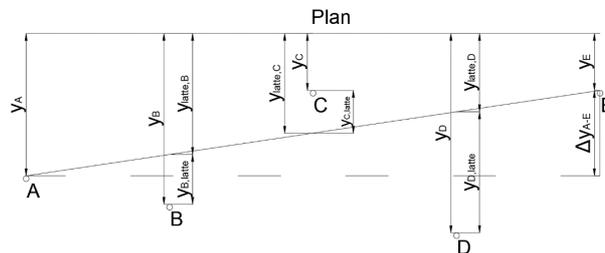


Figure 9: Schéma lien entre plan et latte

Pour ce faire, une manipulation mathématique des valeurs obtenues est réalisée en fonction du sens du contrôle effectué. Effectivement, étant donné que la méthode de la latte repose directement sur des points du support, la valeur de planéité obtenue entre ceux-ci dépend intrinsèquement d'eux.

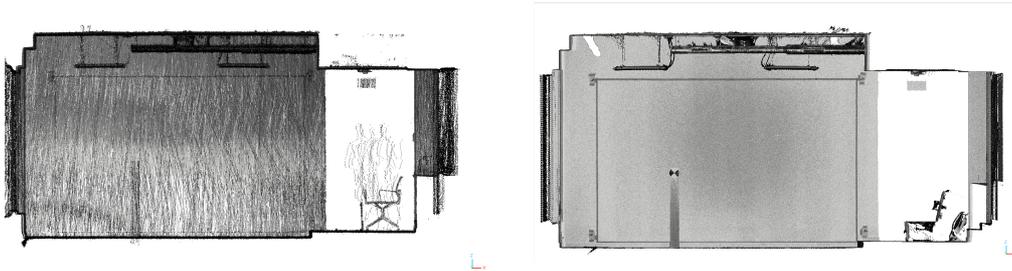
### 3.2. Remarques et analyses

A la suite de ces prises de mesure ainsi que des opérations de traitement, certaines remarques peuvent tout d'abord être formulées. L'analyse comparative des méthodes est ensuite détaillée.

#### *Remarques*

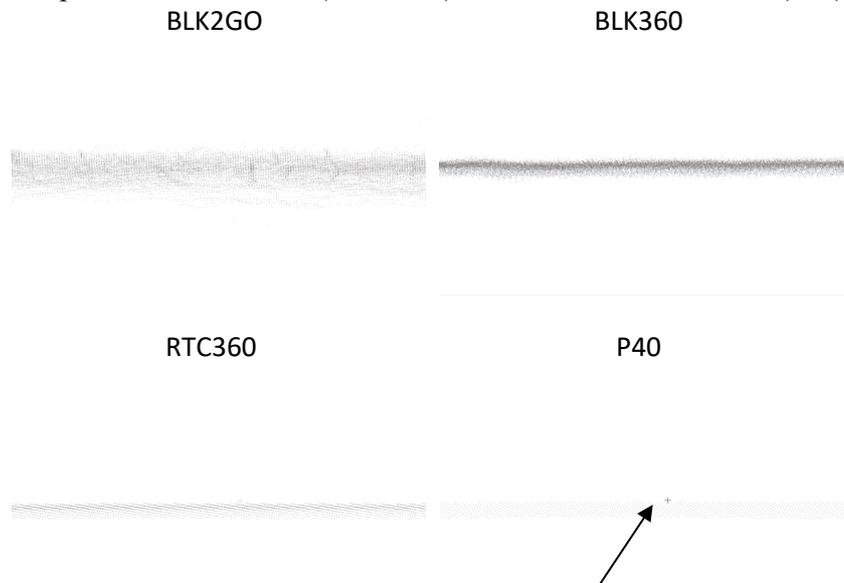
- Différences de qualité entre les nuages

Lors de l'alignement des différents nuages de points, une différence majeure de qualité est observable entre les différents scans réalisés. Les figures reprises ci-après représentent les nuages de points pour une paroi murale enduite obtenus au moyen du BLK2GO et du P40. La première est marquée par de multiples lignes grises tandis que la seconde est beaucoup plus claire et précise.



*Figure 10: Différence de qualité entre les nuages en fonction de l'appareil utilisé*

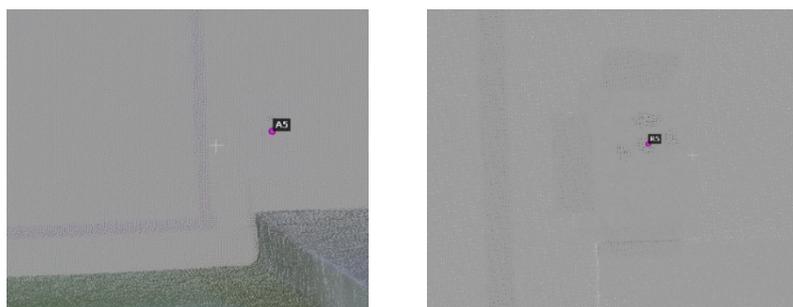
En agrandissant la tranche des divers nuages de points, le bruit sur la mesure est identifiable. La différence entre ceux-ci est flagrante en passant d'une variation de grande amplitude et ondulatoire (BLK2GO) à un bruit linéaire et réduit (P40).



*Figure 11: Bruit observé sur les mesures en fonction de l'appareil*

- Complexité d'alignement

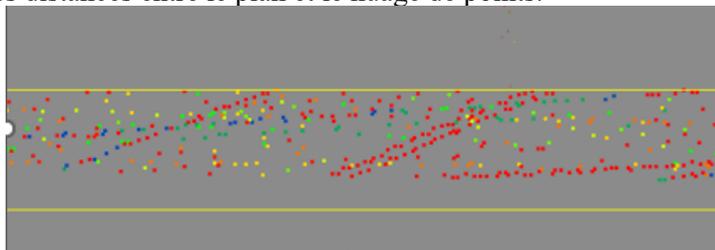
Au vu des variations de qualité des nuages, la sélection des points n'est pas aisée. Par conséquent, un léger décalage est toujours possible. De plus, au vu de la qualité du relevé, certains nuages de points doivent être alignés non pas sur base des points mais des photos réalisées par l'appareil. Une modification également de la taille des points permet de faciliter ce passage.



*Figure 12: Sélection des points d'alignement*

- Sélection des points

Lors de l'extraction des résultats, il est possible de sélectionner deux valeurs relativement différentes pourtant situées l'une à côté de l'autre. Une valeur sélectionnée peut donc ne pas être représentative de la réalité à cet endroit. La figure suivante représente une tranche du résultat où les couleurs sont liées aux différentes distances entre le plan et le nuage de points.

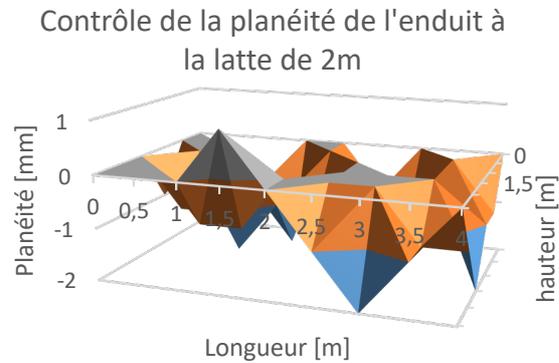


*Figure 13: Variabilité de valeurs en fonction du point sélectionné*

***Analyses des résultats***

- Latte de 2 m

L'analyse à la latte révèle la présence de bosses et de creux sur l'ensemble des zones contrôlées. Dans le cadre d'une mesure ponctuelle, cette méthode est extrêmement efficace, grâce à sa rapidité et son résultat direct. Par contre, dans l'objectif de la réalisation d'une réception où des centaines de mesures doivent être réalisées, cette méthode peut prendre un certain temps.



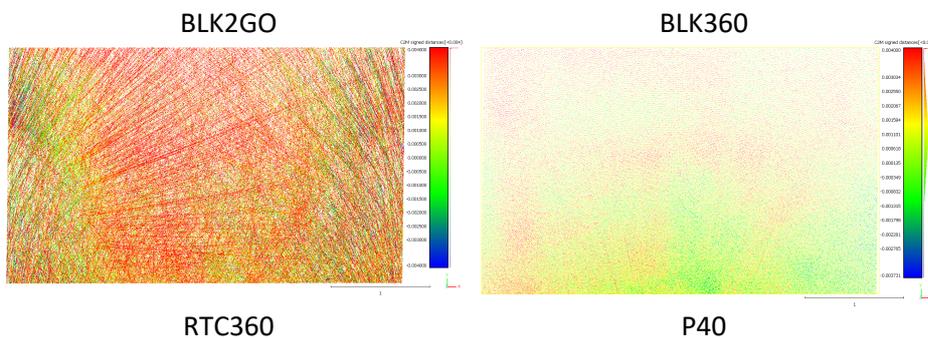
*Graph 1: Représentation graphique du relevé de planéité du revêtement de sol en textile au moyen de la latte métallique de 2m*

- Lasergrammétrie

L'analyse au moyen des scanners révèle également la présence de nombreuses bosses et de creux sur l'ensemble des zones contrôlées. Contrairement à la latte de 2m où les résultats sont ponctuels, cette méthode permet d'avoir une analyse complète de l'ensemble de la surface. La comparaison des différents instruments permet de faire ressortir des enseignements intéressants sur les différents instruments utilisés, mais également le traitement réalisé.

Néanmoins, avant toute analyse, il est nécessaire de se rendre compte que les valeurs contrôlées sont relativement petites. Par conséquent, toute variation, aussi petite soit-elle, impacte grandement les écarts.

Par exemple, pour le sol à base de résine réactive, les planéités obtenues sont les suivantes:



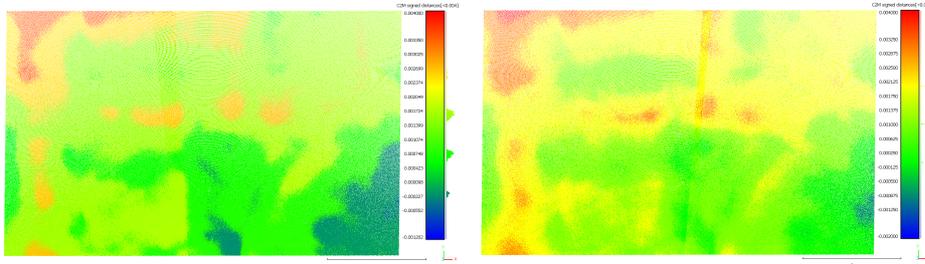


Figure 14: Résultat de la planéité du revêtement de sol en résine avec les différents scanners

D'un point de vue visuel, les résultats obtenus par le BLK2GO présentent d'importantes disparités, liées au bruit sur la mesure, rendant irréalisable l'interprétation de ces données dans le but du contrôle désiré. En effet, au vu des résultats extraits, il est impossible d'identifier une quelconque zone ou variation. Cependant, au moyen du BLK360, des zones grossières sur les surfaces sont perceptibles. En revanche, le RTC360 et le P40 fournissent des représentations graphiques relativement détaillées et similaires.

En termes de comparaisons pures avec la latte métallique de 2m (référence), 3 tranches de précisions sont déterminées ( $[-\infty ; X ; -1 \text{ mm}]$ ,  $[-1 \text{ mm} ; X ; 1 \text{ mm}]$ ,  $]1 \text{ mm} ; X ; +\infty$ ). Généralement, l'intervalle compris entre  $[-1 \text{ mm} ; X ; 1 \text{ mm}]$  témoigne d'une certaine précision de l'instrument. Par conséquent, plus le pourcentage de cette catégorie est élevé, au plus l'appareil est donc fiable pour le relevé.

En comparant les résultats obtenus (différentes classes) sur les supports contrôlés, le RTC360 (suivi par le P40) présente les meilleurs résultats. Le RTC360 présente le plus de proximité et est l'appareil le plus précis (1 mm) et possédant un bruit réduit (0,4 mm) pour une courte distance. Pour exemple, les résultats obtenus pour le revêtement de sol en résine indique que 98,1% des valeurs rentrent dans l'intervalle de confiance pour le RTC360.

Différence\Appareil	BLK2GO	BLK360	RTC360	P40
$[-\infty ; -1[$	14,8%	7,4%	0,0%	0,0%
$[-1 \text{ mm} ; X ; 1 \text{ mm}]$	44,4%	79,6%	98,1%	94,4%
$]1 ; +\infty ]$	40,7%	13,0%	1,9%	5,6%

Ces différences sont engendrées par les précisions des appareils ainsi que le bruit lié à leur mesure, mais également par les différentes phases de traitement évoquées (alignement, sélection des points, etc.). Lors de l'alignement des nuages

de points entre eux, le bruit ainsi que la précision liés à la mesure peuvent impliquer d'avoir une sélection sur différents niveaux. L'alignement selon ces points, finalement différents, implique de légers décalages et inclinaisons l'un par rapport à l'autre.

Néanmoins, certaines différences observées peuvent provenir de la surface contrôlée.

Par exemple, le sol en textile est constitué d'un assemblage de fibres. Dans certains cas, celles-ci ne sont pas comprimées et peuvent s'affaisser lors de la pose d'un objet par-dessus. Par conséquent, lors de la mesure réalisée au moyen de la latte de 2m, il est possible que ces fibres aient été légèrement comprimées par rapport aux méthodes "non invasives" que sont la lasergrammétrie et la photogrammétrie. Pour la paroi enduite au plâtre, la couleur de la surface influence également la mesure. En effet, les surfaces blanches réfléchissent généralement une grande quantité de lumière provenant du faisceau laser. Par ailleurs, ce faisceau peut être réfléchi plusieurs fois entre la surface et le capteur, ce qui peut donner des mesures erronées.

Une autre étude de lasergrammétrie est menée concernant l'influence du nombre de prises de mesures. Une première mesure est réalisée par une station unique tandis qu'une seconde est exécutée au moyen d'une combinaison de 3 stations. L'essai à la station unique tend à montrer un nombre de points réduits vis-à-vis de l'autre. Néanmoins, dans les deux cas, la structure du revêtement de sol sous forme de dalles carrées est amplement reconnaissable.

Au niveau des résultats obtenus, ceux de la station unique sont globalement plus proches des valeurs de la latte que ceux de la combinaison des trois stations. Toutefois, l'utilisation d'une ou trois stations ne perturbe pas significativement les résultats. Entre les deux mesures, les différences sont les suivantes:

Différence\Appareil	1 station versus 3 stations
$[-\infty ; -1[$	3,7%
$[-1 \text{ mm} ; X ; 1 \text{ mm}]$	92,6%
$]1 ; +\infty ]$	3,7%

L'apparition de ces différences peut provenir de multiples raisons. Tout d'abord, l'utilisation de trois stations nécessite un déplacement et une nouvelle mise en station de l'appareil à plusieurs reprises. Cette opération implique inévitablement de petites discordances au niveau des mesures. De plus, chaque mesure réalisée engendre un nuage de points. Ceux-ci ont été combinés entre eux pour ne former plus d'un seul et unique nuage.

- Photogrammétrie

La méthode photogrammétrique est testée sur deux supports (enduit et textile). L'essai réalisé sur la paroi murale enduite n'a pas permis d'obtenir des résultats concluants. En effet, la couleur claire (blanche) ainsi que l'absence de rendu (peu de texture) n'ont pas permis de détecter des variations sur ce support. Par conséquent, seules les mesures réalisées sur le revêtement de sol en textile ont pu aboutir à une analyse.

L'essai réalisant des captures sur l'ensemble de la zone tend à montrer un nombre de points beaucoup plus important (environ 253 millions) que la méthode périphérique (environ 83 millions). Ce nombre beaucoup plus grand a été réduit au même nombre que l'autre, le logiciel a donc réalisé une moyenne des points se situant à proximité des points conservés. Néanmoins, dans les deux cas, la structure du revêtement de sol sous forme de dalles carrées est amplement reconnaissable. En comparant les 2 méthodes, les résultats obtenus sont relativement proches. Néanmoins, les faibles différences peuvent trouver leur origine dans de multiples raisons.

Tout d'abord les prises de vues ainsi que les distances de captures sont différentes entre les méthodes ce qui tend à déformer légèrement l'image. En effet, lorsqu'une image est prise de plus proche et perpendiculairement à la surface, sa partie périphérique tend à se déformer contrairement à une photo plus lointaine. Ces altérations de l'image courbent les éléments droits et sont généralement dues à une distorsion optique générée par l'objectif de l'appareil.

Par ailleurs, l'angle de prise de vue influence également la prise de mesures. Si, lorsque des mesures sont prises perpendiculairement à une zone, l'angle de la caméra n'est pas parfaitement perpendiculaire à la surface (inclinaison de 15% dans notre cas), cela peut introduire des erreurs de parallaxe. Cette dernière peut affecter la précision des mesures.

Les revêtements de sol relativement texturé, comme il est présent, rend plus complexe la mesure à réaliser lors d'une mesure perpendiculaire.

Pour finir, les rapports indiquent une plus grande précision de la mesure pour la méthode périphérique ce qui tend à se confirmer par la comparaison des mesures réalisées avec la latte de 2 m.

- Evaluation selon les critères comparatifs

Au vu de l'ensemble des critères, il en ressort que la méthode de la latte métallique de 2 m est la plus adéquate devant le BLK360/RTC360 suivi du P40/photo. C'est en revanche l'instrument BLK2GO qui ferme la marche. À travers cette étude, il est compréhensible qu'à l'heure actuelle, la latte métallique est encore de loin

l'instrument le plus complet dans le cadre d'un contrôle de planéité. Techniquement, seul le temps d'acquisition des mesures est beaucoup plus élevé pour un relevé de cette envergure. En effet, comme mentionné, cette méthode est plus adéquate pour un relevé ponctuel.

## 4. Conclusions

Lors des différentes analyses, il a été mis en évidence que la teinte ou encore la texture influence fortement une mesure. Cette série d'essais a également permis de comparer les différents appareils utilisés entre eux. En effet, il en ressort que la latte métallique est un instrument très précis et extrêmement efficace pour des mesures ponctuelles. Toutefois, dès que l'on doit opérer à une procédure de réception, le nombre de mesures à réaliser peut prendre un certain temps et nécessite la mise en œuvre d'un maillage. Les scanners laser sont par contre très différents les uns les autres. De grosses différences visuelles ont été distinguées au niveau des résultats entre les diverses gammes de produit, mais aussi les points d'attention à considérer lors du choix du matériel. Effectivement, lors de cette sélection, il est crucial de vérifier certaines caractéristiques techniques de l'appareil, telles que la précision ou encore le bruit effectif sur la mesure. Au niveau de la photogrammétrie, un certain contraste au niveau du support est nécessaire. En effet, des éléments trop lisses tels que l'enduit mural n'ont pas permis de réaliser les mesures. Pour cette technique, la luminosité nécessite aussi un réel point d'attention.

## 5. Sources

- [1] "Tolérances pour le bâtiment – Liaison entre les divers types d'écarts et de tolérances utilisés pour la spécification", Bureau de normalisation, Bruxelles, norme NBN ISO 4464, 1992.
- [2] "Tolérances pour le bâtiment - Méthodes de mesure des bâtiments et des produits pour le bâtiment - Partie 1 : Méthodes et instruments", Bureau de normalisation, Bruxelles, norme NBN ISO 7976-1, 1989.
- [3] "Tolérances pour le bâtiment - Méthodes de mesure des bâtiments et des produits pour le bâtiment - Partie 2 : Positions des points de mesure.", Bureau de normalisation, Bruxelles, norme NBN ISO 7976-2, 1992.
- [4] DIGITAGE : "Le scan 3d, dangereux pour la santé ?", in Blog, s.d. en ligne <https://www.digitage.fr/2018/11/le-scan-3d-dangereux-pour-la-sante/>. Consulté le 14 mars
- [5] S. Golubeva : "Qu'est-ce que le scan 3D laser", in Page d'accueil > Centre d'apprentissage, 2022, en ligne <https://www.artec3d.com/fr/learning-center/laser-3d-scanning>. Consulté le 14 mars ;
- [6] BUILDWISE, *Articles n°2015-02.23 : Tolérances dans la construction : instruments et méthodologie de contrôle*, Woluwe-Saint-Etienne: Buildwise, 2006.

- [7] M. DE BOUW, S. DUBOIS et Y. VANHELLEMONT, *Le relevé 3D à l'heure du BIM*, Woluwe-Saint-Etienne: Buildwise, 52018.
- [8] Y. Hyun-Jae, *Analyse et conception de scanners laser mobiles dédiés à la cartographie 3D d'environnements urbains*. Paris : École Nationale Supérieure des Mines, 2014.
- [9] L. DAOUD, *Étude de la capacité de la photogrammétrie sans cibles pour la mesure de tuyauteries*. Paris : École normale supérieure de Cachan, 2015.
- [10] C. BAGIEU, *Lasergrammétrie terrestre : Préalable – Introduction – Prise en main – Étude de cas*, Anglet : Lycée Cantau, s.d.