



INNOVATION PAPER

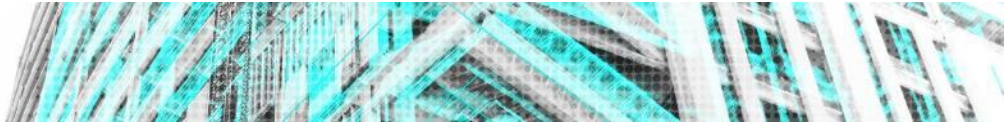
Le relevé géométrique à haute définition

La numérisation 3D à l'heure du BIM

Mars 2017



Réalisé dans le cadre de la Guidance Technologique en Écoconstruction et Développement Durable en Région Bruxelloise avec le soutien d'Innoviris



INNOVATION PAPER

Un 'Innovation Paper' a pour objectif de rendre les nouvelles tendances, technologies ou pratiques de l'industrie de la construction plus compréhensibles. À cette fin, ce document fournit des informations concernant une technologie ou une pratique spécifique, en mettant l'accent sur les opportunités et les contraintes pour les professionnels de la construction. Le lecteur et le professionnel du secteur pourra ainsi se forger une idée des possibilités qui en découlent pour le développement de ses activités.

Ces rapports sont réalisés dans le cadre de la Guidance Technologique Écoconstruction et Développement Durable en Région de Bruxelles-Capitale avec le soutien d'InnovIRIS, l'Institut Bruxellois pour la Recherche et l'Innovation.

Ces rapports ne constituent pas des publications officielles du CSTC.

La reproduction ou traduction, même partielle, du texte de ce rapport scientifique n'est autorisée que suite à une autorisation écrite explicite de l'éditeur. Le rapport doit être considéré comme informatif. Le lecteur est entièrement responsable de l'utilisation du texte, de son interprétation et des décisions découlant de la lecture de ce rapport. Le CSTC ne peut en aucun cas être tenu responsable d'éventuels dommages résultant de l'application des principes présentés. Le CSTC ne peut en aucun cas agir comme architecte ou consultant et ne sera donc pas tenu responsable des responsabilités qui découlent de tels rôles.

Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International



INNOVATION PAPER

Le relevé géométrique à haute définition

La numérisation 3D à l'heure du BIM

Auteurs

Samuel Dubois, Yves Vanhellemont, Michael de Bouw
Centre Scientifique et Technique de la Construction (CSTC)

Objectif général de la publication

Garantir à chacun de disposer d'un bon niveau de compréhension des possibilités mais aussi des limites inhérentes aux technologies de numérisation à haute définition. Donner quelques perspectives quant aux évolutions pressenties de ces technologies et de leur incorporation dans les procédures des professionnels de la construction.

Résumé

La documentation fiable est une condition nécessaire pour une planification efficace autour des bâtiments existants. Pour la rénovation, le relevé géométrique est une étape essentielle au cours des phases de préprojet, pour l'élaboration des objectifs détaillés, pour la conception des interventions, pour le suivi du chantier ou encore pour la mise en service. Quand il s'agit de gestion, il est parfois utile de suivre l'évolution de données géométriques d'un composant, bâtiment, ou quartier au cours du temps ou simplement de pouvoir le situer spatialement dans un ensemble plus grand. La technique de relevé traditionnelle est basée sur l'évaluation de points discrets à la surface d'un objet. Cette méthode fournit des informations très fidèles à la réalité mais sa mise en œuvre peut s'avérer fastidieuse si l'on veut accroître le niveau de détail sur la façade. Face à cette technologie aujourd'hui mature, des méthodes de mesure tridimensionnelle avancées sont apparues et peuvent répondre à des besoins plus spécifiques. La numérisation à haute définition permet en effet de relever des millions de points sur la surface d'un objet, de manière très précise.

Ce document passe d'abord en revue les évolutions récentes des technologies de mesure géométrique, associées à l'apparition du relevé à haute résolution. Depuis le balayage laser, qui a ouvert la voie, jusqu'aux approches de reconstruction photogrammétrique sur base de simples photographies. Les technologies pertinentes à l'échelle des parois, pièces et bâtiments sont présentées et comparées à la lumière de critères clairs. Différentes applications possibles sont ensuite détaillées, ainsi que la chaîne de travail numérique qui y est nécessairement associée. L'intégration dans la démarche BIM en tant qu'outil de collecte d'informations géométriques sera aussi détaillée avec des perspectives claires quant aux bénéfices pour les acteurs concernés. Les risques inhérents à l'utilisation de ces technologies ne seront pas passés sous silence. Pour conclure, les perspectives de développements technologiques ainsi que la récupération possible de la part de l'industrie de la construction seront abordées.

Table des matières

| | |
|---|-----|
| Table des matières..... | i |
| Abréviations et lexique..... | iii |
| 1. Contexte..... | 1 |
| 1.1. Pourquoi des relevés?..... | 1 |
| 1.2. Le relevé numérique haute définition..... | 2 |
| 2. Vue générale sur les techniques HDS..... | 4 |
| 2.1. Terminologie..... | 4 |
| 2.1.1. Typologies des modèles 3D..... | 4 |
| 2.1.2. Situer le modèle dans l'espace..... | 7 |
| 2.1.3. Attribuer une signification au modèle..... | 8 |
| 2.1.4. Transformer la nature du modèle numérique..... | 9 |
| 2.2. Techniques d'acquisition pour la numérisation à haute résolution..... | 9 |
| 2.2.1. Balayage laser (TLS)..... | 10 |
| 2.2.2. Reconstruction photogrammétrique par corrélation d'images (RPCI)..... | 13 |
| 2.2.3. TLS versus RPCI..... | 18 |
| 2.2.4. Autres méthodes..... | 19 |
| 3. Etapes clés d'un relevé HDS sur chantier..... | 21 |
| 3.1. Définition du cahier des charges et attribution du marché..... | 21 |
| 3.2. Planification de l'étude..... | 21 |
| 3.3. Phase d'acquisition sur le terrain, en atelier, ou en laboratoire..... | 22 |
| 3.4. Traitement des données brutes..... | 22 |
| 3.4.1. Prétraitement..... | 22 |
| 3.4.2. Contrôle qualité..... | 23 |
| 3.4.3. Transformations du modèle et traitements avancés..... | 23 |
| 3.5. Mise en forme finale et transmission des livrables..... | 24 |
| 4. Situation actuelle dans le secteur de la construction en Belgique..... | 24 |
| 5. Analyse des opportunités..... | 25 |
| 5.1. Objectifs d'une étude HDS..... | 25 |
| 5.1.1. Numériser pour placer le bâtiment dans l'espace et/ou le temps..... | 26 |
| 5.1.2. Numériser pour comprendre un bâtiment ou une partie de celui-ci..... | 26 |
| 5.1.3. Numériser pour mesurer, diagnostiquer et évaluer..... | 27 |
| 5.1.4. Numériser pour communiquer entre acteurs..... | 28 |
| 5.1.5. Numériser pour concevoir et fabriquer..... | 29 |
| 5.1.6. Numériser pour administrer..... | 30 |
| 5.1.7. Numériser pour contrôler..... | 30 |
| 5.2. Modèles finaux et chaîne de travail numérique..... | 31 |
| 5.2.1. Utilisations simples pour la visualisation et le dessin architectural..... | 31 |
| 5.2.2. Utilisations avancées..... | 34 |
| 6. Intégration des scans dans une démarche BIM..... | 38 |
| 6.1. Qu'est-ce que le BIM?..... | 38 |
| 6.2. Le « Scan-to-BIM »..... | 39 |
| 6.3. Le « Scan-vs-BIM »..... | 41 |
| 7. Définition du cahier des charges pour le géomètre chargé du relevé HDS..... | 42 |

| | | |
|--------|--|----|
| 8. | Analyse des obstacles | 44 |
| 8.1. | Freins globaux à l'utilisation des technologies HDS..... | 44 |
| 8.2. | Obstacles lors de la réalisation d'un relevé HDS..... | 45 |
| 8.3. | Quelques implications réglementaires..... | 47 |
| 8.3.1. | Sécurité sur chantier | 47 |
| 8.3.2. | Confidentialité et vie privée..... | 48 |
| 8.3.3. | Droits, obligations et responsabilités | 48 |
| 9. | Développements futurs..... | 48 |
| | Références..... | 50 |
| | Annexe: le cheminement de l'information 3D | 51 |

Abréviations et lexique

| | |
|--------------|--|
| 2D/3D | Deux/Trois Dimensions |
| BES | 'Building Energy Simulation' (Simulation énergétique du bâtiment) |
| CAD | 'Computer Aided Design' (Conception assistée par ordinateur – CAO en français) |
| CAM | 'Computer Aided Manufacturing' (Construction assistée par ordinateur – FAO en français) |
| DOF | 'Depth Of Field' (Profondeur de champ) |
| FEM | 'Finite Element Modeling' (Modélisation à éléments finis) Désigne un processus de modélisation où un phénomène physique est simulé sur un élément géométrique en subdivisant ce dernier en petites régions de calcul |
| HAM | 'Heat Air and Moisture' (Chaleur, air et humidité) Désigne une catégorie de simulations numériques, dynamiques ou statiques, où l'on modélise les transferts couplés d'air de chaleur et d'humidité dans un élément de construction ou au niveau du bâtiment entier |
| HDS | 'High Definition Survey' Désigne un relevé géométrique qui produit un modèle 3D de haute définition, généralement sous la forme d'un nuage de points |
| HVAC | 'Heating, Ventilation and Air-Conditioning' (Production de chaleur, ventilation et air conditionné) |
| IMMS | 'Indoor Mobile Mapping System' (Système de relevé mobile en intérieur) Désigne un appareil de relevé haute définition monté sur une plateforme roulante fonctionnant en environnement intérieur |
| LIDAR | 'Light Detection and Ranging' Technologie de mesure de la distance basée sur l'analyse des propriétés d'une lumière laser renvoyée vers son émetteur |
| LOS | 'Line Of Sight' (Ligne de vue) |
| RGB | 'Red, Green, Blue' (Rouge, vert, bleu) |
| RPCI | Reconstruction Photogrammétrique par Corrélation d'Images Désigne une méthode numérique par laquelle un modèle 3D haute résolution d'un objet est reconstruit à partir de photos sous différents points de vue de cet objet. |
| SIFT | 'Scale Invariant Feature Transform' Algorithme de détection de points de correspondance entre plusieurs images |
| SIG | Système d'Information Géographique |
| SFM | 'Structure From Motion' Désigne une catégorie d'algorithmes d'optimisation qui génèrent des nuages de point à basse définition à partir de multiples photographies, ainsi que les paramètres des caméras utilisées pour générer ces photographies |
| TLS | 'Terrestrial Laser Scanner' (Scanner laser terrestre) Méthode de relevé numérique à haute définition par balayage utilisant la technologie LIDAR. Aussi appelé « balayage laser » ou « lasergrammétrie ». |
| TOF | 'Time Of Flight' (Temps de vol) |

1. Contexte

1.1. Pourquoi des relevés ?

De la documentation fiable est une condition nécessaire pour une planification efficace autour d'un bâtiment existant. Il existe de nombreuses méthodes **pour capturer l'aspect, les formes, les dimensions et/ou la texture d'un bâtiment ou d'une partie de celui-ci**. On parle de « relevé » du bâtiment, une étape centrale dans la réflexion qui entoure la planification des étapes de transformation ou de gestion de l'existant. Pour un projet de rénovation par exemple il est nécessaire de rassembler **des informations précises concernant la géométrie « as-built » du bâtiment**. Le principal avantage d'une étude géométrique bien réfléchie réside dans la réduction significative des erreurs commises sur chantier et des frais qui en découlent. Cela peut réduire la nécessité de décisions « sur le vif », potentiellement coûteuses. Or, il faut dire que la documentation d'un bâtiment existant est souvent indisponible (égarée ou inexistante) ou inadaptée (problème d'échelle, plans non à jour, plans d'esquisse non conformes à la situation réelle [1]).

Le relevé est donc un point de pivot **essentiel au cours des étapes d'étude et de conception**. Il servira également pour l'élaboration des objectifs détaillés, pour le suivi du chantier ou encore pour la mise en service. Les techniques existantes pour le relevé sont nombreuses, et les types de modèles qui en ressortent le sont tout autant. Malgré son coût, un relevé bien défini est le meilleur moyen d'obtenir une base documentaire solide, qu'il soit réalisé sur la totalité de l'immeuble ou seulement sur l'une de ses parties [1].

Outre les transformations de l'existant, des relevés judicieusement élaborés peuvent également appuyer la **gestion d'un bâtiment ou d'un patrimoine immobilier**. Il est en effet parfois essentiel de pouvoir suivre l'évolution de données géométriques au cours du temps ou simplement de pouvoir situer spatialement un bâtiment ou un élément architectural dans un ensemble plus grand. Il peut s'agir d'actualiser un inventaire, d'étudier l'état d'un monument ou bâtiment historique, ou encore de suivre les transformations d'un quartier.

Les techniques de relevé traditionnelles sont basées sur l'évaluation de la position de **points discrets** à la surface de l'objet en mesurant des distances ainsi que des angles verticaux et horizontaux. Les tachéomètres modernes, ou « stations totales » sont entièrement automatisés et permettent d'enregistrer les coordonnées de l'objet scanné sur ordinateur en vue d'un traitement ultérieur. Ces appareils combinent un théodolite numérique et des technologies de télémétrie électronique. Cette technique fournit **des informations très fidèles à la réalité. Toutefois, elle peut s'avérer fastidieuse si l'on veut accroître le niveau de détail sur la façade**, en raison du temps nécessaire au relevé des points [2]. De plus, si la technique est précise, la qualité **dépend fortement de l'utilisateur**, dans la mesure où l'opérateur doit « viser » des points d'intérêt sélectionnés sur la façade et les référencer correctement.

Face à cette technologie aujourd'hui aboutie, les possibilités offertes par des solutions plus récentes viennent bousculer les codes de l'industrie. Les exigences en termes de mesure devenant de plus en plus poussées, notamment par le biais de l'industrialisation croissante du secteur, des technologies 3D avancées sont apparues afin de répondre aux besoins existants qui requièrent une documentation plus complète.

1.2. Le relevé numérique haute définition

L'ensemble des secteurs industriels connaissent des évolutions importantes liées aux technologies numériques et aux immenses possibilités que ces dernières ont à offrir. Les représentations tridimensionnelles d'objets y jouent souvent un rôle central que ce soit pour la communication, la conception, la production ou l'exploitation. **La modélisation tridimensionnelle des bâtiments est déjà utilisée par de nombreux acteurs**, mais principalement à petite échelle au cours des phases de conception et de manière sporadique (modélisation énergétique en construction neuve). La véritable révolution attendue est celle de la mise en place de processus d'échange entre acteurs autour d'une maquette numérique intelligente et interactive : **le BIM (Building Information Model/Modelling/Management)**.

En compléments des outils 3D pour la modélisation et la planification, **les techniques de numérisation géométrique de l'existant ont un rôle essentiel à jouer**. Car à l'époque actuelle, le relevé des bâtiments est presque toujours indissociable d'une « numérisation des bâtiments », à savoir une transcription de données géométriques **dans un environnement tridimensionnel numérique**. Il est à présent possible de relever des **millions de points géométriques** sur la surface d'un bâtiment (en intérieur/extérieur) ou d'un de ses composants, avec une précision redoutable (**Figure 1**). On parle de **HDS pour High Definition Surveying**. Pour comprendre ces technologies, il est utile de s'attarder sur le fonctionnement d'un scanner laser, l'appareil même qui a ouvert la voie à un HDS de précision. Car bien que la station totale reste l'instrument de mesure de prédilection des géomètres, les améliorations des technologies de **balayage laser** ouvrent la voie à des études géométriques particulièrement innovantes. Les scanners laser émettent des faisceaux laser qui permettent de mesurer une distance alors qu'ils retournent vers la source après avoir ricoché sur la surface à mesurer. La technologie actuelle permet d'envoyer des milliers de faisceaux par seconde, ce qui résulte en un **'nuage de points'** dans l'espace tridimensionnel. Chaque point collecté est référencé dans l'espace par rapport à l'appareil de mesure, avec une précision pouvant atteindre le millimètre.

À côté des scanners lasers, on trouve aussi les approches de **reconstruction photogrammétrique automatique sur base de multiples images**, développées récemment au sein des méthodes de photogrammétrie rapprochée (**Figure 2**). On parle parfois également de « **reconstruction photogrammétrique dense** » ou « **corrélation épipolaire dense** ». Ces techniques innovantes ne nécessitent pas d'autre équipement qu'un simple appareil photo et peuvent aussi transcrire l'existant en nuages de points à haute résolution. Bien qu'offrant des possibilités inédites pour la numérisation, notamment en termes de retranscription texturale, ces techniques nouvelles requièrent des compétences spécifiques, en particulier pour le traitement des fichiers numériques. À une échelle plus petite, on peut aussi mentionner les techniques de caméra à temps de vol ou encore les microscopes électroniques pouvant reconstruire la microstructure d'un matériau sur base de l'analyse du plan focal.

L'apparition des drones (aéronef sans pilote à bord) constitue une évolution relativement récente pour le relevé géométrique, avec d'énormes potentialités mais aussi des questions en suspens. Il s'agit davantage d'un « vecteur de mesure » qu'une « technique de mesure ». En effet, ces véhicules volants légers (**Figure 3**) peuvent être équipés d'appareils de mesure géométrique, ce qui permet d'avoir accès à certaines parties du bâtiment qui peuvent être difficiles à analyser par d'autres moyens (p.ex. pour les immeubles élevés, les toitures). Dans sa forme la plus simple, un drone aérien peut être équipé d'une caméra pour récolter un grand nombre d'images ou de vidéos autour du bâtiment. Ces images peuvent ensuite être traitées à l'aide de techniques photogrammétriques. En Belgique, l'usage des drones est réglementé par un Arrêté Royal [3]. Malheureusement, le contenu de cet arrêté impose de nombreuses restrictions d'usage professionnel.



(a)



(b)



(c)

Figure 1. Nuage de points obtenu à l'aide d'un relevé au scanner laser : (a) vue générale du site; (b) zoom partiel sur une partie du bâtiment; (c) zoom partiel sur un élément architectural. Source : CSTC, De Ceuster

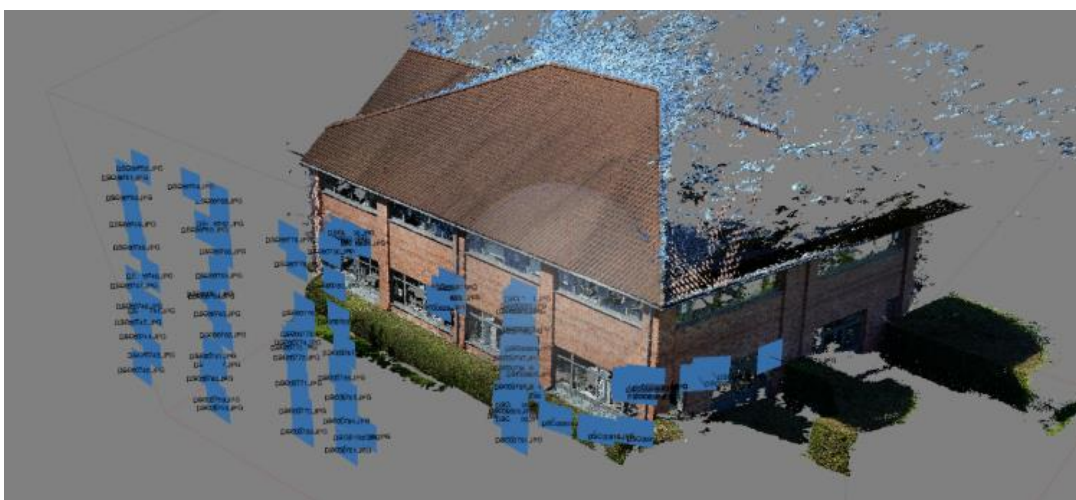


Figure 2. Reconstruction d'un bâtiment sous forme d'un nuage de points à haute définition, sur base de simples photos. Sources : CGEOS, DroneTechniXX

Bien que les nuages de points résultants des méthodes HDS représentent déjà une source d'information très puissante, beaucoup de **traitements numériques** peuvent y être appliqués afin de générer une gamme étendue de modèles dérivés. Une application prometteuse est la **transformation du relevé 3D en un modèle BIM**, avec des objets associés à un ensemble de métadonnées. Parallèlement à un bouleversement des méthodes de conception et de planification offerte par le BIM, d'autres technologies liées à la manipulation d'informations 3D viennent bousculer les méthodes de travail traditionnelles. **Robotisation, impression 3D ou réalité virtuelle** secouent les codes d'une industrie de la construction confortable dans ses routines. Ici aussi, la numérisation HDS à son rôle à jouer, comme intermédiaire entre le monde physique et numérique.

Les relevés HDS sont déjà utilisés dans de nombreuses industries. Pourtant, leur adoption dans l'architecture et la construction est relativement récente et leur potentiel dans la gestion de projets de rénovation et/ou exploitation n'a pas encore été complètement saisi par les clients potentiels [4]. Cet article vise à présenter différentes techniques en détail, mettre en évidence les opportunités rapidement appropriables pour ces acteurs, mettre en garde contre certains obstacles et mettre en avant des évolutions futures possibles. Le focus sera mis sur les méthodes à l'échelle du bâtiment bien que des exemples à échelle plus grande ou plus petite soient fournis.



Figure 3. Utilisation d'un drone pour le relevé photogrammétrique d'un bâtiment. Source : CSTC, Drone TechniXX

2. Vue générale sur les techniques HDS

2.1. Terminologie

2.1.1. Typologies des modèles 3D

Avant d'entamer le descriptif des différentes techniques HDS, il est indispensable de faire un court rappel sur les **différents types de modèles 3D**. En effet, la rédaction d'un cahier de charge de relevé haute définition du bâtiment est indissociable d'une **définition précise et complète des livrables** ainsi

qu'éventuellement des précisions quant à l'utilisation finale de ces livrables. Cela couvre entre autres la définition du **type de modèle 3D, du format de sortie désiré et d'éventuelles données contextuelles et environnementales**.

Lorsqu'il est question du type de modèle, il est d'abord essentiel de distinguer **les modèles directs** « tels que saisis », issus du relevé, **des modèles indirects** ou « construits » obtenus par un processus de modélisation ou par reconstruction à partir de photos. La sortie type d'une méthode de relevé HDS est **un nuage de points (Figure 4a)**. Ce dernier peut donc être généré directement comme pour le scanner laser ou indirectement comme pour beaucoup de logiciels de reconstruction photogrammétrique. A minima, les formats informatiques de nuage de points enregistrent la localisation X, Y, Z de chaque point dans l'espace. **Une donnée de couleur** peut être adjointe à chaque point (généralement une valeur de 0 à 255 pour chaque composante : Rouge, Vert, Bleu – RVB ou RGB en anglais). **La valeur d'intensité est propre au scanner laser** et donne une indication sur l'intensité du retour du faisceau vers l'élément senseur, après avoir rencontré la surface analysée (voir point **2.2.1**). Bien que d'autres données puissent être collectées au sein du fichier, les clients n'auront généralement pas besoin de davantage d'information [4] ; les données géométriques et colorimétriques étant l'intérêt principal pour la majorité des études.

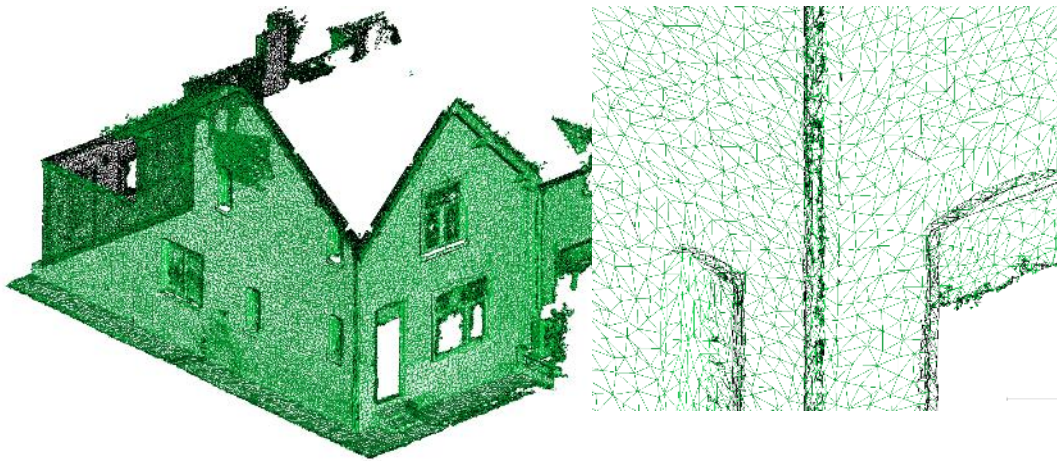
Un deuxième type de modèle est le **maillage polygonal** composé d'un ensemble polyédrique décrit par des sommets et des arêtes formant des triangles (on parle donc aussi de maillage triangulé) (**Figure 4b**). Il s'agit donc d'une représentation continue de l'objet. Les surfaces délimitées par les différentes arêtes peuvent être représentées (**modèle surfacique**) ou non (**modèle filaire**). De tels modèles sont souvent obtenus par transformation à partir d'un nuage de points, généralement au moyen d'un algorithme automatique dit de « **polygonisation** » ou « **facettisation** ». Cependant, certaines méthodes de reconstruction photogrammétrique généreront directement de tels maillages comme sortie pour l'utilisateur.

Les **modèles géométriques** sont quant à eux issus strictement d'un **processus de modélisation** à partir d'un nuage de points ou d'un maillage à l'aide de primitives géométriques telles que des plans ou des cylindres. Les primitives peuvent être uniquement des volumes, générés par exemple par extrusion, auquel cas on peut parler de modèle solide. Une telle approche génère des modèles plus sobres au niveau esthétique et plus légers. En revanche, une grande partie des détails de surface est perdue. Dans sa forme la plus aboutie, la démarche de modélisation visera à créer des « **objets paramétriques** » auxquels des propriétés peuvent être associées; il s'agit de la base de la création d'un « Building Information Model » (voir **section 6**).

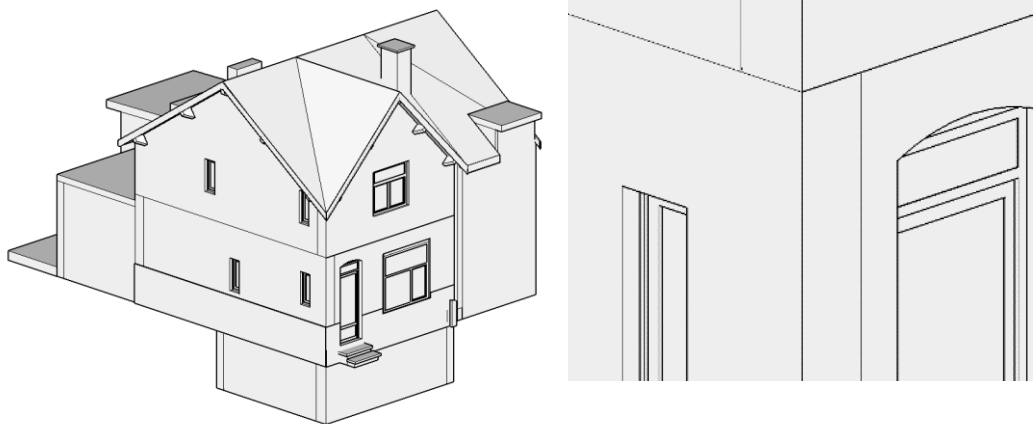
Au-delà du type de modèle, le format utilisé est d'une importance cruciale. Il y a en premier lieu les **formats dits constructeurs**, propres aux logiciels propriétaires. Pour les nuages de points on peut citer le format *.rcp pour *Autodesk*, le *.pts pour *Leica*, ou encore le *.fls pour *Faro*. L'utilisation de tels formats est déconseillée pour la communication entre différents acteurs car il est peu probable que ces derniers utilisent tous le même programme de modélisation. La transformation d'un format propriétaire en **un format ouvert** (tel que le *.las pour un nuage de points ou *.stl pour un maillage) est alors souhaitable en vue de garantir un flux de travail optimal. Notons qu'une telle conversion ne peut généralement se faire qu'au sein du logiciel correspondant au format propriétaire, et c'est donc l'acteur bénéficiant de la licence commerciale qui doit se charger de l'opération. Les formats ouverts sont supportés par la plupart des logiciels et limitent le risque de voir apparaître des problèmes d'interopérabilité.



(a)



(b)



(c)

Figure 4. Quelques types de modèle : un nuage de points de haute résolution avec information RGB (a), un modèle filaire (b), un modèle solide issu d'une modélisation paramétrique (c). Sources : CSTC, De Ceuster

2.1.2. Situer le modèle dans l'espace

Les coordonnées X, Y, Z d'un point peuvent être exprimées selon de nombreux référentiels. Si aucun référentiel spécifique n'est associé à l'appareil lors du relevé, la position absolue des points sera donc arbitraire. Pour certaines techniques, la dimension même des objets sera arbitraire, et seul le rapport de distance entre les différents points de l'objet sera respecté dans le nuage.

On peut donc appliquer **différents types de référencement** à des données tridimensionnelles. Il peut s'agir d'un référencement absolu, ou « géolocalisation », où la position de chaque point est donnée sur un référentiel terrestre, sur base de mesures GPS par exemple. On peut également choisir un référencement local, avec une origine (0, 0, 0) choisie sur base pratique.

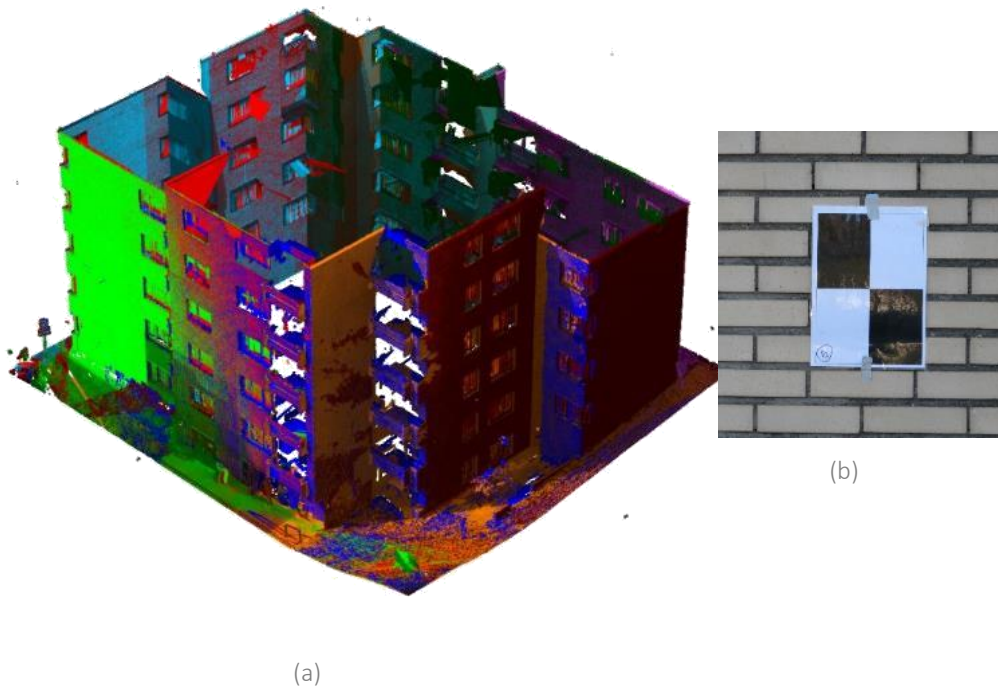


Figure 5. Calage de nuages de points issus de scans laser: (a) modèle calé où les différents scans sont correctement alignés (chaque scan est représenté par une couleur différente); (b) exemple d'une cible utilisée dans le processus de calage. Sources : CSTC, De Ceuster

Un problème récurrent lors de l'utilisation des techniques HDS sans référencement direct est de se retrouver avec plusieurs nuages de points, représentant plusieurs points de vue sur un même objet (par exemple les différentes façades d'un bâtiment), mais orientés chacun de manière arbitraire dans l'espace. Le rôle du géomètre va être de réorienter chacun de ces nuages les uns par rapport aux autres, ou autrement dit, leur assigner un référentiel spatial commun. On parle de « **calage des modèles** » ou de « **consolidation** ». La stratégie la plus répandue pour effectuer ce calage est de relever des points de références à l'aide d'une station totale. À cette fin, on peut utiliser différents types de « cibles » apposées à des endroits clés sur l'objet à relever (**Figure 5**). La consolidation peut aussi être réalisée sur base de zones de recouvrement entre les différents nuages. Cela nécessite de s'assurer d'un recouvrement suffisant, et la fiabilité du calage dépendra de la robustesse des algorithmes utilisés.

2.1.3. Attribuer une signification au modèle

Les points géométriques qui constituent un nuage ne possèdent intrinsèquement aucune information sémantique. En d'autres termes, les points ne sont pas « groupés » selon certains attributs (orientation, élévation, identité, etc.). C'est par exemple à l'opérateur à regrouper les points appartenant à un même élément architectural (p.ex. mur, colonne, châssis, ...) pour leur attribuer cette valeur d'appartenance. C'est le processus simple de « **segmentation** », qui peut aussi être complété ultérieurement lors de la modélisation géométrique sur d'autres types de modèles (Figure 6). Si la segmentation manuelle est un processus long et pointilleux, c'est une étape bien souvent inévitable. Les solutions semi-automatiques ou automatiques sont encore rares.

Plus loin, on peut modéliser des groupes de points ou des parties de maillage par des « **objets paramétriques** » qui possèdent un ensemble d'attributs, géométriques et non géométriques, qu'il faudra définir. Il s'agit par exemple de modéliser une colonne à l'aide d'un objet géométrique cylindrique « colonne », où en plus des attributs permettant de générer sa forme, l'utilisateur pourra encoder toute une série de paramètres tels que le matériau, la date de construction, etc. On entre alors dans un processus BIM (Building Information Model) (voir section 6) et on peut parler de **modélisation sémantique** (Figure 7).

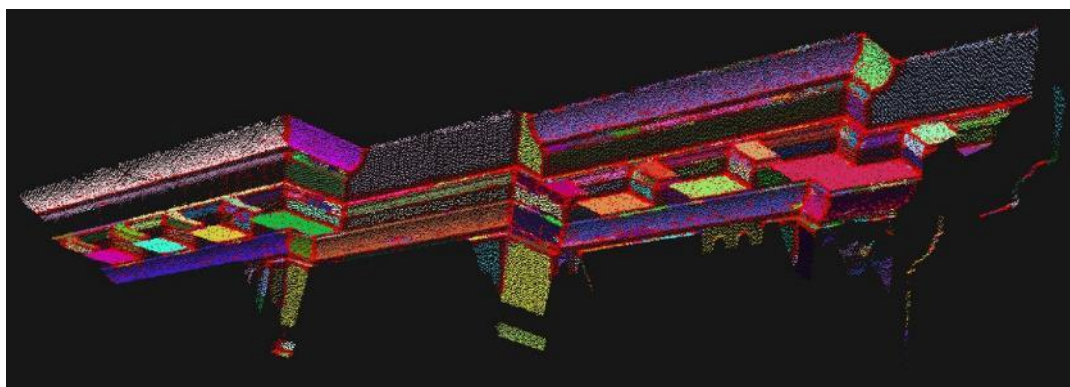


Figure 6. Segmentation d'un nuage de points sur base d'un algorithme. Source : Documentation PCL [5]



Figure 7. Modélisation sémantique d'un nuage de points en objets paramétriques dans un workflow BIM. Source : Autodesk

2.1.4. Transformer la nature du modèle numérique

L'information numérique est par nature hautement transformable. Il est ainsi possible de transformer le modèle 3D d'un type à un autre ou d'un format à un autre. Plus loin encore, il existe la possibilité de changer la nature même du modèle par un processus de modélisation. Une opération très courante est la transformation d'un modèle 3D en dessin numérique en deux dimensions, de manière automatique, semi-automatique ou manuelle. L'exemple le plus simple est la réalisation d'une coupe au travers d'un nuage de points, sur base de laquelle on dessinera un plan d'étage en 2D. On peut aussi réaliser un dessin d'élévation sur base d'une orthoprojection du nuage de points. L'information 3D n'est d'ailleurs pas nécessairement totalement perdue lors d'un changement de nature 3D vers 2D. Il faut donc différencier :

- les fichiers strictement tridimensionnels, où l'utilisateur pourra orbiter librement autour d'un objet dans un environnement de modélisation
- Les fichiers où la vue est figée mais qui contiennent de l'information tridimensionnelle (p.ex. vue orthonormée d'une façade, ou la dimension de profondeur est représentée sous la forme d'un code couleur)
- Les fichiers où la vue est figée et qui ne contiennent uniquement une information 2D (p.ex. une élévation de façade)

2.2. Techniques d'acquisition pour la numérisation à haute résolution

La Figure 8 indique les méthodes de numérisation sans contact utilisant le spectre lumineux qui sont applicables dans le domaine de la construction. On peut premièrement distinguer les méthodes basées sur la triangulation, celles basées sur un décalage temporel (analyse du temps de vol d'un signal ou un décalage de phase entre émission et réception de ce dernier), et celles basées sur l'analyse d'images successives sans processus de triangulation. Il s'agit d'une possibilité de classement bien que d'autres soient possibles. On peut par exemple aussi distinguer les technologies basées sur un capteur actif (le capteur génère lui-même le signal de mesure, comme le balayage laser) de celles basées sur un capteur passif (comme la photogrammétrie).

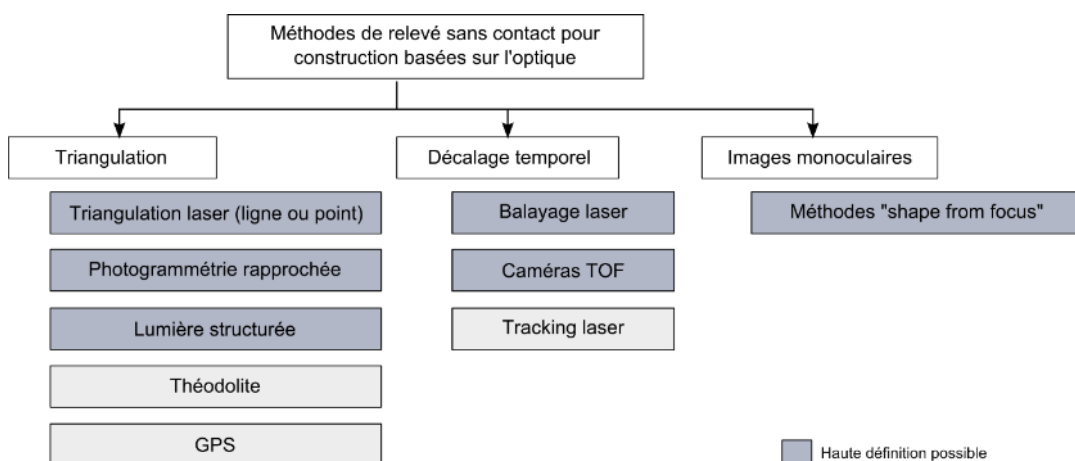


Figure 8. Les techniques de relevé sans contact basées sur le spectre lumineux et adaptées au domaine de la construction. TOF = Time Of Flight. Adapté de [6]

Numériser un bâtiment peut s’entendre de multiples manières : on peut vouloir relever certains points d’une façade ou d’une toiture, cartographier un espace intérieur ou encore mesurer la rugosité d’un parement en pierre. La résolution et la précision de la mesure requise peuvent également varier. Pour chacun de ces besoins la méthode la plus adaptée sera différente.

Le **Tableau 1** fournit une **classification des techniques les plus adéquates** selon les critères d’échelle de l’élément mesuré et de localisation de la mesure, qu’elle soit effectuée sur site (intérieur ou extérieur) ou en environnement contrôlé. Ainsi, la technique ou la combinaison de techniques privilégiée sera bien entendu différente selon que l’on vise à numériser l’entièreté de l’enveloppe extérieure du bâtiment ou un échantillon de matériau de construction en laboratoire. Dans ce document, on s’attardera en priorité sur les méthodes applicables à l’échelle du bâtiment entier, à savoir le balayage laser (aussi repris sous le terme de lasergrammétrie) et la photogrammétrie rapprochée, détaillés dans les sections qui suivent. Les autres méthodes seront abordées de manière synthétique au **point 2.2.4**.

Tableau 1. Classement des méthodes de relevé à haute définition les plus courantes pour le bâtiment selon des critères d’échelle et de localisation de mesure. En bleu le domaine traité plus en détail dans ce document

| | Extérieur (sur site) | Intérieur (sur site) | Environnement contrôlé (laboratoire ou atelier) |
|--------------------------|---|--|--|
| Échelle >1 m | <i>(p.ex. façades)</i> <ul style="list-style-type: none"> Balayage laser Photogrammétrie | <i>(p.ex. espace intérieur)</i> <ul style="list-style-type: none"> Balayage laser Photogrammétrie* | <i>(p.ex. élément de façade préfabriqué)</i> <ul style="list-style-type: none"> Balayage laser Photogrammétrie Caméras TOF |
| Échelle 0,1-1 m | <i>(p.ex. détail architectural extérieur)</i> <ul style="list-style-type: none"> Balayage laser Photogrammétrie | <i>(p.ex. détail architectural intérieur)</i> <ul style="list-style-type: none"> Balayage laser Photogrammétrie Caméras TOF | <i>(p.ex. bloc de matériau analysé en labo, petit élément industriel préfabriqué)</i> <ul style="list-style-type: none"> Balayage laser Photogrammétrie Lumière structurée Caméras TOF |
| Échelle <0,1 m | <i>(p.ex. texture d’une pierre de parement analysée sur site)</i> <ul style="list-style-type: none"> Photogrammétrie | <i>(p.ex. texture d’un enduit)</i> <ul style="list-style-type: none"> Photogrammétrie | <i>(p.ex. microstructure d’une pierre de parement prélevé sur site)</i> <ul style="list-style-type: none"> Photogrammétrie Shape From Focus |

*La technique de reconstruction basée sur plusieurs images (voir 2.2.2) pose des problèmes pour les éléments de couleur unie. En conséquence, pour des murs unis ou avec des motifs répétés, cette approche est déconseillée.

2.2.1. Balayage laser (TLS)

Il existe divers principes de mesure pour le balayage laser, mais tous sont basés sur **l’analyse de la lumière réfléchie d’un rayon laser sur la surface d’un objet**. Les scanners laser sont des instruments de mesure active dits de « ligne-de-vue ou Line-Of-Sight (LOS) ». Les objets solides en premier plan créeront donc nécessairement des « zones d’ombre » en arrière-plan et les objets s’y trouvant ne pourront être transcrits géométriquement. Cela explique pourquoi un objet doit souvent être relevé à partir de plusieurs positions, afin de limiter au maximum ce type de zones invisibles.

Un scanner peut enregistrer un grand nombre de points par seconde. Chaque point est au moins défini par les éléments suivants :

- Ses coordonnées spatiales (X, Y, Z)
- Une valeur d'intensité (la magnitude de l'impulsion laser renvoyée par la surface de l'objet). Le nuage de points est colorisé en fonction de l'absorption du signal par les matériaux. Par exemple un mur blanc ressort en couleur bleue, un arbre plutôt foncé en rouge.

Les instruments susceptibles d'être utilisés pour l'étude de bâtiments sont les scanners statiques dits « scanners lasers terrestres » (**TLS en anglais pour Terrestrial Laser Scanners**). Ils sont généralement montés sur un trépied et balayent leur environnement par rotation. Il existe en outre deux catégories d'appareils, en fonction du principe de mesure : les systèmes par temps de vol et ceux par analyse de phase. Les principales différences entre leurs propriétés sont présentées dans le **Tableau 2**. Quelques modèles sont illustrés à la **Figure 9**.

L'utilisateur doit généralement définir **le champ de vision et le pas de balayage**. Le champ de vision représente la couverture angulaire du lieu étudié, tandis que la densité de points finale résulte de la définition du pas angulaire de balayage. Notons que le plus petit pas angulaire réalisable détermine la **résolution angulaire du scanner**. Comme indication pour l'utilisateur, l'appareil peut parfois exprimer la résultante finale en termes d'écart de point-à-point à une distance donnée (p.ex. 2mm/10m indique une distance de 2mm entre deux points lorsque l'appareil est installé à 10 m de l'objet à mesurer). Un exemple d'interface utilisateur qui permet de paramétrer la résolution désirée est fourni à la **Figure 10**.

Un nuage de points issu d'un TLS peut atteindre au final une résolution millimétrique. Cependant, **le principe de mesure, sous forme de « grille »**, nécessite des extrapolations géométriques pour représenter les « arêtes » d'un élément architectural, qui ne sont pas immédiatement détectables (**Figure 11**). De plus, au plus la surface scannée est loin de l'émetteur laser et oblique à son faisceau, au plus les points mesurés sur sa surface seront distants, et donc la résolution moindre. Pour un objet large comme un bâtiment, une résolution homogène ne peut être garantie qu'en recourant à plusieurs positions de scannage successives¹. Notons que certains systèmes permettent d'effectuer des mesures moyennes, mais l'acquisition est plus lente. La plupart des appareils TLS modernes sont également équipés d'une caméra standard permettant d'obtenir des informations en couleurs pour chaque point (valeurs RGB).

Dans certains cas spécifiques, on pourra également utiliser **des scanners mobiles de type « IMMS »** (Indoor Mobile Mapping Systems, voir **Figure 12a**). Ces scanners sont montés la plupart du temps sur une plateforme sur roulettes déplaçable en continu par l'utilisateur qui peut parcourir les espaces intérieurs d'un bâtiment. Cela permet de scanner de grands espaces rapidement, jusqu'à 5000 m² au sol par heure. L'appareil est en fait équipé d'un système permettant de corriger la mesure selon son déplacement. À l'heure actuelle, de tels systèmes sont cependant nettement moins précis que les solutions statiques; on peut espérer une précision de l'ordre du centimètre [8]. Il existe aussi des solutions portatives transportées par l'utilisateur (**Figure 12b**), aux avantages indéniables mais dont l'efficacité n'est pas encore suffisamment documentée. Pour les études à très grande échelle, des solutions mobiles embarquées sur des voitures, des hélicoptères ou des avions sont également possibles (**Figure 12c**). Le relevé laser est continu lors du déplacement du véhicule dont la position est enregistrée grâce à une **centrale à inertie** associée à un système de positionnement par satellites. Les données de positionnements sont alors utilisées pour ajuster les mesures laser. De tels systèmes sont encore généralement très volumineux et lourds, ce qui proscrit leur utilisation embarquée sur de petits vecteurs mobiles (comme les drones).

¹ Ce qui garantit en outre l'absence de « zones d'ombres ».



Figure 9. Quelques modèles de scanners laser actuels : (a) Analyse de phase, *Faro Focus 3D*; (b) Temps de vol, *Leica P30*; (c) Temps de vol, *Trimble TX8*. Sources : Faro, Leica, Trimble

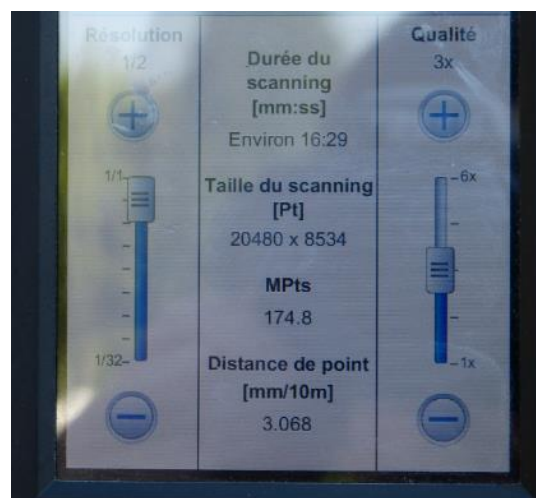


Figure 10. Exemple d'un menu de paramétrage d'un scanner laser. Source : CSTC

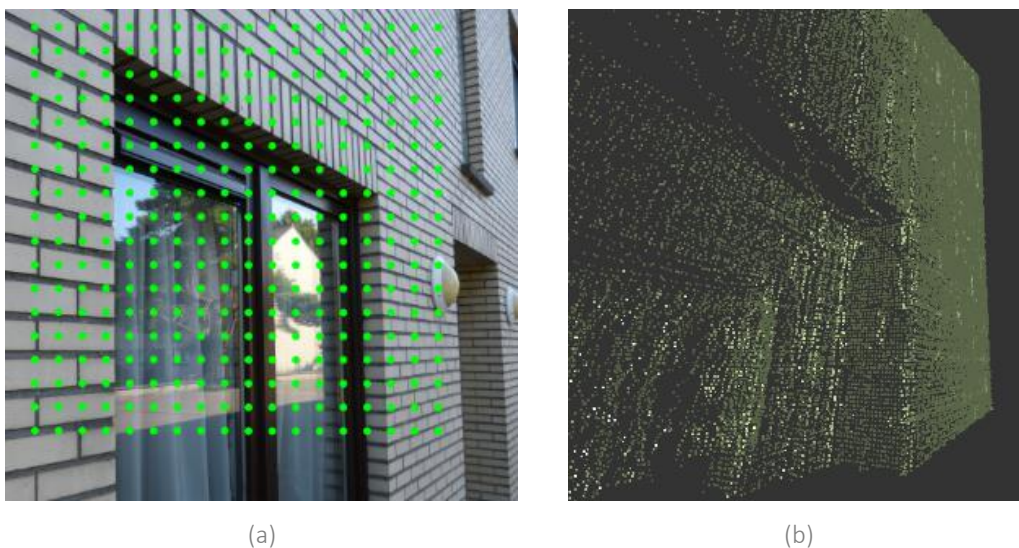


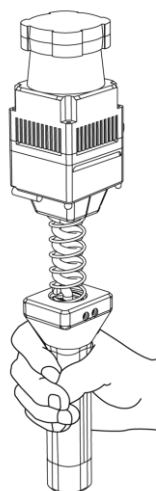
Figure 11. Les arêtes d'un objet ne sont pas immédiatement détectables avec un scanner laser : principe de mesure (a) et données brutes (b). Sources : CSTC, De Ceuster

Tableau 2. Caractéristiques des scanners laser terrestres. D'autres caractéristiques peuvent être évaluées à partir des bases de données de produits². Source : [7]

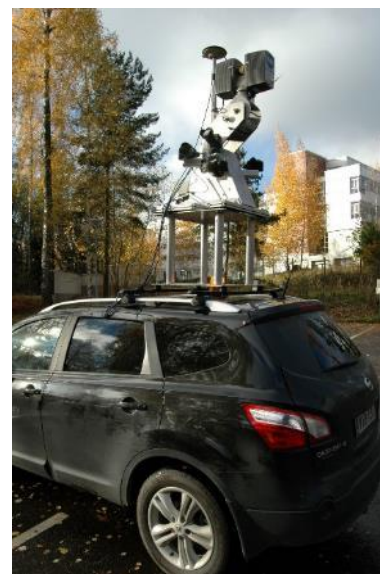
| | Temps de vol | Déphasage |
|-------------------------|--------------------------|------------------------|
| Fréquence d'acquisition | 10000 – 300 000 points/s | ~1 million de points/s |
| Distance minimale | 1 – 5 m | 0,3 – 0,5 m |
| Distance maximale | 300 – 6000 m | 80 – 180 m |
| Précision (longueur) | 3 – 5 mm @50 m | 2 – 3 mm @50 m |
| Précision (angle) | 0,0002 – 0,01 ° | 0,001 – 0,007 ° |
| Poids | 10 – 20 kg | 5 – 15 kg |



(a)



(b)



(c)

Figure 12. Plateformes mobiles pour le scanning laser : (a) Solution IMMS. Source : Trimble. (b) Solution portable. Source : Geoslam. (c) Solution embarquée sur un véhicule. Source : Centre of Excellence in Laser Scanning Research

2.2.2. Reconstruction photogrammétrique par corrélation d'images (RPCI)

La photogrammétrie est apparue au cours de la deuxième moitié du XIX^e siècle, juste après l'invention de la photographie. L'avènement des caméras digitales, l'évolution de leurs spécifications techniques et l'apparition de logiciels spécialisés pour le processus de calcul informatisé et de reconstruction ont nettement amélioré ses possibilités et élargi son champ d'étude. Ce document fait seulement référence à la photogrammétrie rapprochée, c'est-à-dire à **l'utilisation de photographies avec une distance objet-caméra de moins de 300 m**. Plus spécifiquement, on s'intéressera aux méthodes très récentes de reconstruction en 3D sur base d'une corrélation d'un grand nombre d'images. Car en quelques années, une transformation profonde des approches photogrammétriques s'est opérée en passant de techniques de modélisation hautement spécifiques et requérant un savoir-faire important à des méthodes de reconstruction complètement automatiques accessibles au plus grand nombre [9].

² Voir www.geo-matching.com/category/id46-terrestrial-laser-scanners.html

Principe

Cette technique est basée sur l'exploitation automatique de plusieurs images (**Figure 13**) : on reconstruit la topographie tridimensionnelle d'un objet au départ de projections bidimensionnelles de ce dernier : des photographies sous différents points de vue. Le flux de travail typique d'un logiciel de **reconstruction photogrammétrique par corrélation d'images** (RPCI) récent permet d'aboutir à une reconstruction 3D détaillée, qui peut être assez similaire en résolution à la sortie d'un TLS équipé d'un capteur photographique (un nuage de points 'X, Y, Z, R, V, B').

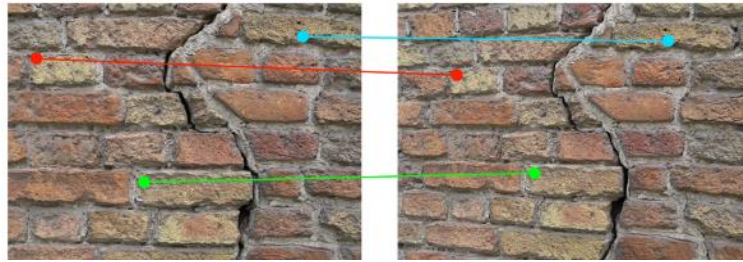
La première étape est la détermination de « points de liaisons » ou « points homologues » entre les différentes vues projetées de l'objet (**Figure 13b**). Il s'agit d'une **même zone de l'objet (p.ex. un coin de brique) ayant donc une apparence semblable sur plusieurs photographies (particulièrement si les photographies sont prises de positions très proches). Les points mis en correspondance sur les différentes photos permettront d'« orienter » l'objet en trois dimensions**. Avec les avancées dans le domaine de la vision par ordinateur, les techniques de détection automatique des points homologues (algorithme SIFT pour « Scale Invariant Feature Transform », voir **Figure 14**) sont apparues récemment et ont fortement enrichi les approches de photogrammétrie classiques. Elles permettent à l'utilisateur de corréliser de nombreuses images de manière automatique, en contraste avec la technique traditionnelle de « stéréovision », aujourd'hui vieillissante, où l'on devait travailler par paire d'images et où les points de correspondance devaient être définis manuellement.

Sur base des positions des points homologues sur les différentes images, il est donc possible de retrouver des informations sur la position 3D de ces points et sur les paramètres de l'appareil utilisés pour produire les photographies (paramètres optiques, localisation de l'appareil dans l'espace, et orientation de l'appareil). Ce **processus d'optimisation** est appelé en anglais **SFM (Structure From Motion)**. Il produit un nuage de points de faible densité réparti sur les surfaces photographiées ainsi qu'une estimation des différentes positions, orientations, et paramètres optiques de l'appareil photo. À partir des images orientées, un deuxième processus d'optimisation permet de réaffiner le nuage de points et produire une reconstruction beaucoup plus dense, en se basant sur la calibration des caméras déterminée lors de la phase SFM. Cette deuxième phase, basée sur l'identification de correspondances pixels par pixels, est qualifiée de **reconstruction dense (ou « dense image matching » en anglais)**. Simplement dit, les techniques SFM et de reconstruction dense sont complémentaires et ne se basent pas sur les mêmes hypothèses; combinées, elles permettent de reconstruire l'objet étudié en trois dimensions et de manière très précise à partir de simples photos (**Figure 15**).

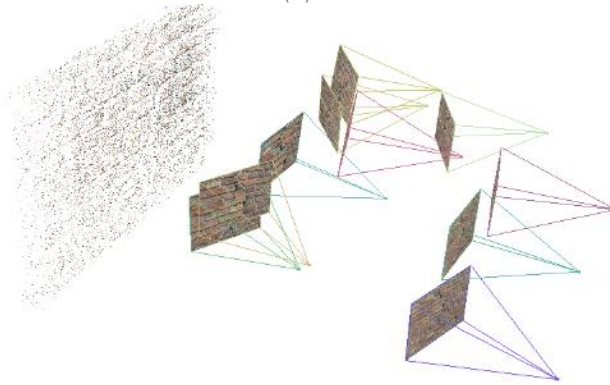
Les logiciels modernes fournissent un haut degré d'automatisation; **des nuages de points précis et à densité très élevée peuvent être créés à partir d'un très grand nombre de photos** (jusqu'à plusieurs centaines d'images traitées) sans requérir de connaissances poussées en photogrammétrie. Cependant, certains facteurs peuvent nuire à la qualité du nuage de points. Un autre inconvénient de la méthode, et non des moindres, réside dans la **puissance de calcul élevée requise** pour calculer un nuage de points à partir d'un grand nombre de photos.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 13. Principe de la reconstruction photogrammétrique par corrélation d'images : (a) sélection d'un ensemble de photographies d'un même objet ; (b) détermination automatique de points homologues entre les différentes vues de l'objet ; (c) reconstruction de la géométrie 3D de l'objet et des paramètres de l'appareil photo ; (d) reconstruction en nuage de points dense à partir des paramètres estimés durant l'étape précédente. Source : CSTC

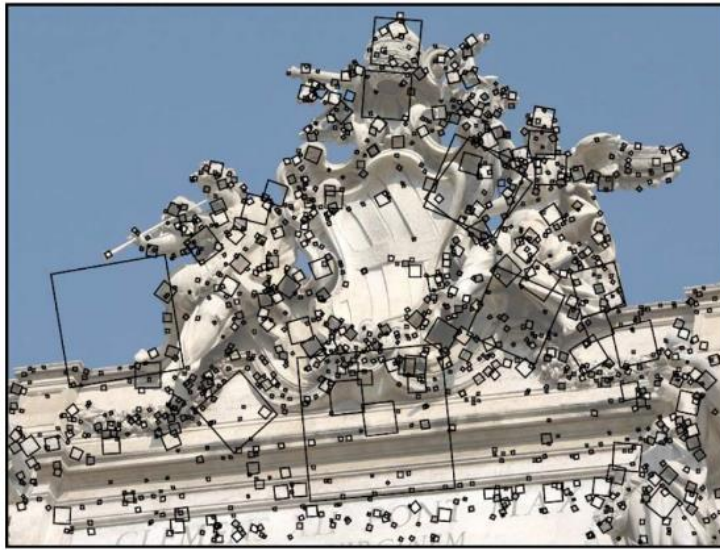


Figure 14. Détermination automatique de descripteurs sur l'image par l'algorithme SIFT. Ces zones seront appariées sur les différentes photos afin de déterminer la géométrie tridimensionnelle de l'objet. Source : [10]

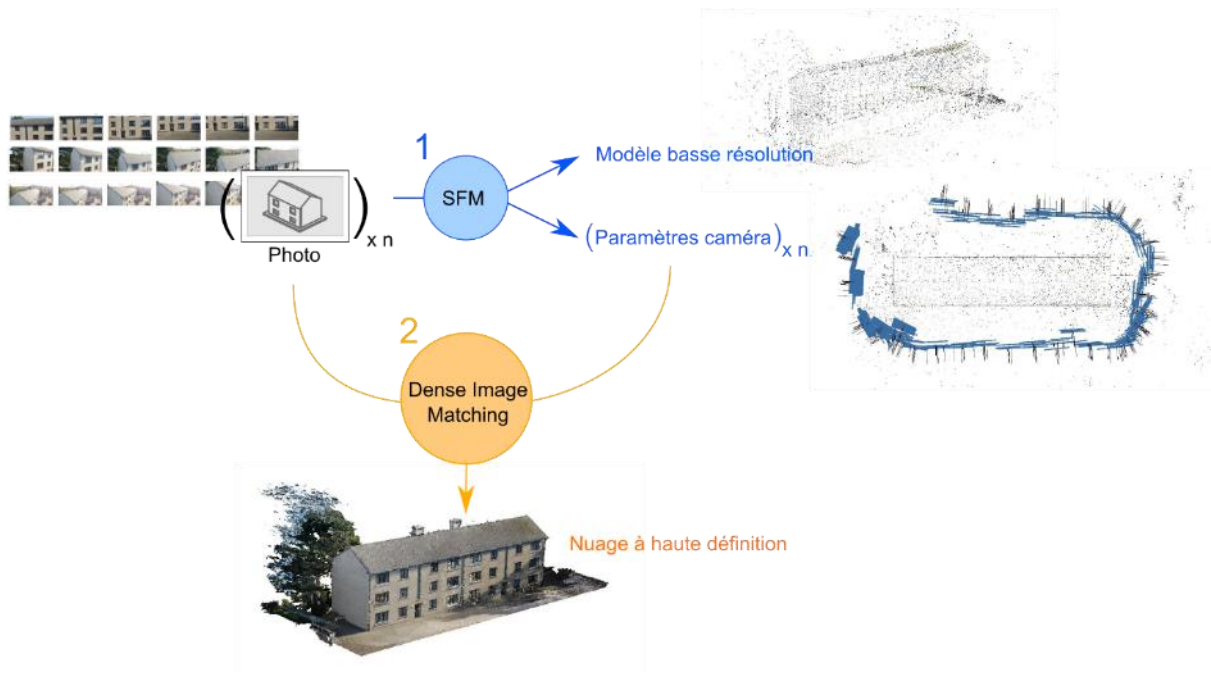


Figure 15. Principe d'une reconstruction photogrammétrique multi-images avec mise en évidence des deux étapes de calcul principales

Quels logiciels ?

La méthode de reconstruction par corrélation multiimages se distingue par la prédominance de la phase de calcul, et donc par **une importance cruciale dans le choix et le paramétrage du logiciel de reconstruction**. De nombreux logiciels existent et il n'est pas toujours facile pour l'utilisateur débutant de déterminer la solution la plus adéquate.

Il faut distinguer les trois grands types de solutions :

1) Les solutions web

Il s'agit de solutions simples, où les calculs sont réalisés par « Cloud computing » et les options limitées pour l'utilisateur. Beaucoup de personnes ont découvert la technologie de reconstruction multiimages au moyen de l'outil **Autodesk 123D Catch**, qui produit des maillages texturés et est souvent associé au monde de l'impression 3D. Une alternative dérivée, **Autodesk Recap 360 Photo**, offre davantage de possibilités (p.ex. limite plus grande pour le nombre de photos) mais le niveau de paramétrage reste cependant relativement faible. Microsoft **Photosynth** est un autre exemple sous la forme d'une interface web développée par Microsoft.

Un des inconvénients majeurs de ce type de solutions est l'aspect « boîte noire » qui caractérise le processus de calcul, où les étapes intermédiaires ne sont pas visibles pour l'utilisateur. La précision qui est offerte est malheureusement loin de ce que l'on peut atteindre avec d'autres logiciels. De plus, le nombre d'images traitables simultanément peut être fortement limité.

2) Les solutions gratuites

Cette deuxième famille de logiciels semble évidemment particulièrement attractive pour les utilisateurs aux ressources financières limitées. Néanmoins l'interface utilisateur, quand elle existe, est généralement moins intuitive et le processus d'apprentissage pour l'utilisateur peut être long et exigeant (une meilleure connaissance des algorithmes et théories sous-jacentes est souvent nécessaire).

Le logiciel **VisualSFM** développé par Wu en 2012 appartient à cette catégorie. Il a offert l'intégration de SIFT-GPU qui accélère grandement l'appariement des points similaires grâce à l'utilisation des processeurs graphiques dédiés. Un exemple Open Source est **MICMAC**; il s'agit d'un groupement d'outils qui permettent autant l'appariement des images (*TAPIOCA*), l'orientation (*TAPAS*), et la reconstruction dense (*C3DC*). Son utilisation est cependant complexe, de par l'absence d'interface utilisateur.

3) Les solutions commerciales

Le dernier type de logiciel est celui des solutions commerciales. **Photoscan** développé par Agisoft depuis 2006 est une solution très appréciée des professionnels. La précision des reconstructions peut être très bonne. **Photomodeller** fut longtemps un logiciel commercial leader pour la photogrammétrie rapprochée. On peut l'utiliser pour traiter des images de manière semi-automatique ou complètement automatique. Parmi les logiciels commerciaux à l'état de l'art on peut également mentionner **Pix4D**, **Zephyr**, **Context Capture** ou plus récemment **RealityCapture**. Certains paramètres importants à prendre en compte lors du choix d'une solution sont résumés au **Tableau 3**.

Tableau 3. Quelques facteurs importants pour le choix d'un logiciel de reconstruction photogrammétrique

- Prix de la licence d'utilisation permanente (~150 € - ~10 000 €)
- Limites imposées relatives aux fichiers d'entrée (nombre de photos, taille des photos, etc.)
- Vitesse de calcul pour les différentes étapes de reconstruction et utilisation optimale des ressources de calcul disponibles (multiprocesseurs, multi-GPU, etc.)
- Possibilité d'utiliser des points d'appui pour le calage et la mise à l'échelle et reconnaissance automatique des cibles de calage
- Possibilités d'exportation des modèles produits
- Possibilité de créer des modèles dérivés (orthophotographies, maillages, etc.)
- Traitement des zones potentiellement problématiques (surfaces unies, réfléchissantes, transparentes, etc.)
- Qualité du processus de texturage
- ...

2.2.3. TLS versus RPCI

Il est intéressant de **comparer les deux méthodes les plus courantes pour le relevé HDS du bâtiment**, et de mettre en évidence leurs différences ainsi que les opportunités distinctes qui caractérisent leur utilisation. Le TLS reste la méthode la plus fiable pour le relevé haute définition des façades. Cependant, l'acquisition du matériel et des logiciels associés représente un coût important. La photogrammétrie pourra dans certains cas se présenter comme une alternative avantageuse.

La méthode RPCI est actuellement encore caractérisée par certaines limitations techniques. Son principal défaut se trouve dans **l'imprévisibilité de la qualité finale** de restitution qui est sujette à davantage de facteurs pouvant nuire à la justesse finale (repris dans le **Tableau 4**). Une bonne retranscription de l'existant demande une préparation avancée de la mission sur terrain et l'absence de surfaces problématiques sur l'objet étudié. On doit aussi noter que le temps de calcul nécessaire pour reconstruire une scène à partir de photos peut être très long et **exigeant en ressource informatique**. Et si on réalise que certaines photographies manquent afin de garantir une bonne reconstruction, il sera nécessaire de réeffectuer une séance de prise de vue; si les conditions de lumière sont alors différentes, l'ensemble de la série photographique pourrait devoir être réalisée à nouveau. Le tri des photos à utiliser pour la reconstruction est également une étape cruciale, où il faudra pouvoir supprimer les photos redondantes ou de qualité insuffisante, afin de garantir un temps de calcul et un résultat satisfaisants.

Le coût matériel initial de la méthode RPCI est souvent attractif en comparaison avec les méthodes plus traditionnelles. En outre, lorsqu'il est question d'embarquer un appareil de relevé sur un vecteur mobile, terrestre ou aérien et éventuellement très compact, les technologies photographiques apparaissent souvent comme une solution idéale. Seule cette technique est aujourd'hui largement associée aux vols par drone par exemple, avec un accès à des zones difficilement atteignables avec un scanner laser (p.ex. les toitures). C'est également la technique à préconiser lorsque l'on doit relever un très grand site pour lequel le relevé laser serait très long, lourd à mettre en place, et au final très coûteux. La compacité et la transportabilité des capteurs photographiques ouvrent en fait de nombreux domaines aux possibilités de reconstruction 3D. La méthode RPCI offre également une qualité texturale très haute et **la restitution de l'apparence visuelle** à partir de photographies haute résolution est beaucoup plus réaliste qu'avec les scanners laser actuels [11].

Tableau 4. Facteurs pouvant nuire à la précision du nuage de points avec la méthode de reconstruction photogrammétrique multiimages

| Facteurs possibles du côté de l'objet et du lieu étudiés | Facteurs possibles du côté de la caméra et des photographies |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none">• Angle de vue très rasant (p.ex. pour capturer le haut d'un bâtiment très élevé)• Surfaces réfléchissantes• Surfaces transparentes• Textures uniformes• Sources de lumière en mouvement et ombres• Objets en mouvements sur la scène étudiée• Rayonnement direct du soleil• ... | <ul style="list-style-type: none">• Faible résolution• Artéfacts : p.ex. poussière sur l'objectif, halos lumineux• Bruit : p.ex. ISO trop élevé, flou de mouvement• Effets indésirables d'un obturateur déroulant (« rolling shutter »)• Profondeur de champ trop faible• « Chevauchement » insuffisant entre les photos• Nombre insuffisant de points de vue• ... |

L'avantage principal de la méthode lasergrammétrique est la possibilité d'obtenir une grande quantité d'information tridimensionnelle, de manière directe et précise, et sans requérir de compétences avancées pour l'acquisition³ [11]. Les facteurs pouvant impacter la restitution 3D sont bien moins nombreux qu'avec les méthodes photogrammétriques. Le coût d'achat d'un scanner laser, bien qu'en baisse, reste cependant un obstacle important pour certains acteurs. Il faut aussi mentionner la qualité de restitution texturale (information de couleur), qui est bien moindre qu'avec les méthodes photogrammétriques. Le **Tableau 5** présente la comparaison entre RCPI et TLS selon un ensemble de critères pertinents pour les études ayant trait à la construction.

Tableau 5. Comparaison des méthodes.

| | Balayage laser | Reconstruction photogrammétrique par corrélation d'images |
|---|---|--|
| Précision (dimensions X,Y,Z de grands éléments architecturaux) | Très élevée (millimétrique) | Faible à élevée ¹ |
| Texture 3D (microtopographie de la surface de l'objet) | Possible avec une précision très élevée | Possible avec une précision faible à élevée ^{1,2} |
| Colorimétrie (RGB) | Possible sur certains scanners | Possible |
| Coût (matériel et logiciel) | Onéreux (entre 35 000 € et 100 000 €) | Attractif (entre 2 000 € et 20 000 €) |
| Possibilité d'adaptation facile sur un support mobile compact (p.ex. drones) | Non | Oui |
| Aptitudes requises pour l'acquisition³ | Faibles | Modérées |
| Aptitudes requises pour le traitement des données | Élevée | Très élevées |
| Temps d'acquisition | Modéré | Court à long en fonction de la précision requise |
| Mise à l'échelle | Directement lors de l'acquisition | Indirectement lors du traitement |
| Délai de traitement des données pour obtenir un nuage de points livrable | Moyen | Long à très long selon le nombre de photos à traiter |
| Ressources informatiques (création / traitement de fichiers) | Élevées | Très élevées ⁴ |

¹Peut être « très élevée » localement, mais la précision de la méthode dépend fortement de la qualité de la série de photos et de la présence de surfaces problématiques sur la façade (p.ex. surfaces réfléchissantes)

²Au prix d'efforts importants, et sans moyen de contrôle évident de la justesse des résultats

³Sans prendre en compte les opérations liées au calage ultérieur des modèles (relevé des points de contrôle)

⁴Le calcul avec une solution de « Cloud computing » peut réduire les ressources requises

2.2.4. Autres méthodes

À côté des méthodes de balayage laser et de reconstruction multiimages aptes à numériser des éléments de grandes dimensions, il existe d'autres technologies HDS qui peuvent appuyer l'étude d'un bâtiment ou de ses composants à des échelles très diverses comme indiqué dans le **Tableau 1**. Cela inclut par exemple les technologies qui peuvent être déployées en atelier afin de vérifier un processus de construction automatisé (contrôle dimensionnel).

On peut d'abord mentionner les techniques de **lumière structurée**. Il s'agit d'une méthode de triangulation active basée sur la **projection d'un motif bidimensionnel** sur la surface de l'objet étudié et d'un capteur optique (**Figure 16a**). Le motif, qui présente un ensemble de lignes, points ou carrés, permet de relever l'information de profondeur simultanément pour chaque point visible par le capteur. Pour des applications similaires, à savoir la numérisation d'objets relativement petits en environnement contrôlé (p.ex. contrôle qualité), on trouve également les méthodes de triangulation par **laser linéaire**. Il s'agit d'une technologie très répandue basée sur la production d'une ligne laser

³ Si l'on met de côté le relevé de points de contrôle à la station totale

(source laser orientée vers une lentille cylindrique) qui parcourt l'objet et dont la déformation résultant de la rencontre avec la surface de l'objet est analysée optiquement (Figure 16b).

Les caméras de temps de vol, ou TOF (Time Of Flight) forment une autre catégorie d'appareils qui possèdent le grand avantage d'offrir une restitution tridimensionnelle en temps réel. On parle parfois aussi de « caméras 3D » bien qu'il fasse éviter de les confondre avec certains produits grand public qui proposent une simple mise en relief de photographies. En effet, on s'intéresse ici aux appareils produisant une véritable cartographie de profondeur basée sur une analyse de temps de vol. Cette solution, bien qu'offrant une précision moindre que les technologies de scanning laser, offre l'avantage d'obtenir rapidement une évaluation sur site (Figure 17), à condition d'éviter les sources lumineuses trop importantes (usage proscrit en extérieur).

Une dernière méthode présentée ici utilise les propriétés focales d'un objectif photographique pour déduire les informations de profondeur. C'est la base de la méthode dite « shape from focus ». Elle permet la reconstruction tridimensionnelle par des déplacements successifs d'un plan focal et la détermination des zones « nettes » à chaque position. Sur des microscopes, elle permet par exemple de reconstruire la microstructure d'un échantillon de matériau (Figure 18).



Figure 16. Scanner 3D par triangulation active pour la numérisation en environnement contrôlé : (a) lumière structurée (Source : HP) ; (b) laser linéaire monté sur un bras mécanique (Source : Nikon)



Figure 17. Scanner 3D par caméra à temps de vol produisant une acquisition en temps réel pour les espaces intérieurs. Source : Faro

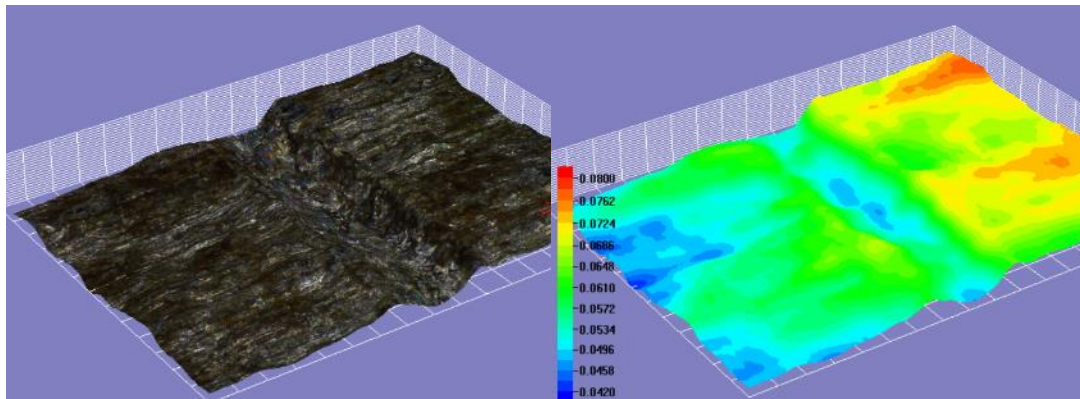


Figure 18. Méthode « shape from focus » utilisée sur un microscope : analyse géométrique d'un échantillon prélevé sur site. Source : CSTC

3. Etapes clés d'un relevé HDS sur chantier

Tout projet de relevé HDS devrait idéalement contenir une série d'étapes [7] qui sont détaillées dans les sections suivantes. Il convient au(x) responsable(s) de l'étude d'analyser chacune de ces étapes de manière attentive afin de maximiser la satisfaction finale de l'utilisateur, à la lumière des objectifs initiaux. Une indication quant au niveau d'effort associé à chaque phase est donnée à la [Figure 19](#).

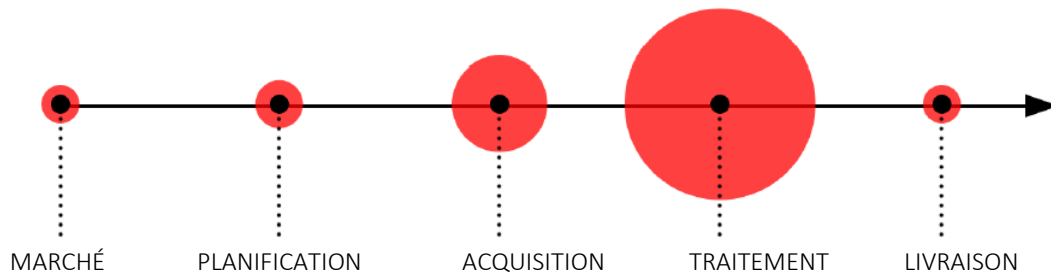


Figure 19. Niveaux d'efforts selon la phase du relevé. Source : [4]

3.1. Définition du cahier des charges et attribution du marché

Il s'agit d'explicitier un besoin ou d'un objectif sous une forme compréhensible pour le prestataire chargé de la numérisation ainsi que pour les personnes en charge de la création des livrables finaux. Cette phase est particulièrement critique et est détaillée à la [section 7](#). Sur base du cahier des charges et d'éventuelles visites préliminaires sur site, le marché sera attribué à l'opérateur répondant le mieux aux attentes du client.

3.2. Planification de l'étude

À la lumière du besoin exprimé par le client, le prestataire désigné pour la numérisation identifie la méthode de relevé la plus adaptée. Les spécifications du produit à livrer doivent être transcrites en

termes techniques. Il doit alors entamer les démarches administratives nécessaires garantissant l'accès aux zones à relever, en respectant d'éventuelles dispositions relatives à la sécurité, à la vie privée, ou à la confidentialité (voir [section 8.3](#)). Il est souvent nécessaire d'accoler des cibles de calages à divers endroits du site, ce qui peut requérir d'avoir accès à des zones intérieures. Une **phase de reconnaissance** sur site est parfois souhaitable afin d'identifier des obstacles potentiels, qui ne sont pas toujours visibles sur des plans ou des images satellitaires disponibles sur le net. La présence du client est souhaitable afin de lever tout doute éventuel quant à l'interprétation du cahier des charges [7]. Il faut alors élaborer un plan de scannage précis avec notamment les emplacements de mesures successifs pour les différents appareils utilisés. Si on planifie une étude de reconstruction dense par photogrammétrie multiimage, il est essentiel de définir à l'avance un plan de capture photographique. En effet, le recouvrement entre les différentes photos ainsi que les différents angles de vue choisis joueront un rôle central dans la qualité de restitution. Afin d'aider les prestataires dans l'encodage d'un plan de capture, un formulaire spécifique a été développé dans le cadre du projet *AIMES-3D* subsidié par Innoviris à Bruxelles [12]. Pour les relevés au moyen d'appareils mobiles, tels que les drones ou les stations IMMS en intérieur, **des routes de passage** précises doivent être établies.

3.3. Phase d'acquisition sur le terrain, en atelier, ou en laboratoire

Une fois la mesure planifiée précisément, vient la phase d'acquisition en elle-même. Il s'agit alors de **suivre les étapes prédéfinies en gérant les éventuels obstacles** identifiés au préalable. Il convient d'éviter les interférences entre les opérateurs si plusieurs personnes effectuent le relevé en même temps. En cas de météo défavorable, le prestataire doit pouvoir trouver une manière de réorganiser les opérations en un temps ultérieur, tout en s'assurant de rester en adéquation avec les autorisations obtenues pour la mission originelle.

3.4. Traitement des données brutes

En aval de la phase d'acquisition des modèles bruts, **un traitement de données à forte intensité de main-d'œuvre est nécessaire pour obtenir des informations utiles** sous forme de dessins en 2D ou de modèles en 3D. Cette phase comprend les opérations suivantes :

3.4.1. Prétraitement

Calage des différents nuages de points (voir section 2.1)

Cette étape est généralement réalisée au sein de **logiciels spécialisés**. Pour les scanners lasers, les fabricants fournissent généralement des suites logicielles complètes qui permettent de réaliser de nombreuses opérations dont le calage sur base de points de contrôle (ou points d'appui). Notons que le référencement spatial d'un scan laser est parfois directement assuré sur site, lorsque ceux-ci peuvent être positionnés sur des points de station connus et dont l'orientation peut être déterminée par des visées sur des points de référence [11].

Pour le calage de nuages issus de la photogrammétrie multiimage, c'est au sein de logiciel de reconstruction que l'on trouvera souvent la possibilité de nettoyer et caler les différents nuages sur base de points d'appui ou sur base de recouvrements entre les différents nuages.

Visualisation et nettoyage des nuages assemblés

Les opérations de base sur un modèle calé peuvent couvrir le **débruitage** (éliminer les points aberrants), le **filtrage** (supprimer les éléments non pertinents pour le client), l'**échantillonnage** (diminuer le nombre total de points par sous-échantillonnage ou rééchantillonnage) ou la **compression** (réduire la taille du fichier avec ou sans perte d'information) des nuages de points bruts [11]. Ces opérations basiques peuvent être réalisées dans de nombreux logiciels, dont certains sont gratuits (p.ex. *Meshlab*, *CloudCompare*).

Segmentation manuelle, semi-automatique ou automatique

Il s'agit de **subdiviser le nuage en sous-ensembles cohérents**, d'après un ou plusieurs critères comme la forme, le matériau, l'orientation, l'âge, etc. Cette phase n'est pas toujours requise et dépendra des livrables finaux requis. Elle peut en tout cas **faciliter le travail de traitement géométrique qui suivra**.

3.4.2. Contrôle qualité

Une procédure de contrôle qualité est un gage de sécurité qui peut être particulièrement critique lorsqu'une très haute justesse est requise. Malheureusement, de telles procédures sont encore difficiles à mettre en place et il n'existe que peu de recommandations en la matière. Il est néanmoins possible de prévoir davantage de points de contrôle que strictement nécessaire pour le calage des différents nuages de points. **Des cibles surnuméraires, relevées à la station totale, peuvent permettre d'obtenir un meilleur contrôle sur la justesse du modèle**. Notons qu'un contrôle qualité sérieux est un processus qui concerne l'entièreté de la mission de mesure. Ainsi, des étapes de vérification préliminaire des données sur site peuvent fournir une première estimation de la qualité du relevé. Pour les acquisitions photogrammétriques, de telles vérifications intermédiaires sont plus difficiles à mettre en œuvre, étant donné le temps de calcul nécessaire à la reconstruction des modèles 3D à partir des photographies.

3.4.3. Transformations du modèle et traitements avancés

À partir d'un modèle prétraité, de nombreux traitements sont possibles afin de satisfaire aux besoins du client. On trouve entre autres :

- Les transformations 3D_a vers 3D_b (p.ex. nuage de points transformé en modèle maillé et texturé – voir 2.1)
- Les modélisations complémentaires (p.ex. modélisation BIM sur base d'un nuage sémantisé)
- Les combinaisons entre modèles
- Les transformations de modèles 3D vers des représentations 2D

Le lecteur trouvera plus de détails sur ces traitements dans la **section 5.2**.

Le rapport entre la durée du relevé sur site et le traitement peut varier énormément selon la méthode utilisée et les exigences de l'analyse. Un problème courant concerne la manipulation des données, qui peuvent atteindre plusieurs dizaines de gigaoctets en cas d'acquisition à haute résolution ou en cas de combinaison de plusieurs nuages de points.

3.5. Mise en forme finale et transmission des livrables

Après la phase de traitement, le prestataire doit transmettre les données au client, sous la forme convenue dans le cahier des charges. **Dans certains cas, le client peut requérir des services complémentaires de la part du prestataire**, comme l'actualisation des données dans le temps, ou la mise en place d'une plateforme évolutive et/ou consultable à distance par plusieurs acteurs. Bien entendu, de telles requêtes doivent être spécifiées dès le début du contrat.

4. Situation actuelle dans le secteur de la construction en Belgique

Bien que les techniques de relevé haute définition soient aujourd'hui facilement exploitables et de manière économiquement justifiée, **leur utilisation est encore limitée dans le secteur du bâtiment**. Pour les projets de rénovation, les responsables de projets et entreprises générales travaillent **encore souvent avec des plans et élévations en deux dimensions**. Pourtant, l'évolution de la puissance informatique ainsi que la diversification des logiciels de représentation tridimensionnelle permettent de plus en plus de travailler directement et de manière intuitive sur des données 3D. Cette approche permet d'ailleurs de faciliter l'exploitation de nombreuses données pour la conception et la mise en œuvre, notamment par l'intermédiaire du BIM. Les métrés en sont un exemple évident avec les possibilités récentes de génération automatique à partir de modèles 3D définis sous forme d'objets. Bien sûr, les approches qui intégreraient le relevé haute définition dans un processus BIM ne sont certainement pas adaptées pour tout type de projet à l'heure actuelle. Cependant, l'utilisation des ressources HDS de manière judicieuse, avec des objectifs clairs, peut se révéler particulièrement intéressante (voir [section 5](#)). Il est néanmoins essentiel que les différents acteurs qui seront amenés à collaborer autour du relevé HDS disposent d'une maîtrise satisfaisante des outils disponibles. En particulier, l'accent devra être mis sur la définition correcte des cahiers des charges pour les marchés de service et sur le développement de procédures de contrôle qualité liées aux phases de traitement, de réception et d'utilisation des données 3D.

Au niveau industriel, l'utilisation des technologies de numérisation pourrait trouver plus rapidement ses marques chez les fabricants de solutions de haute technicité. Ainsi, certains acteurs ont déjà compris l'intérêt d'une numérisation rapide et précise, que ce soit pour le contrôle qualité des pièces usinées ou pour la production de solutions « sur mesure ». La modularisation des éléments de construction gagne par exemple en popularité et le besoin d'optimiser les phases de conception et d'exécution trouve une réponse adéquate dans le processus de relevé HDS.

Il faut mentionner que **le relevé du patrimoine forme un autre domaine précurseur dans l'utilisation des techniques HDS**. De par la volonté et nécessité de compréhension de l'existant inhérente aux disciplines qui ont trait aux bâtiments et sites historiques, de nombreux chercheurs et professionnels sont déjà familiers avec ces techniques de numérisation modernes. Car le travail de relevé traditionnel pour le patrimoine est long et fastidieux et la qualité des données obtenues par un relevé HDS ainsi que la rapidité d'acquisition viennent secouer fortement les pratiques en place. **L'apport du relevé HDS en amont du développement de modèles de visualisation et d'immersion** est également crucial pour le patrimoine. Dans ce secteur où la sauvegarde de l'existant passe souvent par la sensibilisation, pouvoir mettre en place des modèles réalistes ouvre de nombreuses perspectives (visites virtuelles, inventaire interactif, etc.). Le projet *CyARK* [13] est un bon exemple d'une telle démarche. L'équipe en charge vise à établir une « bibliothèque digitale » de sites du patrimoine

mondial à l'aide des technologies de numérisation avancées (Figure 20) et en mettant en avant leur force didactique.

Globalement, nous nous trouvons à un moment clé de la transition où les possibilités offertes par technologies nouvelles explosent et où tout semble possible. Néanmoins, il peut paraître dur de juger de ce qui est raisonnablement réalisable, face à autant de technologies qui sont extrêmement séduisantes sur le papier, mais dont l'implémentation peut rencontrer des obstacles sérieux. Les sections qui suivent présentent les différentes opportunités offertes par la numérisation 3D.



Figure 20. Données issues d'un scan laser de la fontaine de Pirène à Corinthe. Source : CyArk

5. Analyse des opportunités

5.1. Objectifs d'une étude HDS

La numérisation haute définition du bâtiment offre **des opportunités gigantesques pour le secteur de la construction**. Les architectes, entrepreneurs et bureaux d'étude sont concernés en première ligne mais aussi les gestionnaires à différents niveaux, depuis ceux en charge de la gestion d'un bâtiment unique jusqu'à ceux traitant des politiques d'aménagement du territoire. Le secteur du patrimoine n'est bien sûr pas en reste, avec les multiples applications en termes de diagnostic ou simplement d'inventaire comme indiqué ci-dessus.

Au niveau de l'information délivrée, le grand avantage de l'HDS se trouve d'abord dans le **niveau de détail géométrique inédit qui y est associé**. Interconnectée à cela, une **information texturale précieuse** peut être générée, qui serait impossible à obtenir avec le relevé à la station totale. Bien que de simples photos permettent déjà un relevé de texture au niveau des couleurs, on parle bien ici d'un relevé textural complet, où des niveaux RGB sont associés à une microgéométrie – une sorte de « toucher virtuel » du bâtiment.

Au niveau du champ d'application, une évolution sensible des méthodes de relevés modernes est de **rendre l'accès possible à toute une série de lieux qu'il était difficile de mesurer auparavant**; la limite étant la taille de l'appareil effectuant la mesure, et la possibilité de manipulation ou d'enclenchement à distance. Des exemples d'avantages clés d'un relevé HDS en fonction du stade de vie d'un bâtiment ou d'un quartier sont repris dans le **Tableau 6**.

Tableau 6. Exemples d'avantages clés d'un relevé HDS et applications possibles selon le stade de vie du bâtiment ou quartier concerné.

| Capturer l'existant avec très haut niveau de détail géométrique, et/ou générer une information texturale précise, pour des sites éventuellement inaccessibles ou dangereux avec les méthodes traditionnelles | | |
|--|--|---|
| (Avant une transformation) | (Pendant une transformation) | (Au cours de l'utilisation) |
| <ul style="list-style-type: none"> • pour compléter la documentation disponible sur l'état existant (p.ex. plans d'étages, élévations de façades, états de surface) • pour développer une base de mesure géométrique pour de la production industrielle • ... | <ul style="list-style-type: none"> • pour contrôler le processus de transformation du bâtiment et anticiper des problèmes • pour accompagner les équipes sur chantier (p.ex. installation ou désinstallation de systèmes) • ... | <ul style="list-style-type: none"> • pour compléter la documentation disponible sur l'état existant (p.ex. systèmes) • pour faciliter la mise en place d'outils de « facility management » efficaces • pour effectuer le suivi d'un élément au cours du temps • ... |

Plus précisément, il est possible de grouper les utilisations des scans haute définition selon de grandes thématiques [7].

5.1.1. Numériser pour placer le bâtiment dans l'espace et/ou le temps

Le modèle HDS sert ici à contextualiser l'existence du bâtiment ou d'un de ses éléments. Il peut s'agir d'une **contextualisation temporelle (situation à un moment donné) et/ou spatiale (situation dans un ensemble plus grand)** qui peut précéder d'autres analyses plus poussées. On peut par exemple vouloir comparer la géométrie actuelle d'un bâtiment à de vieux documents d'archives que l'on a à disposition. L'utilisation d'un modèle numérisé peut aussi servir comme support pour présenter des aménagements futurs, auquel cas on touche également à une volonté de communication (voir **5.1.4**). Il peut s'agir enfin de développer un modèle évolutif, où des scans successifs sont planifiés dans le temps. Au point de vue spatial, il peut s'agir par exemple d'obtenir une représentation d'un bâtiment dans son environnement urbain. On peut également effectuer des relevés topologiques pour préparer l'installation de nouveaux projets immobiliers (**Figure 21**).

5.1.2. Numériser pour comprendre un bâtiment ou une partie de celui-ci

Un modèle à haute résolution contient énormément d'information qui est capturée en une seule fois et est **consultable à souhait par la suite**. L'exhaustivité des données géométrique et la possibilité de combiner des scans intérieurs et extérieurs peuvent permettre de mieux cerner un édifice ou un site existant : agencement des structures, des volumes, etc. La mesure HDS permet de prendre de la distance et donc aussi d'accéder à des informations qui ne sont peut-être pas immédiatement visibles pour l'observateur sur place. Le relevé par drone est par exemple de plus en plus utilisé pour le relevé de sites archéologiques (**Figure 22**).



Figure 21. Modéliser une maquette topographique BIM à partir d'un relevé au scanner laser.
Source : Bury Associates Ltd



Figure 22. Utilisation du drone pour le relevé RCPI d'un site historique. Source : Archéotech SA

5.1.3. Numériser pour mesurer, diagnostiquer et évaluer

C'est l'utilisation la plus fréquente des relevés haute définition. D'abord, la précision et l'exhaustivité des données géométriques permettent d'effectuer un grand nombre de **mesures dimensionnelles**, sans nécessité de multiplier les allers-retours sur site. L'expert pourrait également effectuer **différents diagnostics** à partir du relevé HDS : évaluation des déformations, mise en évidence de pathologies, etc. (Figure 23). L'évaluation rapide de l'avancement d'un chantier ou des dégâts matériels sur un site sinistré (Figure 24) sont d'autres exemples types.

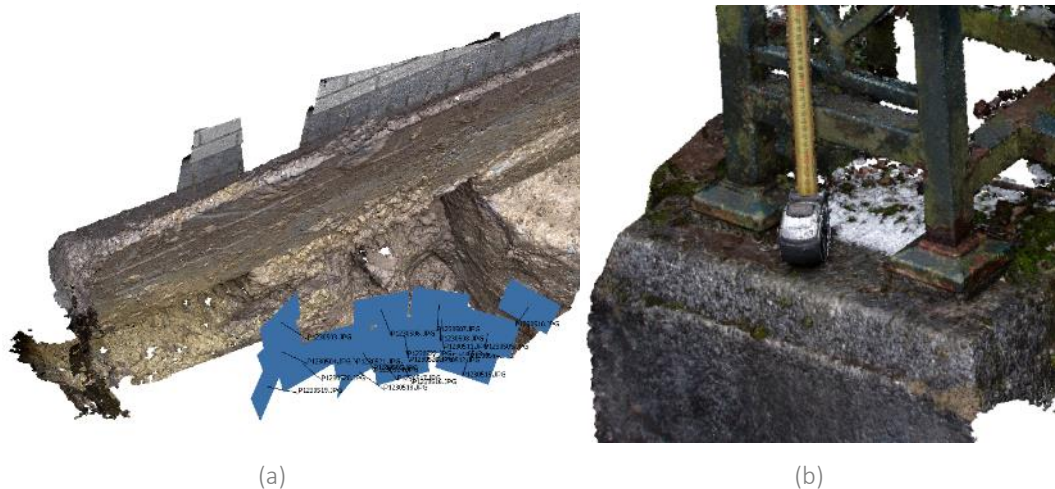


Figure 23. Numérisation 3D d'éléments architecturaux au moyen d'une étude photogrammétrique : (a) fondation après une excavation ; (b) ancrage d'un portail métallique. Source : CSTC

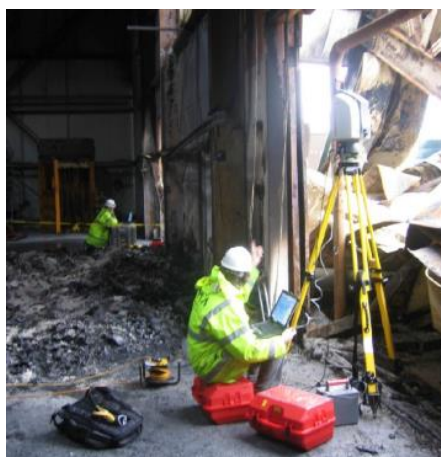


Figure 24. Étude pour l'évaluation rapide de dégâts. Source : Plowman Craven

5.1.4. Numériser pour communiquer

Un modèle HDS numérique est une base solide pour la communication, de par la possibilité pour chaque individu de **percevoir des informations sous une forme tridimensionnelle naturelle et observable sous multiples points de vue dans l'espace**. On trouve ici de nombreuses applications des relevés HDS. Là où par le passé les limites technologiques ont imposé la prédominance des représentations 2D du réel, il est aujourd'hui possible de transformer les méthodes de communication entre acteurs en les rendant plus intuitives, réalistes et complètes grâce aux représentations tridimensionnelles (Figure 25).

On peut par exemple se servir du modèle pour produire une **maquette du bâtiment**, monument ou élément architectural étudié. Il s'agit d'un des fondements de la révolution BIM du secteur de la construction. Bien sûr, la maquette BIM est un outil intégré qui dépasse largement les possibilités simples de visualisation (voir section 6). Il reste que le développement d'une maquette virtuelle avec un rendu photoréaliste est possible, où un client pourrait par exemple valider certaines décisions de conception.

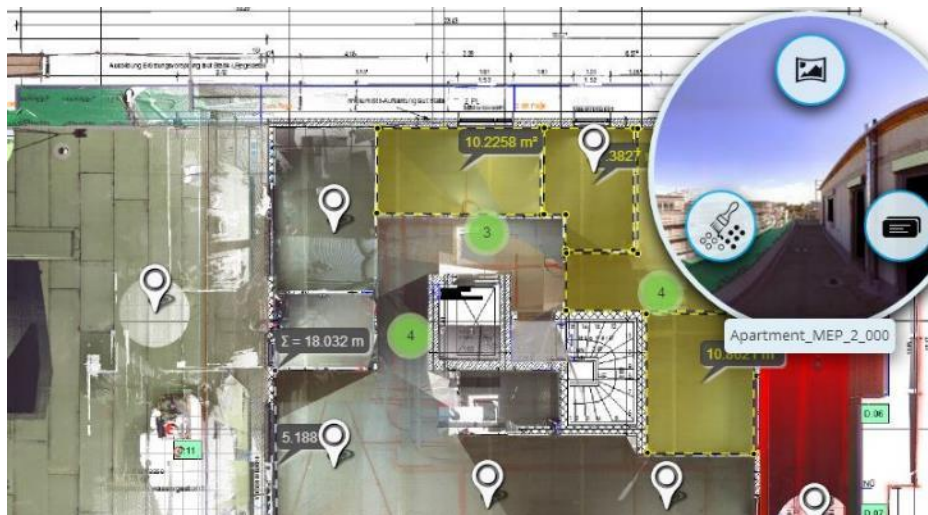


Figure 25. Annotation d'un nuage de points dans une plateforme orientée vers la communication entre acteurs. Source : Faro

5.1.5. Numériser pour concevoir et fabriquer

Obtenir une représentation tridimensionnelle précise d'un bâtiment en l'état est très précieux pour les équipes de conception impliquées dans une tâche de rénovation. Une application fréquente est la conception de systèmes MEP (Mechanic, Electric and Plumbings) où une préfabrication accrue est rendue possible par une meilleure appréhension des espaces existants (Figure 26).

Les modèles 3D peuvent aussi servir de base à toute une série de processus de fabrication, qu'il s'agisse d'une production industrielle ou d'une production plus spécifique, comme par exemple pour la restauration d'éléments de bâtiments historiques. Les techniques **d'impression 3D** peuvent bien sûr être sollicitées dans ce contexte, tout comme de nombreuses techniques de **fabrication à commande numérique**. À petite échelle, on peut vouloir par exemple reproduire un élément architectural endommagé.

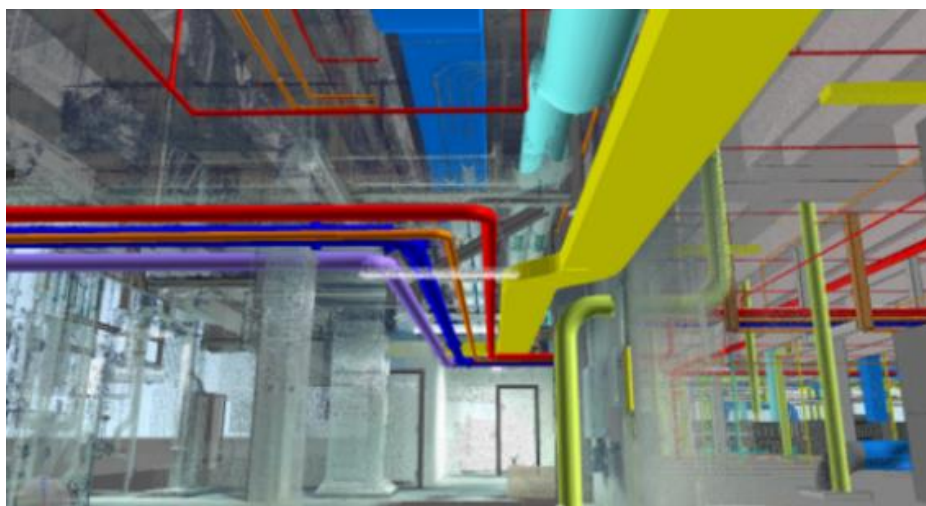


Figure 26. Préfabrication de systèmes HVAC sur base d'un nuage de points. Source : Gilbane Building Company

5.1.6. Numériser pour administrer

Obtenir une représentation fiable d'un bâtiment ou quartier « tel qu'il est » est un résultat extrêmement précieux pour des gestionnaires (Figure 27). Un modèle HDS permet de **prendre les décisions en se basant sur une représentation complète des zones d'intérêts**, et éventuellement de mettre en évidence certains aspects non visibles sur des représentations bidimensionnelles ou par de simples visites sur site. Les scans HDS transformés en modèles BIM permettent de visualiser des décisions stratégiques quant à des transformations ou des réaménagements de l'existant. De tels modèles BIM peuvent d'ailleurs également servir pour l'exploitation continue d'un bâtiment. De manière pragmatique des nuages de points ou modèles 3D qui en sont dérivés pourraient aussi à l'avenir soutenir diverses procédures administratives, comme les dépôts de permis.

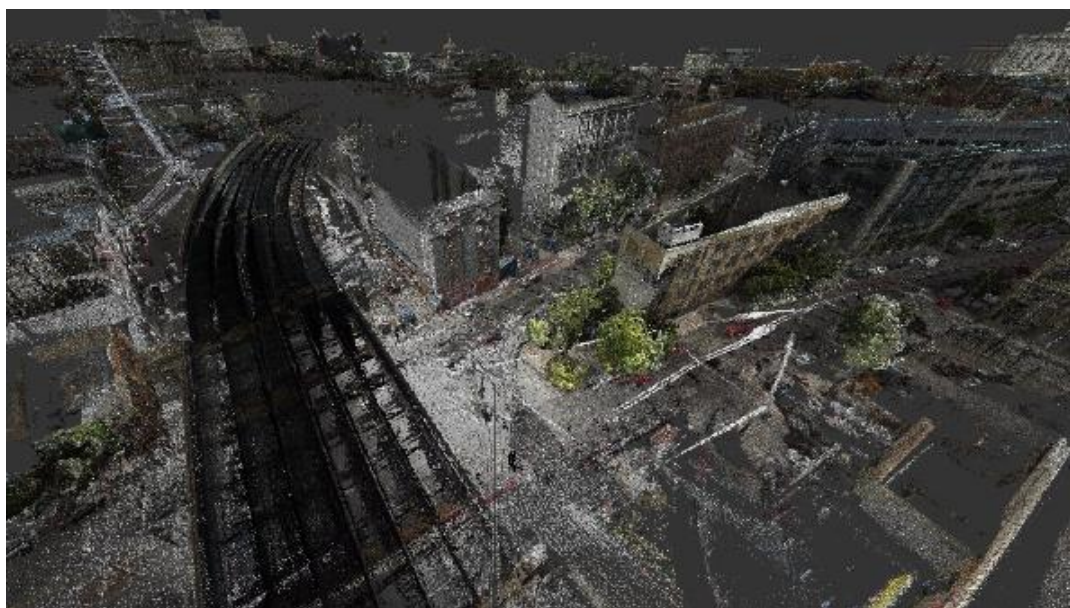


Figure 27. Étude à grande échelle pour la planification urbaine. Source : Autodesk

5.1.7. Numériser pour contrôler

Obtenir une représentation précise de l'existant permet également de contrôler certains aspects géométriques. Il peut s'agir par exemple d'un contrôle sur chantier en cours de rénovation. De cette manière d'éventuels défauts d'exécution peuvent être facilement identifiés et leurs conséquences peuvent être anticipées. Pour des projets importants, où de telles requêtes viendront à être répétées, on peut également prévoir un processus systématique et régulier de contrôle, via une maquette BIM par exemple. Toujours dans l'idée de contrôle, les scans HDS offrent également la possibilité de vérifier si la documentation disponible sur l'existant est fiable (Figure 28). Pour les industriels, les possibilités de contrôle qualité sur les lignes d'assemblage constituent un dernier exemple évident.

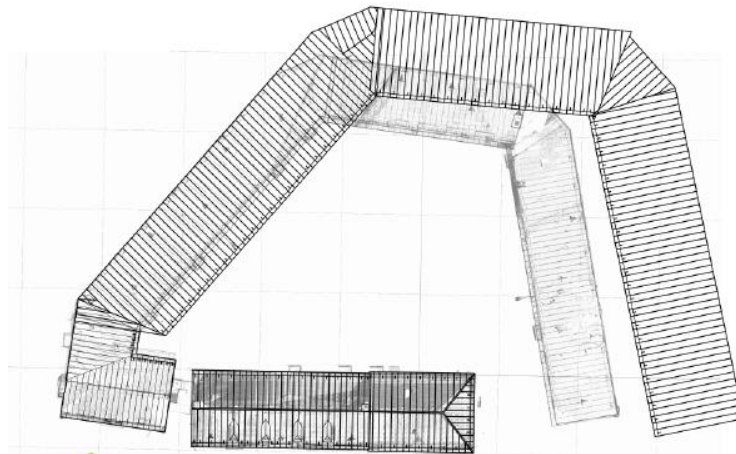


Figure 28. Comparaison entre un tracé de toiture sur base du relevé HDS et la documentation disponible. Source : iScan

5.2. Modèles finaux et chaîne de travail numérique

On vient de le voir, il existe de nombreuses raisons pour requérir une étude géométrique à haute définition. On peut se poser la question des **types de traitements possibles à partir d'un relevé HDS brut** (un nuage de points directement relevé ou dérivé de photographies) afin de répondre à ces objectifs.

On distinguera deux catégories de traitements. Les traitements simples, qui rentrent dans les compétences générales des géomètres, et les traitements avancés, qui sont des expressions de besoins spécifiques pour lesquels des experts à la frontière de plusieurs domaines seront souvent requis. **Un schéma synthétique est fourni en annexe et illustre de manière visuelle les principaux cheminements possibles de l'information 3D à partir d'un modèle brut.**

5.2.1. Utilisations simples pour la visualisation et le dessin architectural

Dans le processus d'étude ou de transformation des bâtiments existants, le besoin le plus fréquent est la mise à disposition de modèles permettant la prise de dimensions. Beaucoup d'acteurs n'auront d'ailleurs pas spécifiquement besoin de la résolution offerte par les mesures HDS en tout endroit du bâtiment. Ils se satisferont de fichiers CAD 2D créés à partir des nuages de points, comme des élévations de façade, des plans d'étages ou encore des coupes techniques (Figure 29). Pour le dessinateur, il peut aussi être utile de travailler à partir d'orthophotographie ou d'orthovues du nuage de points. Une **orthophotographie** ou **ortho-image** (Figure 30) est une image d'un objet qui est redressée afin d'être dépourvue de toute déformation due à la perspective ou à l'optique utilisée (processus d'« orthorectification »). Il s'agit d'une projection orthogonale de l'objet photographié sur un plan [11]. Il est souvent possible de générer de tels fichiers dans les logiciels de RPCI.



Figure 29. Productions de dessins 2D sur base d'un relevé HDS. Source : ABT Group

Quant aux **orthovues ou vues orthographiques**, il s'agit d'une représentation orthogonale d'un modèle 3D. En d'autres termes, il s'agit d'un point de vue spécifique sur le modèle sans effet de perspective. Contrairement aux orthophotographies, qui sont obtenues à partir de l'assemblage de photos et ont donc potentiellement une très haute résolution spatiale, la qualité des orthovues dépend du modèle sous-jacent. Quand la résolution offerte par un nuage de points est utile pour le client, comme pour les relevés de maçonneries (**Figure 31**), les orthophotographies peuvent servir comme un support de dessin intermédiaire efficace.



Figure 30. Orthophotographie d'un mur obtenu à partir d'un maillage texturé issu de la méthode photogrammétrique. Source : CSTC

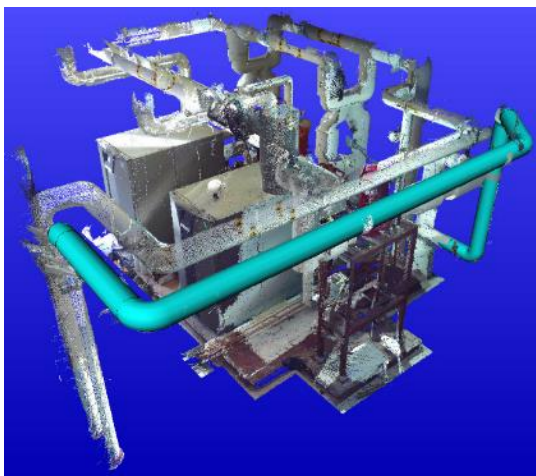
Cette transformation de **l'information 3D haute résolution vers des dessins en traits** peut généralement se réaliser au sein des logiciels de mise en plan numérique tels qu'*Autocad*, à condition que ces derniers permettent l'importation d'un nuage de points. On peut d'ailleurs parler de « **scan-to-CAD** ». L'intérêt principal du HDS réside alors dans la mise à disposition d'un modèle complet acquis une fois pour toutes, pouvant servir de guide pour une modélisation « classique » en 2D (voir **Figure 31**). Certaines pratiques courantes dans la représentation bidimensionnelle de l'existant pourraient cependant venir à disparaître à l'avenir, lorsque les méthodes de travail et l'optimisation des solutions logicielles se seront adaptées aux apports des technologies de scannage 3D modernes. On trouvera déjà **beaucoup d'applications où la modélisation CAD en trois dimensions apporte un plus**. Le dessinateur se servira alors du nuage de points comme aide soit pour le dessin 3D en traits soit pour la modélisation en primitives géométriques 3D.



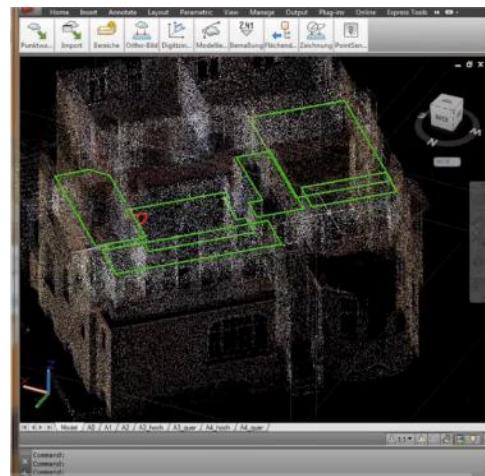
Figure 31. Représentation de la maçonnerie sous forme d'élévation. Source : iScan

Que ce soit pour le dessin CAD 2D ou 3D, beaucoup de fabricants de scanners laser proposent des suites logicielles ou des plug-ins permettant de faciliter le processus de modélisation « scan-to-CAD » (Figure 32). Les fichiers CAD 3D pourront être intégrés dans un modèle BIM dans une phase ultérieure.

Certains acteurs n'auront besoin que du nuage de points brut, ou faiblement transformé (nuage nettoyé, coloré, segmenté par groupe de points, etc.). Pour des clients qui ne disposeraient pas des ressources informatiques nécessaires à la manipulation de tels fichiers, qui peuvent être très lourds, il existe en outre la possibilité d'héberger le nuage de points sur des serveurs. Les fabricants de scanners laser proposent généralement des solutions d'hébergement dans le Cloud, avec des logiciels simplifiés qui permettent aux utilisateurs non initiés d'accéder facilement à l'information 3D à distance et d'effectuer des mesures ou annotations basiques (p.ex. *Leica TruView* ou *Faro Webshare* - Figure 33). Lorsqu'il s'agit de visualiser au mieux un modèle 3D, il est parfois souhaitable de transformer un nuage de points en un maillage polygonal texturé. En effet, traditionnellement les logiciels de modélisation 3D destinés aux applications multimédias sont basés sur de tels modèles, qui permettent la génération de rendus photo réalistes. La transformation peut se réaliser de manière automatique, au moyen d'algorithmes, ou manuelle, en se servant du nuage de points comme support pour la modélisation polygonale. Le modélisateur devra ici être attentif à la question des textures qui serviront à « habiller le modèle ». La méthode photogrammétrique offre ici un avantage indéniable, utilisée seule ou combinée au balayage laser.



(a)



(b)

Figure 32. (a) Du scan HDS vers du dessin CAD 3D dans le logiciel *Trimble RealWorks*. (b) Production de plans à partir du nuage de points dans le logiciel *Faro PointSense*.



Figure 33. Logiciel *Leica TruView* conçu pour les professionnels désireux de visualiser et de mesurer des nuages de points sans connaissances approfondies en balayage laser, CAD ou 3D. Source : Leica

5.2.2. Utilisations avancées

Ces applications vont de pair avec des traitements plus complexes des nuages de points. Il existe en effet de nombreuses « chaînes de travail » possibles afin de produire le livrable adéquat pour le client. L'objectif de cette section est de donner un aperçu de certains de ces flux de travail. Le développement de modèles BIM constitue une utilisation spécifique qui est détaillée dans la [section 6](#).

Confrontation de modèles HDS à un modèle de référence

Beaucoup de logiciels de modélisation ou de traitement de fichiers 3D permettent d'importer simultanément différents types de modèles (nuages de points, maillages, objets solides, ...). Parmi ceux-ci, certains disposent en outre d'outils pour l'analyse dimensionnelle. Il sera alors possible de connaître la déviation d'un nuage de points par rapport à un modèle de référence. Ces derniers peuvent inclure des primitives géométriques simples comme des plans (p.ex. pour l'analyse de planéité d'une façade), ou encore un autre nuage de points (p.ex. pour l'analyse des mouvements d'une structure au cours du temps). La [Figure 34](#) montre un exemple de comparatif entre deux nuages de points, issus respectivement d'un relevé TLS et d'un relevé photogrammétrique. Des logiciels tels que la solution gratuite *CloudCompare* permet de colorer chaque point d'un nuage en fonction de sa distance au point le plus proche d'un autre nuage.

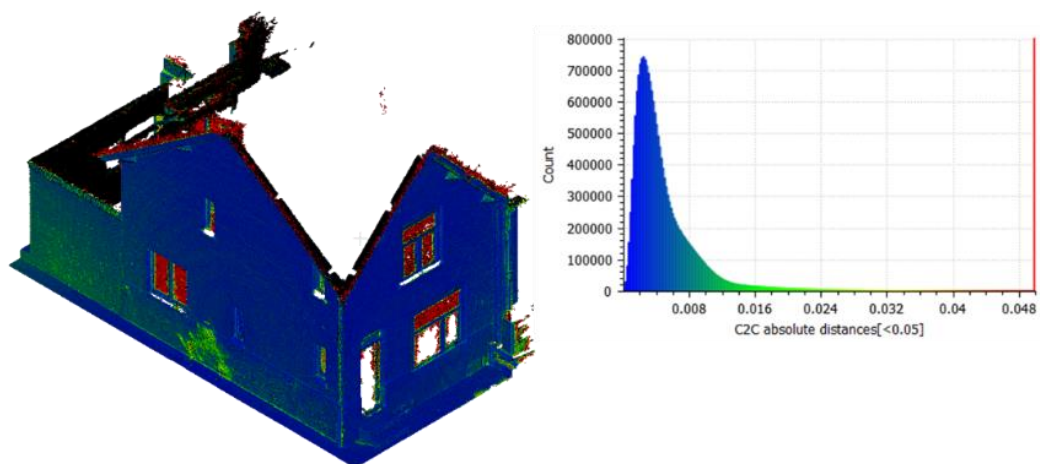


Figure 34. Distance point-à-point entre un nuage de points obtenu par reconstruction photogrammétrique et un nuage de référence obtenu par lasergrammétrie (distance absolue en mètres). Source : CSTC

HDS-vers-CAM

Les outils numériques bénéficient d’une incorporation anticipée au sein des entreprises qui utilisent des méthodes de construction modernes à haute automatisation. Des machines de découpe et d’assemblage peuvent être combinées sur des lignes de production totalement ou semi-automatisées qui décuplent la capacité de production ainsi que le niveau de technicité des éléments de construction (Figure 35). Ces machines **requièrent des modèles de production qui contiennent une succession d’ordre de déplacement de leurs outils de coupe ou fraisage**. À titre d’exemple, l’industrie des éléments d’enveloppe préfabriqués bénéficie de ces évolutions rapides sous l’impulsion d’un marché en pleine explosion et qui n’est plus limitée à la construction neuve. Un guide complet pour la mise en œuvre de telles solutions pour la rénovation a d’ailleurs été produit lors de la recherche *AIMES* à Bruxelles [14]. C’est le **paradigme de la modularisation de la construction**, avec une l’accélération de la phase chantier associé à un contrôle-qualité accru. Suivant ce même paradigme, le développement de l’impression 3D ouvre des voies inédites pour la construction, touchant un panel de matériaux de plus en plus large. Bien sûr, de telles avancées au niveau de la machine industrielle et de la gestion de chantier vont de pair avec une évolution profonde des outils informatiques.

Il est difficile d’ajuster des éléments préfabriqués sur chantier. Par conséquent, il est précieux de disposer d’informations géométriques très précises des surfaces qui viendront en contact avec ces éléments (Figure 36). L’analyse des données géométriques peut fournir **des informations contextuelles utiles pour la conception des systèmes ou parois préfabriqués**. Dans la plupart des cas, la surface qui doit venir en contact avec ces systèmes ou parois préfabriqués présentera des irrégularités qu’il est possible de décrire grâce au HDS. Une étude approfondie de ces irrégularités permet de **limiter les ajustements sur chantier** et de prévenir d’éventuels problèmes futurs : programme, coût et performance sont garantis.

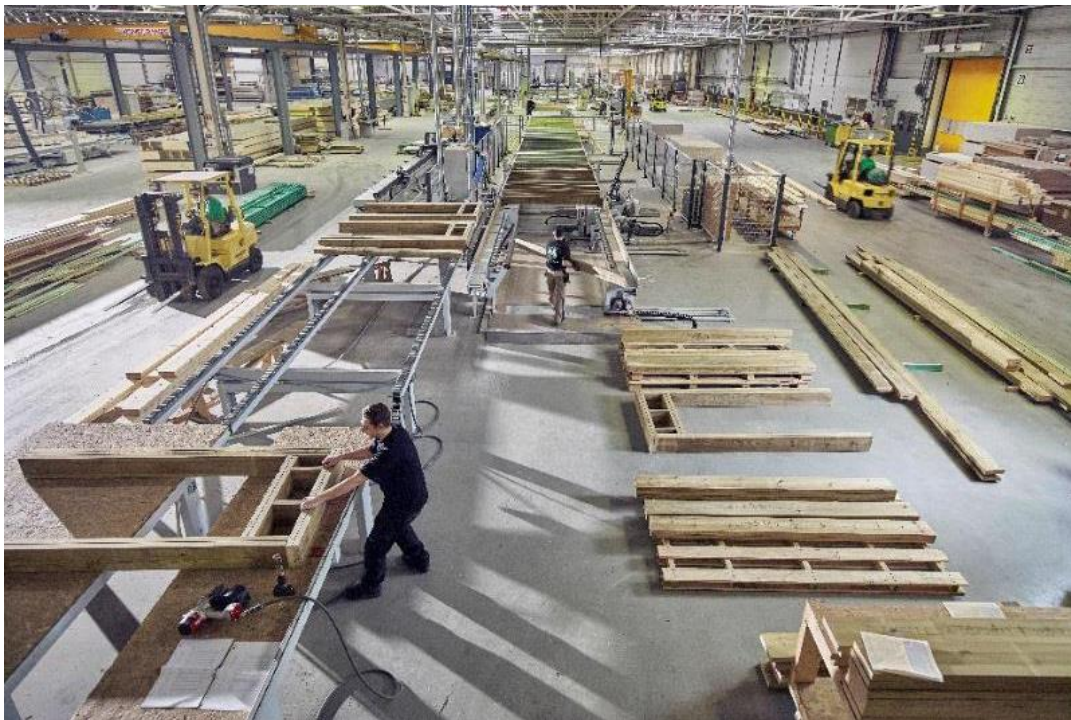


Figure 35. Ligne de production semi-automatique de panneaux préfabriqués en ossature bois.
Source : Machiels Building Solutions

Une utilisation avancée des scans permettra en outre au fabricant d'intégrer le contexte géométrique en amont, directement dans la fabrication de son produit. Ainsi, des solutions « sur mesure » peuvent être conçues, où le nuage de points qui décrit l'élément architectural existant est utilisé pour (re)définir un modèle CAM (Computer Aided Manufacturing) de la pièce qui viendra s'y adjoindre. **Les modèles CAM désignent des modèles 3D ou 2D auxquels sont adjointes des commandes machines.** Il s'agit ici d'une utilisation indirecte des scans, qui sont utilisés comme un « négatif » de la pièce à usiner. Il est également possible d'utiliser les scans haute définition de manière plus immédiate pour certains procédés de construction. C'est le cas de l'impression 3D qui peut servir entre autres à la reproduction d'éléments architecturaux endommagés (Figure 37).

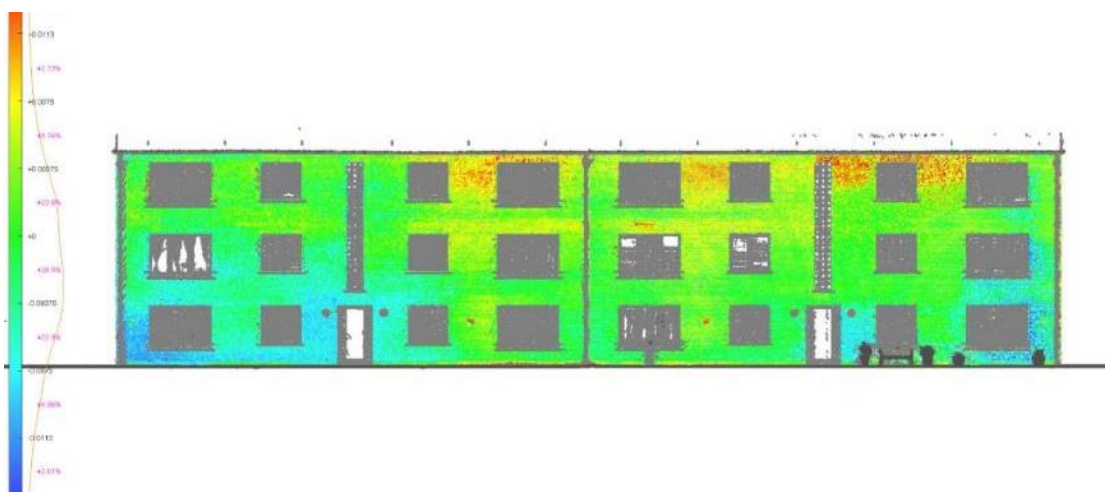


Figure 36. Livrable utile pour le fabricant de façades préfabriquées pour la rénovation : une représentation des irrégularités de la façade existante. Source : CSTC



Figure 37. Réplique d'un ornement architectural : production d'un fichier CAM pour l'impression 3D à partir d'un maillage. Source : CSTC

Les HDS pour des simulations numériques

Les scans à haute définition peuvent servir à mettre en place de nombreux types de simulations numériques. De manière simple, il est possible par exemple de créer un modèle BES (Building Energy Simulation, **Figure 38**) qui permet la simulation dynamique d'échanges thermiques entre le bâtiment et son environnement. Il s'agira alors typiquement d'une modélisation géométrique simple réalisée sur base du nuage de points. Une modélisation plus précise, sous la forme d'un maillage, ouvre la voie aux simulations à éléments finis qui peuvent servir à transcrire toute une série de phénomènes physiques (analyse structurelle, analyse HAM (Heat, Air and Moisture), analyse CFD (Computational Fluid Dynamics), etc.).

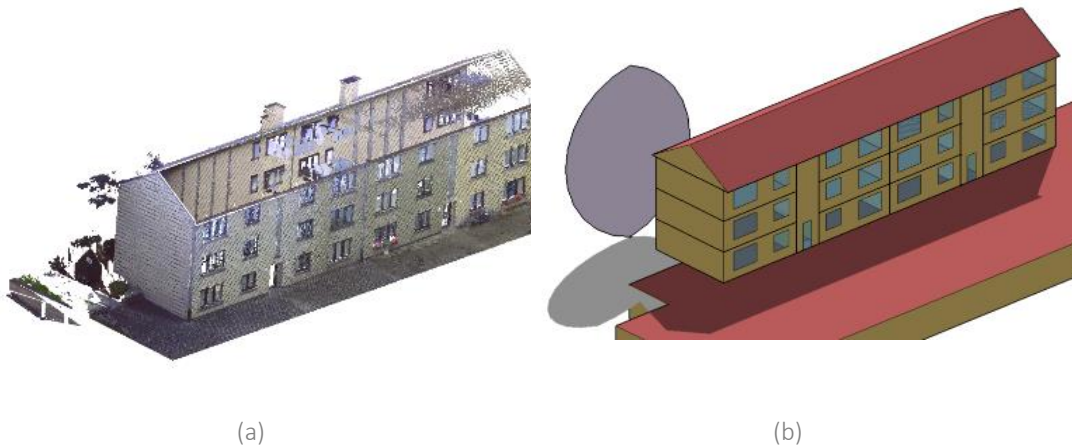


Figure 38. Utilisation du fichier HDS pour générer facilement un modèle BES (Building Energy Simulation). Source : CSTC

HDS-vers-VR/AR

Il faut aussi mentionner les **technologies de réalité virtuelle (VR – Virtual Reality)** qui sont aujourd'hui accessibles au plus grand nombre. Les dispositifs d'immersion se sont démocratisés, notamment au travers de l'émergence de casques de vision virtuelle à prix contenu. De tels outils permettent des modalités nouvelles pour **la communication sur les choix de conception ou de gestion, basées sur l'immersion de l'utilisateur dans un environnement 3D réaliste**. Mais les potentialités ne se limitent pas à la visualisation. Les technologies VR semblent être un terrain fertile pour l'imagination des développeurs, et les possibilités d'interactions directes avec l'environnement 3D ne sont certainement pas oubliées. À côté de la réalité virtuelle, **les technologies de réalité augmentée (AR –**

Augmented Reality) ont également un avenir certain dans le secteur de la construction. Il s'agit là de superposer une information virtuelle à l'environnement réel, via des lunettes spéciales ou une tablette/smartphone munie d'un appareil photo.

La transposition d'un nuage de points dans un environnement de réalité virtuelle ou augmentée passera généralement par le développement de modèles polygonaux texturés. Comme mentionné plus haut, il s'agit du type des modèles les plus courants pour le développement d'applications multimédia.

6. Intégration des scans dans une démarche BIM

Une série d'utilisations avancées des relevés à haute définition vient d'être présentée. Bien que l'intérêt des scans haute définition dans de tels développements spécifiques soit réel, leur intégration dans un processus BIM offre de grandes perspectives, avec un impact profond sur les mécanismes d'interaction entre acteurs. **Les scans à haute définition peuvent servir de base au développement de modèles BIM de l'existant** en ayant comme avantage de fournir une information extrêmement complète et précise. Mais ces scans peuvent aussi intervenir à différents endroits de la chaîne de travail BIM, y compris en construction neuve.

6.1. Qu'est-ce que le BIM ?⁴

Le terme BIM peut signifier « *Building Information Model* », « *Building Information Modelling* » ou « *Building Information Management* ». Ces trois désignations représentent en fait trois réalités qui devraient idéalement coexister lorsque l'on parle de BIM. Il y a d'abord le fait de développer **une maquette numérique 3D évoluée**, où des métadonnées sont adjointes à l'information géométrique constituée d'objets paramétriques (**Figure 39**). Les différents objets qui composent le bâtiment peuvent ainsi se voir attribuer des paramètres relatifs à leur composition, leur performance, leur coût ou encore leur durabilité. Il est également possible d'encoder des relations entre objets ou entre données, avec une potentielle répercussion en chaîne de chaque modification.

Tout au long du cycle de vie d'un bâtiment, ce paradigme de « **modèle intelligent holistique** » offre des outils particulièrement performants pour les acteurs impliqués. Ceux-ci ont accès à une information riche et structurée leur permettant de prendre des décisions posées en prenant en compte toute une série d'aspects simultanément. Cela implique une meilleure compréhension des impacts de chaque décision. C'est tout le processus d'interaction qui s'en trouve modifié, avec un accent fort sur la collaboration par un processus de transfert de l'information optimisé. Les efforts plus importants qui sont investis en amont de l'exécution pour mettre en place le modèle peuvent garantir une **réduction significative des ajustements sur site**. En bref, on effectue l'entièreté du processus de construction de manière virtuelle avant la réalisation dans le monde réel.

⁴ Voir CSTC-Contact 2017-1 :

<http://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=bbri-contact&pag=Contact53>

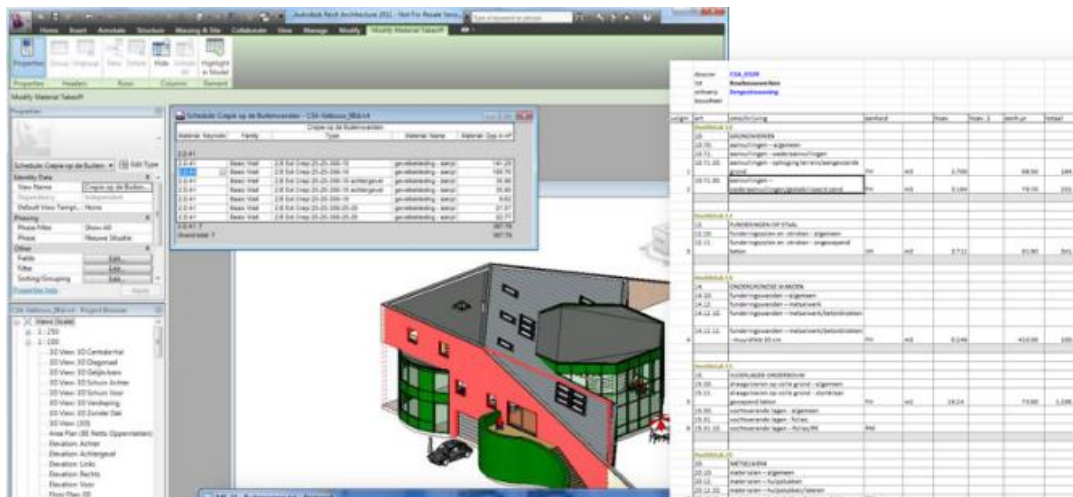


Figure 39. À la base du BIM : joindre des métadonnées à l'information géométrique

Cette « virtualisation » du processus de construction va de pair avec de **nouvelles dimensions de travail, en fonction du type de données que l'on lie à la géométrie; on parle de 4D, 5D, 6D**. Le BIM 4D désigne les processus de modélisation auquel on adjoint la notion de temps. C'est une approche qui permet par exemple de mettre en place un phasage virtuel de chantier. La 5D ajoute la donnée « coût » aux dimensions précédemment définies. Travailler avec un modèle BIM 5D permet donc par exemple d'estimer les coûts d'une phase chantier. La sixième dimension traite des informations relatives à la durabilité d'un bâtiment et intègre par exemple les données relatives à la performance énergétique du bâtiment. La 7D est souvent utilisée pour désigner la modélisation orientée vers l'utilisation du bâtiment jusqu'à la démolition. Cela couvre par exemple les informations relatives à la maintenance et à la configuration des systèmes.

6.2. Le « Scan-to-BIM »

Intégrer des informations géométriques précises sur l'existant dans un modèle BIM est rapidement devenu une réalité, grâce au développement de technologies HDS plus accessibles et de meilleures fonctionnalités d'importation dans les logiciels de modélisation BIM. **Un grand nombre d'applications est possible à partir de ces nuages de points au sein d'un processus BIM.**

En rénovation, le HDS ouvre la voie vers une représentation précise et extrêmement complète du bâtiment. Ces données constituent une **aubaine pour les concepteurs**, qui y trouveront une information souvent beaucoup moins ambiguë que dans de la documentation archivée sous forme de plans 2D. À partir du nuage, une première possibilité est de remodeler complètement le bâtiment en objets paramétriques BIM (Figure 40). Malgré l'effort important que cela peut représenter, on retrouvera alors les bénéfices du BIM pour un projet de rénovation, comme la possibilité de planification de chantier ou encore des simulations numériques avancées (Figure 41). Les différents acteurs impliqués dans les efforts de transformation du bâtiment auront à leur disposition un modèle paramétrique complet ajusté au mieux à la réalité. Notons que la numérisation peut aussi concerner des infrastructures ou des terrains, dont les modèles tridimensionnels peuvent être intégrés dans des fichiers BIM liés par exemple à la construction d'un nouvel édifice attenant.

Il est en outre possible de **faire coexister les nuages de points, le modèle paramétrique dérivé, ou encore de simples dessins en traits, dans des calques dédiés au sein du logiciel BIM**. Ainsi, si l'information à haute définition est critique pour un acteur (pour l'ajustement d'éléments

préfabriqués par exemple) elle restera facilement accessible. Le relevé HDS fournit en effet un niveau de confiance très haut, bien plus satisfaisant que des plans en 2D. Pour certaines équipes de concepteurs, cela résulte en un gain de temps considérable pour la phase de design. C'est le cas par exemple des équipes chargées de concevoir les systèmes HVAC, où les éléments préfabriqués comme les gaines et les unités de ventilation peuvent être intégrés au mieux à l'existant. Les scans HDS peuvent aussi intervenir au sein d'un processus BIM en dehors des phases de conception. Ils offrent par exemple un outil puissant d'archivage continu dans un modèle BIM destiné au suivi de bâtiment ou au « facility management ». Les techniques de numérisation peuvent également être d'une grande **aide pour la mise en place de bibliothèques de composants**. Les fabricants peuvent en effet accélérer ce processus en modélisant leurs produits à partir de scans haute définition réalisés dans leurs ateliers.

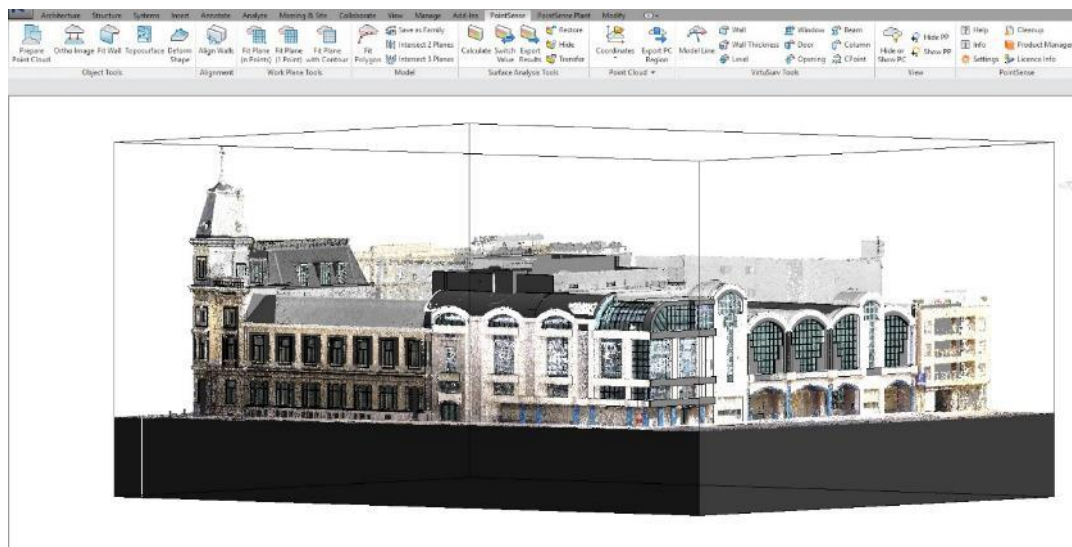


Figure 40. Modèle d'une maquette BIM à partir d'un relevé au scanner laser. Les deux informations coexistent dans le logiciel BIM. Source : Nx2

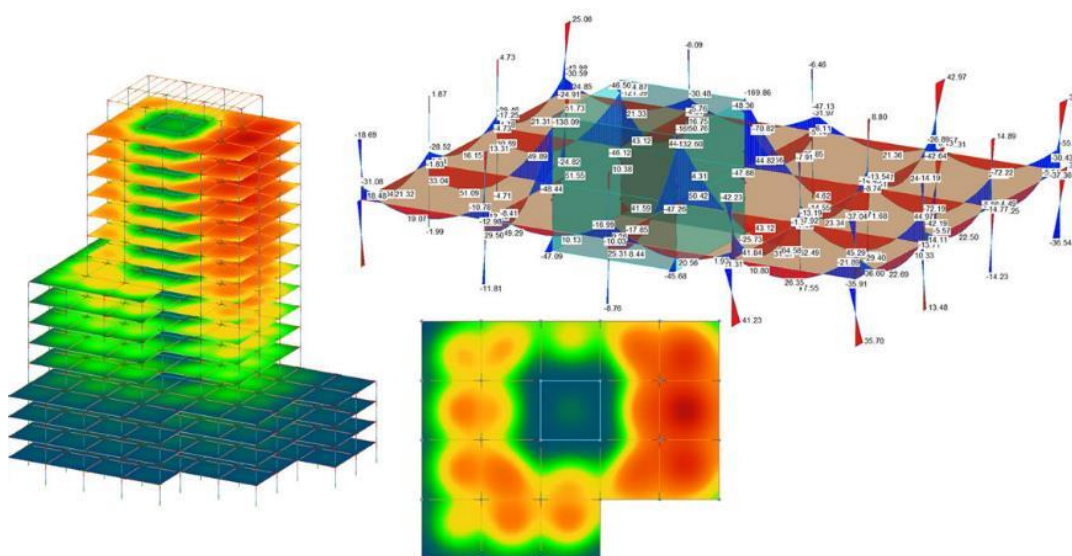


Figure 41. Analyse structurale sur base d'un modèle BIM. Source : Autodesk

La transformation d'un nuage de points en objet BIM peut s'effectuer de plusieurs manières. La première possibilité est de partir d'un processus scan-to-CAD, manuel ou semi-automatique, permettant de générer des solides tridimensionnels à partir des nuages (voir [section 5.2.1](#)). On peut alors importer ces objets géométriques dans le logiciel BIM afin de leur attribuer une sémantisation BIM. Néanmoins, les interfaces de modélisation BIM permettent la plupart du temps d'importer directement des nuages de points; la modélisation géométrique peut alors s'effectuer dans le logiciel BIM en se servant du nuage comme aide au traçage des primitives. L'avantage est alors de combiner modélisation et sémantisation (attribution d'une classe d'objets) en une étape. Comme pour le scan-to-CAD, une telle démarche manuelle peut se révéler très longue et laborieuse. Des outils dédiés à une transformation scan-to-BIM semi-automatique sont récemment apparus. On les trouvera sous la forme de plug-in pour les logiciels BIM (p.ex. *Faro Pointsense*, *Leica Cloudworkx*) ou encore intégrés au logiciel de prétraitement des nuages de points (p.ex. *Trimble Realworks*).

6.3. Le « Scan-vs-BIM »

L'intégration de relevés haute définition dans un processus BIM ne se limite pas à une transformation de l'information discrète d'un nuage de points en une information continue sous forme d'objets BIM. Les scans peuvent aussi servir comme **un puissant outil de contrôle, via des algorithmes de comparaison géométrique** (déjà présentés dans [la section 5.2.2](#)). Les applications sont multiples. Il est par exemple possible de suivre l'exécution d'un chantier en réalisant des scans réguliers ([Figure 42](#)). En superposant le modèle BIM à un scan pris sur chantier à un temps donné, des algorithmes de comparaison peuvent identifier les éléments déjà mis en œuvre et donc donner une indication sur l'avancement des opérations en relation avec une approche BIM 4D [8]. Pour les éléments BIM identifiés dans le nuage de points, il est également possible d'effectuer un contrôle dimensionnel et d'ainsi mettre en évidence d'éventuels écarts par rapport aux tolérances requises. Le responsable peut ainsi prendre d'éventuelles mesures d'ajustement, sans que les conséquences d'une mise en œuvre inadaptée puissent se faire ressentir sur la suite des opérations. Bien sûr, de telles approches de contrôle peuvent prendre place à de multiples endroits de la chaîne BIM, par exemple en interne chez un sous-traitant qui contrôlerait l'adéquation entre son produit final et le composant BIM correspondant. Au point de vue du logiciel, il existe des plug-ins spécifiques qui permettent de réaliser ces opérations comparatives au sein des programmes BIM ([Figure 43](#)).



Figure 42. Suivi de chantier par une campagne de numérisation étalée dans le temps (relevé par drone) avec possibilité de comparaison à la maquette BIM d'exécution. Source : Pix4D

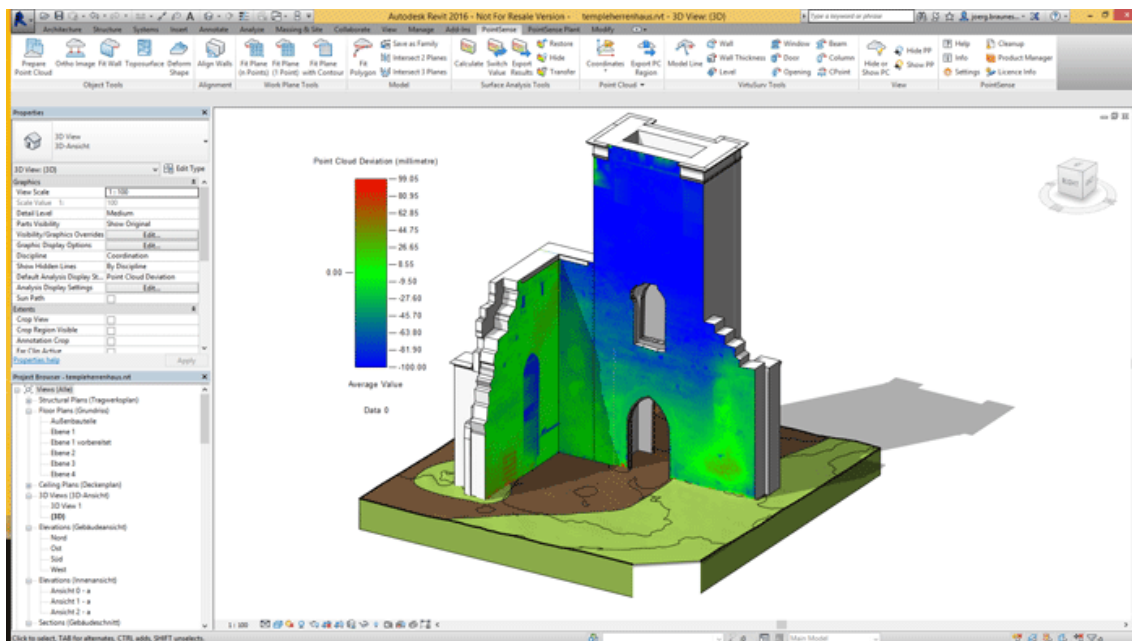


Figure 43. Plug-in *PointSense* pour *Autodesk Revit* qui permet de superposer l'information de planéité issue du nuage de points à la représentation simplifiée du bâtiment sous forme d'objets solides. Source : Faro

7. Définition du cahier des charges pour le géomètre chargé du relevé HDS

Au regard des opportunités que l'on vient d'aborder, il est essentiel que le commanditaire définisse clairement les objectifs de l'étude de numérisation haute résolution, en concertation éventuelle avec des consultants ou les prestataires potentiels. Cette étape est aussi critique que le traitement en lui-même. Car une mauvaise définition initiale des objectifs se traduira nécessairement en une inadéquation entre les livrables et l'utilisation planifiée de ces derniers. Dans l'explicitation des objectifs de l'étude il faut pouvoir trouver les informations suivantes :

- Les informations géométriques et/ou texturales à mettre en évidence
- Les types de modèles informatiques souhaités et leurs caractéristiques selon l'utilisation finale visée. Cela couvre aussi les aspects suivants :
 - La volonté éventuelle de communiquer, diffuser et échanger autour du modèle livrable. Ce point est important car il conditionne la mise en place des phases de post-traitement permettant de nettoyer, alléger, structurer et éventuellement sémantiser le modèle [7].
 - L'évolutivité potentielle des modèles (serait-il possible pour quelqu'un de se baser sur ce modèle pour en développer un nouveau ?). Cette question dépend notamment des aspects suivants :
 - le type et le format du fichier
 - le cheminement numérique utilisé pour le développement du modèle
 - les bibliothèques intégrées dans les modèles
 - les modalités de géolocalisation
 - L'actualisation potentielle du modèle au cours du temps
 - Le stockage potentiel du modèle sur une plateforme hébergée

Les **objets, volumes et surfaces du bâtiment à étudier** doivent être mentionnés clairement pour que le géomètre puisse élaborer un plan de balayage détaillé, afin de maximiser la correspondance entre le modèle obtenu et les besoins du client et de réduire les coûts. Quelques exemples courants de zones d'intérêts pour l'étude d'un bâtiment :

- Dimensions extérieures de chaque façade (bords extérieurs et angles)
- Dimensions intérieures des pièces
- Niveau de certains éléments structuraux
- Géométrie des corniches et des avant-toits
- Géométrie des balcons et d'autres éléments hors plan
- Situation exacte et dimensions des ouvertures existantes, à l'intérieur et à l'extérieur
- Inégalité de la surface de la façade, courbure et parois inclinées
- Autres pathologies structurelles (fissures, éléments manquants, ...)
- Hauteur du terrain
- Points de référence

Pour chaque zone d'intérêt, les **modèles livrables** doivent être définis avec précision par le client. Comme explicité dans la section précédente, les données brutes provenant des appareils de mesure ne pourront souvent pas être utilisées directement et nécessiteront une phase de traitement pour obtenir des modèles 3D ou 2D exploitables.

Les modèles 3D finaux peuvent inclure par exemple :

- Un ou plusieurs nuages de points nettoyés et à densité élevée à partir de scans (TLS) ou d'une reconstruction à partir d'images
- Une **combinaison de divers nuages de points nettoyés**⁵ dans un fichier de projet unique (nuage de points à densité très élevée)
- Une **interprétation ou simplification** d'un nuage de points (p.ex. nuage de points segmenté)
- Un **maillage** dérivé du nuage de points bruts ou de son interprétation, texturé ou non
- Certains éléments architecturaux spécifiques modélisés à l'aide de représentations géométriques ou paramétriques calées sur les points mesurés
- Un **modèle volumique** de l'enveloppe extérieure basé sur l'application de primitives géométriques
- Un **modèle volumique complet**, incluant les espaces intérieurs
- Un **modèle BIM « objet »** qui intègre des métadonnées non géométriques, pour une partie ou la totalité de la zone scannée
- Une représentation haute résolution de la **topographie de surface** d'une façade ou d'un élément de façade
- ...

Le commanditaire peut également désirer obtenir un modèle évolutif dans le temps et/ou hébergé sur une plateforme Cloud. Particulièrement si le développement d'une maquette BIM est requis. S'il prend à charge le travail d'actualisation, il faut s'assurer qu'il puisse bénéficier des outils nécessaires à cette tâche. S'il confie la tâche au prestataire, il faut que les coûts relatifs soient bien estimés.

Comme expliqué ci-dessus, les fichiers images tels que les orthophotographies constituent une première catégorie d'output 2D. D'autres modèles 2D plus classiques sont les relevés au trait qui

⁵ Ces données brutes peuvent être si lourdes qu'elles deviennent difficiles à exploiter sur des ordinateurs standards.

incluent les plans, les sections, les élévations et les détails de construction. Ces modèles sont généralement produits à partir des modèles 3D susmentionnés ou à partir d'orthophotographies. Enfin, le commanditaire peut requérir des représentations bidimensionnelles plus spécifiques, telles que des cartographies de déviation des façades ou d'éléments structuraux.

Les modèles livrables de l'étude doivent également être traduits en **critères de performance**. Il y a lieu de préciser les critères mentionnés dans le **Tableau 7** pour chaque zone d'intérêt, qui permettront au prestataire de définir au mieux une technique ou une combinaison de techniques adaptée. **Il convient également de vérifier les tolérances dimensionnelles et l'ampleur minimum des artefacts** lors des appels d'offres pour l'étude géométrique. Enfin, il est important de spécifier la précision requise (le cas échéant) pour la géolocalisation absolue du modèle.

Tableau 7. Quelques critères de performance à préciser pour les différentes zones d'intérêt afin de définir la technique de mesure la plus adaptée

| |
|--|
| • Niveau de détail* (par exemple la résolution d'un nuage de points) |
| • Incertitudes/tolérances de mesure acceptable |
| • Fiabilité dans la détection des arrêtes |
| • Niveau de restitution textural |
| • Niveau de paramétrisation des modèles géométriques |

*Ce point a une signification toute particulière lorsque l'on parle d'un modèle BIM ou l'on parle de LOD (« Level Of Development » ou « Level Of Detail ») pour les différents objets

Bien sûr, de nombreux autres paramètres importants peuvent intervenir dans la définition des objectifs de l'étude. **Le planning du projet et le budget dégagé pour l'étude géométrique sont toujours décisifs et peuvent restreindre les possibilités.**

8. Analyse des obstacles

Bien que les opportunités liées à l'utilisation des méthodes de relevé à haute définition soient réelles, il est essentiel de prendre en compte les obstacles potentiels, qu'il s'agisse de freins à l'utilisation de ces technologies ou d'entraves à la réussite d'un projet spécifique de numérisation HDS.

8.1. Freins globaux à l'utilisation des technologies HDS

Il existe plusieurs raisons qui peuvent refroidir un acteur à envisager l'utilisation des technologies HDS. Tout d'abord, la plupart des professionnels ont **des procédures de fonctionnement bien ancrées**, qui peuvent se révéler difficile à faire évoluer. Car on parle bien ici d'une transformation profonde des méthodes de fonctionnement, où l'information 3D viendra à terme diminuer en grande partie le besoin de passer par des représentations 2D. Il existe des **coûts immédiats importants** inhérents à la transition (formation, acquisition de logiciels, entretien des bases de données, etc.). Ces coûts peuvent être un frein majeur pour les petites structures où les investissements à long terme peuvent représenter une menace pour l'équilibre budgétaire. Au-delà des investissements, ce sont aussi les risques pressentis d'aller vers des procédures nouvelles alors que les schémas de travail établis fonctionnent bien. Pour les prestataires et sous-traitants, le problème sera pourtant de pouvoir **répondre à de nouveaux types de demandes** qui seront potentiellement incompatibles avec les structures en place.

8.2. Obstacles lors de la réalisation d'un relevé HDS

Il faut à nouveau distinguer ici deux grands types d'obstacles. D'une part les **risques intrinsèques** à chaque méthode, à savoir ceux qui sont liés à la technologie en elle-même, à ses limitations et prérequis techniques associés. Cela inclut les risques externes qui ne dépendent pas de facteurs humains, comme par exemple la météo lors du relevé. D'autre part les **risques extrinsèques** qui ont trait à la maîtrise technique de l'outil, à la compréhension de ses possibilités, et à l'acceptation des conséquences liées à son utilisation.

Pour ces deux catégories, on peut associer différents points d'attention à chaque étape d'un projet de relevé numérique HDS (voir [section 3](#)) :

- 1) Définition du cahier des charges
- 2) Planification de l'étude
- 3) Phase d'acquisition
- 4) Traitement des données brutes
- 5) Mise en forme finale et transmission des livrables

Le [Tableau 8](#) offre un aperçu de ces risques pour le relevé par scanner laser et par photogrammétrie multiimages. Le [Tableau 9](#) fournit quant à lui un récapitulatif des obstacles extrinsèques. On reprendra ci-dessous quelques obstacles critiques.

Un premier point d'attention, quelle que soit la méthode, est **l'adéquation entre la volonté du client et la traduction de cette volonté en un cahier des charges précis pour le relevé**. Il s'agit de comprendre l'objectif final de la tâche de numérisation, et de la traduire en spécifications techniques. Il faut donc que la communication entre opérateur et requérant se fasse sans barrières liées à la compréhension des possibilités qu'offrent les différentes techniques disponibles auprès de cet opérateur. Car un des sentiments les plus communs chez ces derniers est que les clients peuvent avoir **des attentes irréalistes quant à ces possibilités** [4]. De la part du géomètre, il s'agit d'être clair sur les limitations techniques et d'accompagner le client dans la **définition d'un cahier des charges et d'objectifs atteignables**. Les **responsabilités et obligations** de chaque partie doivent impérativement être définies en amont du relevé, afin d'éviter des retards sévères dans la prestation (voir [section 8.3](#)). Certains cas ont également montré qu'il était utile d'impliquer les occupants en leur présentant la technologie et en réalisant une démonstration afin d'éliminer leurs appréhensions et pour ne pas les déranger dans leur travail ou leur espace de vie [15].

Notons que l'acquisition par balayage laser en elle-même ne demande que peu d'expertise. Le point le plus critique pour la planification sera la **définition correcte des positions de scannage** afin d'assurer une couverture suffisantes des objets à sonder. La photogrammétrie demande quant à elle une préparation beaucoup plus poussée. Quelle que soit la taille du bâtiment/objet à étudier, il est indispensable de mettre en œuvre une **stratégie de capture réfléchie** sous peine d'avoir une reconstruction ultérieure peu fiable ou même impossible. En outre, le paramétrage adéquat de l'appareil photo devra être connu par l'opérateur afin de maximiser la qualité des photos (paramètre ISO au minimum, petite ouverture du diaphragme, etc.). En cas de relevé photogramétrique mobile, le pilotage du véhicule et la manipulation télécommandée de sa nacelle photo doivent être maîtrisés par le ou les opérateurs. En effet, il existe des prérequis spécifiques pour la photogrammétrie (p.ex. stabilité, taux de couvertures des photos, etc.) qui ne sont pas nécessairement pertinents lors d'études plus classiques.

Tableau 8. Risques intrinsèques majeurs liés à l'utilisation des relevés HDS

| | |
|---|---|
| Planification et phase d'acquisition sur le terrain | |
| <u>Problèmes généraux</u> | |
| Alimentation électrique insuffisante (batteries, accès à un point de branchement secteur, ...) | |
| Défaillance matérielle | |
| Mauvaise réception d'un signal nécessaire au fonctionnement (p.ex. GPS) | |
| Météo ou climat hostile au bon fonctionnement du matériel ou présentant des risques de dommages* | |
| Recul disponible insuffisant | |
| <u>Problèmes spécifiques</u> | |
| TLS | RPCI |
| Instabilité de la station d'acquisition due au terrain (sol instable, ...) | Appareil photo non adapté Ensoleillement trop important (Drones) Vent trop important |
| Traitement des données brutes | |
| <u>Problèmes généraux</u> | |
| Problèmes d'imprécision liés à l'objet sondé et à sa compatibilité avec la méthode (p.ex. zones réfléchissantes ou transparentes sur le bâtiment) | |
| <u>Problèmes spécifiques</u> | |
| TLS | RPCI |
| Données brutes très lourdes | Puissance de calcul disponible insuffisante |
| Mauvaise représentation colorimétrique | Temps de calcul très long |
| | Qualité inégale de la reconstruction 3D (p.ex. zone unie ou à motif répétitif sur l'objet étudié) |
| Mise en forme et transmission des livrables | |
| <u>Problèmes généraux</u> | |
| Incapacité du logiciel disponible à produire le type et/ou format du modèle final | |

*Certains modèles de scanners laser récents offrent une protection renforcée contre les intempéries

Tableau 9. Risques extrinsèques majeurs liés à l'utilisation des relevés HDS

| | |
|---|--|
| Définition du cahier des charges | |
| <u>Problèmes généraux</u> | |
| Incapacité du client d'exprimer son besoin en termes techniques | |
| Mauvaise définition des responsabilités et droits | |
| Mauvaise définition initiale des livrables | |
| Planification et phase d'acquisition sur le terrain | |
| <u>Problèmes généraux</u> | |
| Mauvaise préparation de la mission | |
| Accès difficile à certaines zones dont le relevé est prévu | |
| Obstacles imprévus (p.ex. véhicule garé) ou non anticipés (p.ex. végétation abondante) | |
| Obstacle humain (p.ex. réaction négative d'un occupant) | |
| <u>Problèmes spécifiques</u> | |
| TLS | RPCI |
| Mouvement imprévu du scanner dû aux activités environnantes (choc, vibration, ...) | Mauvais réglage de l'appareil photo (p.ex. ISO trop haut) |
| Mauvaise définition des emplacements de scan | Mauvaise définition de la méthodologie de prise de vues |
| Traitement des données brutes | |
| <u>Problèmes généraux</u> | |
| Pas de procédure claire pour le contrôle qualité | |
| Calage des scans difficile dû à un mauvais recouvrement ou à un nombre insuffisant de cibles | |
| Problèmes d'imprécision liés à une mauvaise utilisation de l'appareil de relevé (scanner ou appareil photo) | |
| <u>Problèmes spécifiques</u> | |
| TLS | RPCI |
| Nombre de scans insuffisants pour garantir la couverture des zones d'intérêt | Manque de connaissance quant au paramétrage du logiciel de reconstruction Mauvais tri des photos utilisées pour la reconstruction |
| Mise en forme et transmission des livrables | |
| <u>Problèmes généraux</u> | |
| Données complémentaires nécessaires à la création du livrable souhaité insuffisantes* | |
| Inadéquation entre le livrable et la capacité pour le client de l'utiliser (de par son poids ou son format) | |
| Difficulté de transmission des données de par leur poids numérique | |
| Mauvaise utilisation du modèle par le client de par une méconnaissance des possibilités que ce dernier offre* | |

* Il s'agit d'obstacles critiques lors d'un processus BIM

Lors de la réalisation du relevé, il existe des risques intrinsèques communs aux deux technologies comme les **défaillances matérielles** aléatoires ou dues à des conditions environnementales incompatibles (vibrations, vent, pluie, etc.). Les scanners laser et les appareils photos modernes sont des appareils de haute technicité et ne sont donc pas exempts d'une panne potentielle. Lors d'un relevé par drone, davantage de défaillances sont possibles, dues à l'embarquement de nombreux systèmes de communication. Au niveau de l'objet étudié, il existe un ensemble de facteurs qui peuvent nuire à la qualité de la restitution photogrammétrique, comme la présence de textures unies ou de surfaces réfléchissantes (voir **Tableau 4**). Des problèmes similaires existent pour les scanners laser mais dans une moindre mesure.

Les obstacles potentiels sont également nombreux lors de la phase de traitement des données, avec à nouveau des problèmes communs aux deux méthodes, et d'autres plus spécifiques. Comme mentionné dans la **section 2.2.3**, la méthode photogrammétrique requiert par exemple une puissance de calcul importante pour effectuer la reconstruction tridimensionnelle; la configuration informatique requise va d'ailleurs dépendre exponentiellement du nombre d'images traitées simultanément. Pour le calage et le référencement des nuages, il faudra prévoir suffisamment de points d'appui (p.ex. cibles relevées par station totale) ou un recouvrement suffisant des scans selon la méthode utilisée pour ces opérations. Les obstacles rencontrés lors de la mise en forme des livrables vont dépendre de la complexité de la demande du client, et de la transcription adéquate des responsabilités de chaque partie afin d'atteindre les objectifs liés.

8.3. Quelques implications réglementaires

Pour clôturer cette section consacrée aux obstacles potentiels à l'utilisation des relevés HDS, il est utile de s'attarder brièvement sur certaines implications réglementaires.

8.3.1. Sécurité sur chantier

Les relevés HDS réalisés au sol n'engendrent généralement que peu de mesures de sécurité spécifiques quant aux appareils utilisés pour le relevé. Il s'agit cependant de **garantir la sécurité des opérateurs sur site lors de l'activité de numérisation**, ce qui peut requérir de prendre certaines dispositions (équipement de sécurité, arrêts de certaines opérations, etc.). Un point particulier concerne les risques d'utilisation de la lumière laser pour la peau et les yeux des opérateurs et personnes présentes dans le rayon d'action d'un scanner. Depuis les années 70, une classification a été mise en place pour définir la dangerosité des scanners lasers. Cette classification compte aujourd'hui sept classes: 1, 1M, 2, 2M, 3R, 3B et 4. La grandeur du chiffre indique la dangerosité du système. **À l'heure actuelle, la majorité des appareils de relevé TLS appartiennent à la classe 3R**; autrement dit, ils ne présentent que peu de danger à condition d'être manipulés avec soin [9].

L'utilisation de drones doit amener des dispositions plus strictes quant à la sécurité, car le risque inhérent à leur utilisation est en théorie beaucoup plus grand. Il faut cependant préciser que les fabricants de drones proposent des améliorations techniques de plus en plus avancées pour garantir une sécurité optimale lors de leur utilisation. En avril 2016, **l'arrêté royal relatif à l'utilisation des « aéronefs télépilotes dans l'espace aérien belge »** a été publié au Moniteur belge. Ce document réglemente donc dorénavant l'utilisation des drones en Belgique et a été établi en concertation avec la fédération BeUAS (Fédération belge de l'Aviation Télépilote). Rappelons déjà ici que le vol est tout simplement interdit au-dessus de certaines zones. De plus amples informations sont disponibles dans une FAQ publiée dans la section Mobilité du site *Belgium.be* [16].

Lors de toute utilisation mobile, en particulier si le déplacement est automatisé, le prestataire doit pouvoir garantir la sécurité des personnes et donc éventuellement prévoir une restriction d'accès temporaire sur certaines zones, en concertation avec le commanditaire. Mentionnons tout de même que **l'automatisation des systèmes de relevé mobile permet d'accéder à des zones dangereuses sans que l'opérateur doive y pénétrer**. Il s'agit donc plutôt d'une réduction du risque par rapport à des relevés traditionnels. Dans tous les cas présentant un risque accru, il est conseillé au client de vérifier que le prestataire est sous la couverture des assurances nécessaires.

8.3.2. Confidentialité et vie privée

Le fait de relever l'existant sous un format à haute résolution soulève de nouvelles questions quant au **droit à l'image et à la vie privée**, qu'il s'agisse des occupants d'un bâtiment ou encore de simples passants. De tels relevés permettent en effet de restituer l'environnement sondé avec une résolution qui rend possible l'identification des personnes, des activités en cours, et de tous les objets présents dans le champ de vision de l'appareil. **La question est particulièrement sensible lorsque l'on fait appel à un relevé photographique**. Il faut donc garantir que les autorisations nécessaires soient délivrées lors de la planification du relevé. Il en va de même pour toutes les zones de confidentialité qui entourent la tâche de relevé. Si des données sensibles sont concernées par le relevé, le commanditaire doit s'assurer de mettre sur papier d'éventuelles clauses spécifiques. Cela peut couvrir des aspects de non-divulgation, de stockage informatique sécurisé, d'accès limité aux données, etc.

8.3.3. Droits, obligations et responsabilités

Pour assurer la réussite d'un relevé HDS, il est essentiel de **définir correctement les obligations, droits et responsabilités** qui fixent ce que les parties doivent faire et qui sera responsable des conséquences d'erreurs ou d'omissions spécifiques [4]. Un accord doit également être trouvé quant aux possibilités d'utilisation des données par le client et d'éventuelles tierces parties. Le prestataire peut par exemple conserver la propriété intellectuelle associée à la création des modèles et accorder une licence au client pour une série d'utilisations qui sont précisées. Cette problématique est centrale dans la question du BIM où les notions de propriété intellectuelle sont encore mal définies.

9. Développements futurs

À l'heure du « tout numérique », nul doute n'est émis quant à un **développement important des techniques de relevé HDS au cours des prochaines années**, avec des évolutions importantes aux points de vue technique et informatique mais aussi en termes de chaînes de travail et d'interactions entre acteurs. Tout particulièrement si les professionnels de la construction parviennent à s'approprier ces méthodes innovantes et à travailler de concert avec les développeurs de matériel et logiciel pour **améliorer la correspondance entre leurs besoins et les possibilités techniques**. On peut d'ores et déjà s'interroger sur la direction que pourraient ou devraient prendre ces évolutions.

Les techniques de relevé en elles-mêmes sont tout d'abord amenées à fortement évoluer. Pour les scanners laser, il s'agira vraisemblablement d'**améliorer la qualité de restitution texturale**, avec l'intégration de meilleurs capteurs photographiques ou de meilleures possibilités d'une complémentarité avec les techniques photogrammétriques. Une **miniaturisation des appareils** est aussi probable en corollaire au développement de solutions mobiles moins encombrantes et

coûteuses. Les premières solutions de scanner laser embarqué sur drone commencent d'ailleurs à apparaître (Figure 44).

La méthode photogrammétrique de reconstruction multiimages possède des atouts indéniables et sera sans aucun doute sujette à des améliorations significatives. Les axes de travail sont principalement **l'amélioration de la précision de la restitution, une optimisation du temps de calcul et le développement du traitement de vidéos**. Une problématique majeure reste pour l'instant l'estimation de la qualité de restitution avant le traitement complet hors chantier. Pour répondre à cet obstacle, il est souhaitable que des procédures de contrôle qualité claires soient définies à l'avenir. Bien qu'elles n'aient pas été abordées ici en détail, il est certain que les technologies de numérisation en temps réel connaîtront des avancées significatives. Encore souvent cantonné aux environnements intérieurs, avec une précision souvent inférieure aux scanners fixes, leur champ d'action s'élargira très certainement à l'avenir.

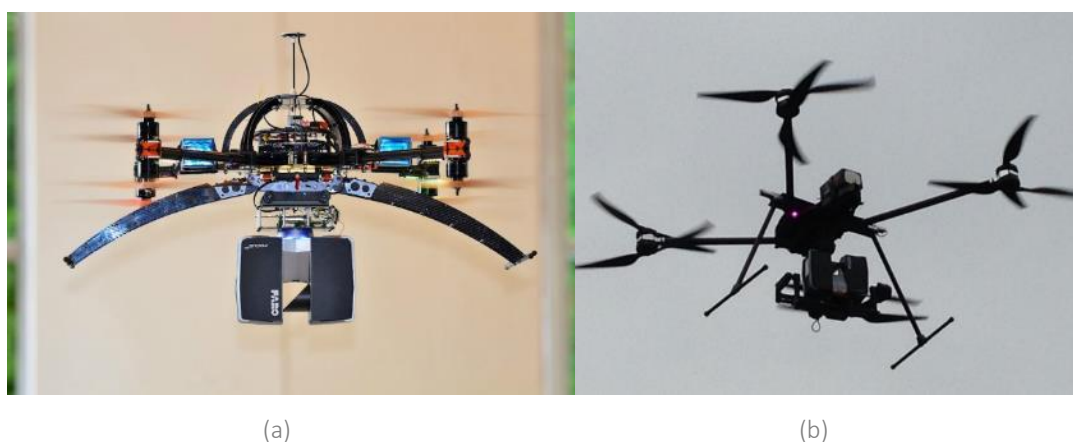


Figure 44. Les prémices de solutions « compactes » pour la lasergrammétrie embarquée sur drone : (a) le *Scan-Copter 2.0* développé en Autriche (source : 4D-IT); (b) solution développée en Belgique (source : Think3D)

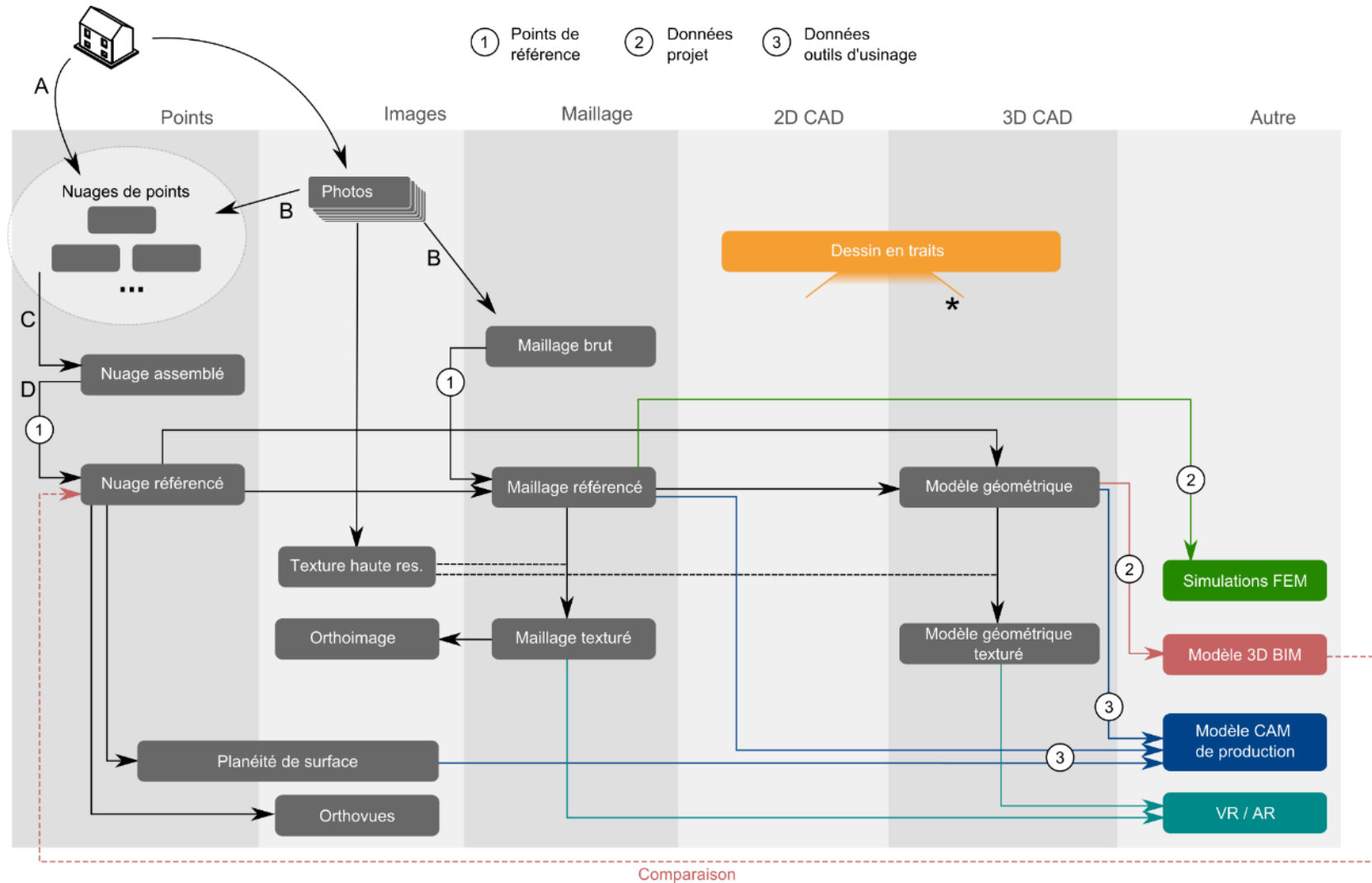
Au point de vue des logiciels de traitement des fichiers 3D, on attend de grands progrès dans le **traitement automatique des nuages de points** (filtrage, segmentation, sémantisation, comparaison, etc.). On l'a vu, le BIM est appelé à occuper une place de plus en plus grande dans le secteur. L'intérêt de la conversion « scan-to-BIM » et des algorithmes « scans-vs-BIM » est évident même si de grands efforts restent à produire pour faciliter le travail qui reste très manuel et fastidieux. L'intégration des outils devrait par ailleurs se poursuivre, avec de plus en plus de solutions logicielles offrant la possibilité de traiter plusieurs sources de données de manière combinée.

Malgré les nombreuses opportunités techniques mises en évidence, il existe un risque d'utiliser les technologies 3D de manière non adéquate. Ce sera particulièrement critique si les technologies se démocratisent davantage. Cela impliquera dans le futur une meilleure définition des procédures de rédaction des cahiers des charges et des possibilités de contrôle qualité. En parallèle, un accompagnement adéquat des acteurs de la construction est évidemment souhaitable.

Références

- [1] F. Petzold and D. Donath, *Digital building surveying and planning in existing building*, E-Des. Archit., p. 73, 2004.
- [2] K. E. Larsen, F. Lattke, S. Ott, and S. Winter, *Surveying and digital workflow in energy performance retrofit projects using prefabricated elements*, Autom. Constr., vol. 20, no. 8, pp. 999–1011, 2011.Bb
- [3] “Découvrez l’arrêté royal (drones) relatif à l’utilisation des aéronefs télépilotés dans l’espace aérien belge.” [Online]
http://mobilit.belgium.be/fr/nouvelles/nieuwsberichten/2016/decouvrez_larrete_royal_drones_relatif_utilisation_des_aeronefs [Date d’accès: 20-Déc-2016]
- [4] T. Randall, *Client guide to 3D scanning and data capture*, BIM Task Group, 2013.
- [5] “Documentation Point Cloud Library (PCL).” [Online]
http://pointclouds.org/documentation/tutorials/region_growing_segmentation.php [Date d’accès: 20-Déc-2016].
- [6] T. Luhmann, S. Robson, S. Kyle, and J. Boehm, *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging*, Photogramm. Eng. Remote Sens., vol. 81, no. 4, pp. 273–274, 2015.
- [7] R. Héno and L. Chandelier, *Numérisation 3D de bâtiments : cas des édifices remarquables*. London: Hermes Science Publishing, 2014.
- [8] G. Lamaille, J. Lahaye, and T. Vandenberg, *L’utilisation du Scanning Laser 3D pour la documentation as-built des projets BIM*, Rev. Sci. Ing. Ind., no. 30, 2016.
- [9] S. Jaillet, E. Ployon, T. Villemin, *Images et modèles 3D en milieux naturels*, Collection EEDYTEM, no. 12, 2011.
- [10] N. Snavely and R. Szeliski, *Scene reconstruction and visualization from community photo collections*, Proceedings of the IEEE, vol. 98, no. 8, 2010.
- [11] C. Devillers, *Complémentarité de la photogrammétrie et de la lasergrammétrie pour la modélisation 3D architecturale*, Institut d’Enseignement de Promotion Sociale de la Communauté française, 2015.
- [12] “AIM-ES - BrusselsRetrofitXL.” [Online] <http://www.brusselsretrofitxl.be/projects/aim-es/> [Date d’accès: 22-Déc-2016].
- [13] “CyArk Project” [Online]. [Online] <http://www.cyark.org/>. [Date d’accès: 22-Dec-2016].
- [14] S. Dubois, O. Remy, and M. de Bouw, *Retrofitting with AIM-ES: Guidelines for using Architectural Industrialised Multifunctional Envelope Systems*, CSTC-WTCB-BBRI, 2016. [Online]
http://www.brusselsretrofitxl.be/wp-content/uploads/2016/07/AIMES_Guidelines_UK_2016.pdf [Date d’accès: 20-Dec-2016]
- [15] *GSA BIM Guide series 03: BIM Guide for 3D imaging*, GSA, 2009. [Online]
<http://www.gsa.gov/portal/content/102282> [Date d’accès: 10-Déc-2016]
- [16] “FAQ UAV | SPF Mobilité.” [Online]
http://mobilit.belgium.be/fr/Resources/publications/luchtvaart/pub_luchthavens_faq_drones [Date d’accès: 22-Déc-2016]

Annexe: le cheminement de l'information 3D



À : Scanner laser ; B : Reconstruction photogrammétrique ; C : Calage des nuages ; D : Géoréférencement.

* Les dessins en traits peuvent être réalisés à partir de n'importe quelle forme de modèle 3D ou encore à partir d'images

Le relevé géométrique à haute définition

La numérisation 3D à l'heure du BIM

La documentation fiable est une condition nécessaire pour une planification efficace autour des bâtiments existants. Les techniques de relevé traditionnelles sont basées sur l'évaluation de points discrets à la surface d'un objet. Cette méthode fournit des informations très fidèles à la réalité mais sa mise en œuvre peut s'avérer fastidieuse si l'on veut accroître le niveau de détail sur la façade. Face à cette technologie aujourd'hui mature, des méthodes de mesure tridimensionnelle avancées sont apparues et peuvent répondre à des besoins plus spécifiques.

Ce document passe d'abord en revue les évolutions récentes des technologies de mesure géométrique, associées à l'apparition du relevé à haute résolution. Différentes applications possibles sont ensuite détaillées, ainsi que les chaînes de travail numériques qui y sont nécessairement associées. L'intégration dans la démarche BIM en tant qu'outil de collecte d'information géométrique est aussi détaillée avec des perspectives claires quant aux bénéfices pour les acteurs concernés.

