



# Le relevé 3D à l'heure du BIM

*Capter la réalité en haute définition*

Octobre 2018



Réalisé dans le cadre de C-Tech, la Guidance technologique en Région de Bruxelles-Capitale, un partenariat du CSTC mené avec la collaboration de la CCB-C et le soutien d'Innoviris





# Le relevé 3D à l'heure du BIM

## *Capter la réalité en haute définition*

### Auteurs

---

Samuel Dubois, Yves Vanhellemont, Michael de Bouw

Octobre 2018

#### **CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DE LA CONSTRUCTION**

CSTC, établissement reconnu en application de l'arrêté-loi du 30 janvier 1947  
Siège social : Rue du Lombard 42 à 1000 Bruxelles

Publication à caractère scientifique visant à faire connaître les résultats  
des études et recherches menées dans le domaine de la construction  
en Belgique et à l'étranger.

La reproduction ou la traduction, même partielles, du texte de la présente monographie n'est autorisée qu'avec le consentement de l'éditeur responsable.



Réalisé dans le cadre de C-Tech, la Guidance technologique en Région de Bruxelles-Capitale,  
un partenariat du CSTC mené avec la collaboration de la CCB-C et le soutien d'Innoviris



# Sommaire

PRÉFACE .....	4
ABRÉVIATIONS ET LEXIQUE.....	5
1. CONTEXTE .....	7
1.1 Les relevés géométriques.....	7
1.2 Un relevé à haute définition .....	7
2. VUE GÉNÉRALE SUR LES TECHNIQUES DE RELEVÉ HD.....	11
2.1 Terminologie.....	11
2.1.1 Typologie des représentations numériques 3D.....	11
2.1.2 Situer le modèle dans l'espace .....	11
2.1.3 Attribuer une signification au modèle .....	13
2.1.4 Transformer la nature du modèle numérique .....	13
2.2 Techniques d'acquisition 3D.....	14
2.2.1 Balayage laser (lasergrammétrie) .....	15
2.2.2 Reconstruction photogrammétrique par corrélation d'images (RPCI) .....	18
2.2.3 Reconstruction photogrammétrique face au scanner laser .....	21
2.2.4 Autres méthodes .....	22
3. ETAPES CLÉS D'UN RELEVÉ HD SUR CHANTIER.....	25
3.1 Définition du cahier des charges de l'étude et attribution du marché .....	25
3.2 Planification de l'étude .....	25
3.3 Phase d'acquisition sur le terrain.....	25
3.4 Traitement des données brutes .....	26
3.4.1 Prétraitement .....	26
3.4.2 Contrôle de la qualité .....	26
3.4.3 Transformations du modèle et traitements avancés .....	27
3.5 Mise en forme finale et transmission des livrables .....	27
4. SITUATION ACTUELLE DANS LE SECTEUR DE LA CONSTRUCTION EN BELGIQUE.....	28

5. ANALYSE DES OPPORTUNITÉS .....	29
5.1 Objectifs d'une étude de relevé HD.....	29
5.1.1 Numériser pour placer le bâtiment dans l'espace et/ou dans le temps .....	29
5.1.2 Numériser pour comprendre un bâtiment ou une partie de celui-ci.....	29
5.1.3 Numériser pour mesurer, diagnostiquer et évaluer.....	31
5.1.4 Numériser pour communiquer .....	32
5.1.5 Numériser pour concevoir et fabriquer.....	33
5.1.6 Numériser pour administrer .....	33
5.1.7 Numériser pour contrôler .....	33
5.2 Modèles finaux et chaîne de travail numérique .....	34
5.2.1 Utilisations simples pour la visualisation et le dessin architectural .....	35
5.2.2 Utilisations avancées.....	38
6. INTÉGRATION DES SCANS DANS UNE DÉMARCHE BIM .....	41
6.1 Qu'est-ce que le BIM ?.....	41
6.2 L'utilisation du scan 3D pour élaborer la maquette BIM ( <i>scan-to-BIM</i> ) .....	42
6.3 Comparaison du scan 3D à la maquette BIM ( <i>scan-versus-BIM</i> ) .....	44
7. DÉFINITION DU CAHIER DES CHARGES POUR LE GÉOMÈTRE RESPONSABLE DU RELEVÉ HD .....	45
8. ANALYSE DES OBSTACLES.....	47
8.1 Freins globaux à l'utilisation des technologies de relevé HD .....	47
8.2 Obstacles lors de la réalisation d'un relevé HD.....	47
8.3 Quelques implications réglementaires.....	49
8.3.1 Sécurité sur chantier.....	49
8.3.2 Confidentialité et vie privée .....	50
8.3.3 Droits, obligations et responsabilités .....	50
9. DÉVELOPPEMENTS FUTURS.....	51
BIBLIOGRAPHIE.....	53

# PRÉFACE

L'entrepreneur est de plus en plus confronté à l'utilisation de modèles 3D. En effet, de nouvelles technologies sont apparues pour numériser la réalité de manière automatique et très complète. Ce document passe d'abord en revue les évolutions récentes des technologies de mesure géométrique associées à l'apparition du relevé à haute résolution. Les technologies pertinentes à l'échelle des parois, des pièces et des 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. Il sera également question de l'intégration dans la démarche BIM en tant qu'outil de collecte d'informations géométriques avec des perspectives claires quant aux bénéfices pour les acteurs concernés. Les risques inhérents à l'utilisation de ces technologies ne seront pas oubliés. Enfin, les perspectives de développements technologiques ainsi que la récupération possible de la part de l'industrie de la construction seront également abordées.

Cette publication a pour objectif de garantir à chacun un bon niveau de compréhension des possibilités, mais aussi des limites inhérentes aux technologies de numérisation à haute définition (également appelées technologies de *scanning* 3D). Elle ambitionne également de dégager quelques perspectives quant aux évolutions pressenties de ces technologies et de leur incorporation dans les procédures des professionnels de la construction.

# ABRÉVIATIONS ET LEXIQUE

## **2D/3D**

Deux/trois dimensions.

## **BES** *Building energy simulation*

Simulation énergétique du bâtiment.

## **CAD** *Computer aided design*

Conception assistée par ordinateur (voir CAO).

## **CAM** *Computer aided manufacturing*

Fabrication assistée par ordinateur (voir FAO).

## **CAO** Conception assistée par ordinateur

Logiciels permettant de concevoir des objets par modélisation géométrique à l'aide d'un ordinateur.

## **CFD** *Computational fluid dynamics*

Mécanique des fluides numériques.

## **DOF** *Depth of field*

Profondeur de champ.

## **FAO** Fabrication assistée par ordinateur

Logiciels permettant de piloter une machine-outil au moyen de commandes numériques. Un modèle 3D peut servir de base à la définition de ces commandes.

## **FEM** *Finite element modeling*

Modélisation à éléments finis.

## **GPU** *Graphics processing unit*

Processeur graphique.

## **HAM** *Heat, air and moisture*

Chaleur, air et humidité.

## **HD** *High definition*

Haute définition ou haute résolution.

## **HVAC** *Heating, ventilation and air-conditioning*

Production de chaleur, de ventilation et d'air conditionné.

## **IMMS** *Indoor mobile mapping system*

Système de relevé mobile en intérieur.

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.

## **MEP** *Mechanical, electrical and plumbing*

Mécanique, électricité et plomberie.

## **RGB** *Red, green, blue*

Rouge, vert, bleu.

**RPCI** Reconstruction photogrammétrique par corrélation d'images  
Méthode numérique par laquelle un modèle 3D haute résolution d'un objet est reconstruit automatiquement à partir de photos sous différents points de vue.

**SIFT** *Scale invariant feature transform*  
Algorithme de détection de points de correspondance entre plusieurs images.

**SIG** Système d'information géographique

**SFM** *Structure from motion*  
Catégorie d'algorithmes nés de la robotique et qui génèrent des nuages de points à basse définition à partir de multiples 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 LES RELEVÉS GÉOMÉTRIQUES

Le ‘relevé’ désigne l’action d’effectuer une série de mesures sur un bâtiment ou un terrain afin de le caractériser géométriquement, généralement sous forme de plans. Pour un projet de rénovation lourde, il est, par exemple, nécessaire de rassembler des informations précises concernant la géométrie *as-built* du bâtiment. Le principal avantage d’un relevé géométrique bien réfléchi réside dans la réduction significative des erreurs commises sur chantier et des frais qui en découlent. Les décisions prises ‘sur le vif’ et potentiellement coûteuses seront ainsi limitées. Toutefois, 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 [P1]).

Les techniques de relevé traditionnelles sont basées sur l’évaluation de la position de points discrets à la surface de l’objet grâce à la mesure de distances ainsi que d’angles verticaux et horizontaux. Les ‘stations totales’ modernes sont entièrement automatisées 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 (GPS, p. ex.). Cette technique fournit des informations très fidèles à la réalité, mais peut s’avérer fastidieuse si l’on veut accroître le niveau de détail sur la façade [L2]. De plus, si la technique est intrinsèquement précise, la qualité finale dépendra fortement de l’opérateur. En effet, ce dernier doit ‘viser’ des points d’intérêt sélectionnés sur la façade et les référencer correctement. Face à cette technologie aujourd’hui mature, des méthodes de mesure tridimensionnelle avancées sont apparues et peuvent répondre à des besoins plus spécifiques.

## 1.2 UN RELEVÉ À HAUTE DÉFINITION

L’ensemble des secteurs industriels connaît des évolutions importantes liées aux technologies numériques et aux immenses possibilités que ces dernières ont à offrir. Les représentations tridimensionnelles d’objets (modèles 3D) y jouent souvent un rôle central, que ce soit pour la communication, pour la conception ou pour la production. Déjà adoptée par de nombreux acteurs, la modélisation 3D des bâtiments est toutefois principalement utilisée à petite échelle au cours des phases de conception et de manière sporadique (modélisation énergétique en construction neuve, plans d’esquisses, ...).

Complémentairement aux outils 3D de modélisation, les techniques modernes d’acquisition 3D ont un rôle essentiel à jouer dans la numérisation<sup>(1)</sup> de l’existant. A l’heure actuelle, le relevé du bâtiment ne se limite plus uniquement à prendre des mesures géométriques ponctuelles, mais vise à transcrire la réalité de manière extrêmement complète. Il est désormais possible de mesurer très précisément la position de millions de points géométriques sur la surface d’un bâtiment (intérieur/extérieur) ou d’un de ses composants (voir figure 1). On peut donc parler de relevé géométrique à haute définition (HD) ou, plus simplement, de scan 3D. L’encadré (p. 8) résume les différentes appellations que l’on retrouve dans la littérature.

Il convient de s’attarder sur le fonctionnement d’un scanner laser, appareil apparu récemment sur les chantiers et précurseur du relevé HD dans la construction. 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.



Fig. 1 Le relevé à haute définition permet de capturer de fins détails sur les bâtiments (une maçonnerie dans le cas présent).

(1) Représentation de la réalité sous la forme d’un modèle 3D.

## 1. Contexte

Les scanners laser émettent des faisceaux mesurant une distance alors qu'ils retournent vers la source après avoir ricoché sur la surface. La technologie actuelle permet d'envoyer des milliers de faisceaux par seconde, ce qui résulte en un 'nuage de points' dans l'espace tridimensionnel (voir figure 2, p. 9). Chaque point collecté est référencé dans l'espace par rapport à l'appareil de mesure, avec une précision pouvant atteindre le millimètre.

Outre les scanners laser, on retrouve également les approches de reconstruction photogrammétrique automatique à partir d'images (voir figure 3, p. 9), développées récemment au sein des méthodes de photogrammétrie rapprochée. 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 (voir § 2.2.2, p. 18). 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 la prise correcte des photographies ou le traitement des fichiers numériques.

L'apparition des drones (aéronef sans pilote embarqué) constitue une évolution relativement récente pour le relevé géométrique. Les drones ont un énorme potentiel, mais soulèvent également des questions qui restent en suspens. Il s'agit davantage d'un vecteur de mesure que d'une technique de mesure. En effet, ces véhicules volants légers (voir figure 4, p. 10) peuvent être équipés d'appareillages de relevé, ce qui permet d'avoir accès à certaines parties du bâtiment pouvant être difficiles à analyser par d'autres moyens (immeubles élevés, toitures, ...). Dans sa forme la plus simple, un drone peut être muni 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'utilisation des drones est réglementée par un arrêté royal [S2] dont le contenu impose malheureusement de nombreuses restrictions d'usage, y compris pour le professionnel.

### LE POINT SUR LES APPELLATIONS

Le terme **numérisation 3D** est très général et désigne le fait de retranscrire les bâtiments sous la forme d'un modèle 3D. Outre les techniques de capture de l'existant, la numérisation 3D reprend également les techniques de modélisation 3D (dessin 3D). Cependant, le terme est généralement utilisé pour faire référence à la première catégorie d'outils, c'est-à-dire à la capture automatique du réel et à la transcription en représentation virtuelle. Nous l'utiliserons de cette manière dans ce document.

L'appellation **scan 3D** est très courante pour désigner des méthodes d'acquisition automatique et directe de données 3D en haute définition. Le terme est issu des 'scanners laser' qui ont été pionniers en la matière. Si elle est prise au sens strict, cette dénomination exclut donc certaines techniques où l'acquisition 3D n'est pas directe, comme la reconstruction photogrammétrique décrite au § 2.2.2 (p. 18). Le terme est cependant répandu dans de nombreux secteurs industriels et peut être utilisé de manière générale pour désigner toute méthode de capture 3D de l'existant, directe ou indirecte. Dans ce sens, il est donc équivalent à 'numérisation 3D'. Notons que le terme 'scan 3D' peut également désigner la représentation virtuelle que l'on obtient. On pourra donc dire : 'le géomètre a réalisé un scan 3D du bâtiment' et 'le scan 3D obtenu est très détaillé'.

Parler de **relevé à haute définition** du bâtiment permet d'insister sur l'évolution des approches et techniques disponibles pour le relevé (ou levé) architectural, sous l'impulsion des technologies modernes de numérisation 3D. Il convient toutefois de garder à l'esprit que les technologies récentes utilisées permettent de capturer des données bien plus riches par rapport au relevé traditionnel (information de couleur, p. ex.). Le terme 'relevé HD' ne désigne pas uniquement la prise de mesures dimensionnelles.

Selon la définition retenue, les trois termes peuvent être très proches au final. Par souci de facilité, on les utilisera de manière indifférenciée.

A. Vue générale du site



B. Zoom partiel sur une partie du bâtiment



C. Zoom partiel sur un élément architectural

Fig. 2 Nuage de points obtenu à l'aide d'un relevé au scanner laser (source des images : CSTC / source du modèle : De Ceuster).

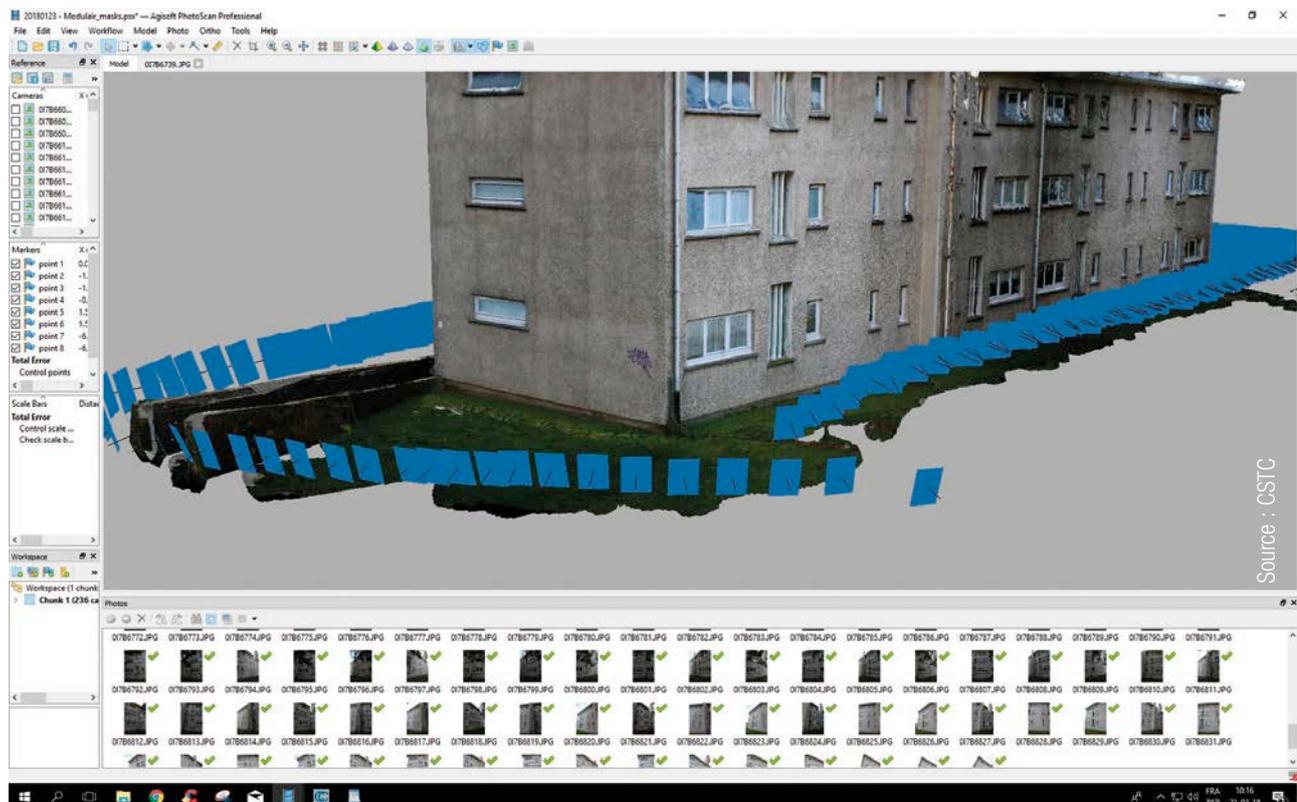


Fig. 3 Reconstruction d'un bâtiment sous la forme d'un nuage de points, à partir de simples photos. Les rectangles bleus indiquent les positions successives utilisées pour prendre les photographies.

## 1. Contexte

Bien que les nuages de points issus des méthodes de relevé HD représentent déjà une source d'informations 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 scan 3D en un modèle BIM, associant des objets à un ensemble de métadonnées. Parallèlement à un bouleversement des techniques de conception et de planification offerte par le BIM, d'autres technologies liées à la manipulation d'informations 3D viennent chambouler les méthodes de travail traditionnelles. Robotisation, impression 3D ou réalité virtuelle bouleversent les codes de l'industrie de la construction. Dans ce cas, la numérisation 3D joue le rôle d'intermédiaire entre le monde physique et numérique.

Les scans 3D sont déjà utilisés dans de nombreuses industries. Les secteurs de l'architecture et de la construction les ont toutefois adoptés assez récemment et leur potentiel dans la gestion de projets de rénovation et/ou d'exploitation n'a pas encore été complètement saisi par les éventuels clients [R1]. Ce document vise à présenter en détail différentes techniques, à souligner les opportunités que ces acteurs peuvent rapidement s'approprier, à prévenir certains obstacles et à exposer des évolutions futures possibles. Il se concentre sur les méthodes à l'échelle du bâtiment, bien que des exemples à échelle plus grande ou plus petite soient fournis.



Fig. 4 Utilisation d'un drone pour le relevé photogrammétrique d'un bâtiment.

# 2. VUE GÉNÉRALE SUR LES TECHNIQUES DE RELEVÉ HD

## 2.1 TERMINOLOGIE

### 2.1.1 TYPOLOGIE DES REPRÉSENTATIONS NUMÉRIQUES 3D

Avant d'entamer le descriptif des différentes techniques de relevé HD, il est indispensable de rappeler brièvement les types de représentation 3D. Il convient tout d'abord de distinguer les représentations 3D 'brutes' ou 'directes' (issues d'appareils de scan 3D), des représentations 3D 'construites' ou 'indirectes' (obtenues par un processus de reconstruction ou de modélisation à partir de données brutes). Bien que le terme 'modèle 3D' soit parfois réservé uniquement à la deuxième catégorie, on l'utilisera indistinctement dans le présent document pour désigner toute représentation de l'existant sous forme numérique en trois dimensions.

Le nuage de points (voir figure 5a, p. 12) est la représentation type associée au scan 3D. Dans sa forme la plus simple, le nuage de points est un fichier texte qui reprend les coordonnées géométriques de tous les points. Grâce aux technologies modernes, une information sur la couleur de l'objet scannée peut être associée à chacun d'eux. Les données géométriques et colorimétriques étant l'intérêt principal pour la majorité des études de bâtiments, les clients n'auront généralement pas besoin d'informations supplémentaires [R1], même si d'autres éléments peuvent être collectés au sein du fichier.

Un deuxième type de modèle 3D est le maillage polygonal, c'est-à-dire un assemblage polyédrique décrit par des sommets et des arêtes formant des triangles (également appelé 'maillage triangulé'). Il s'agit donc d'une représentation continue de l'objet. Les surfaces délimitées par les différentes arêtes peuvent être représentées (modèle surfacique, voir figure 5b, p. 12) ou non (modèle filaire, voir figure 5c, p. 12). De tels modèles sont souvent obtenus par transformation à partir d'un nuage de points, généralement au moyen d'un algorithme dit de 'polygonisation' ou de 'facettisation'.

Les modèles géométriques sont issus, quant à eux, d'un processus de modélisation à l'aide de primitives géométriques telles que des lignes, des plans ou des cylindres, en utilisant un nuage de points ou un maillage polygonal comme 'guide' (voir figure 5d, p. 12). Les primitives peuvent également n'être constituées que de volumes fermés, par exemple, générés par extrusion. Dans ce cas, on parle de modèle solide. Une telle approche engendre des modèles plus sobres au niveau esthétique et plus légers, mais occasionne la perte d'une grande partie des détails de surface. Dans sa forme la plus aboutie, la démarche de modélisation vise à créer des 'objets paramétriques' auxquels des propriétés peuvent être associées. Il s'agit de la base de la création d'une *Building Information Model* (voir chapitre 6, p. 41).

Au-delà du type de représentation 3D, le format utilisé est crucial. Citons tout d'abord les formats dits 'constructeurs' ou 'propriétaires', propres à certains logiciels commerciaux. L'utilisation de tels formats est déconseillée lorsque le modèle 3D doit être utilisé par plusieurs personnes en raison d'un risque d'incompatibilité (les collaborateurs n'ont pas la même version du logiciel, p. ex.) ou d'inusabilité (un des collaborateurs ne dispose pas de la licence du logiciel). La transformation d'un format propriétaire en format ouvert (\*.las pour un nuage de points ou \*.stl pour un maillage, p. ex.) 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 commercial associé au format propriétaire. Il revient donc à l'acteur bénéficiant de la licence commerciale de 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.

### 2.1.2 SITUER LE MODÈLE DANS L'ESPACE

Chaque point définissant un nuage de points est référencé dans l'espace par trois coordonnées géométriques : X, Y, et Z. Ces dernières expriment la distance par rapport à une origine (ou point o,o,o) selon trois directions perpendiculaires ou 'axes'. Chaque nuage de points est donc donné dans un référentiel initial qui dépend de la définition de l'origine, de l'orientation des axes et de l'unité de distance choisie. De plus, toute manipulation du nuage (translation, rotation ou mise à l'échelle) se concrétisera par une modification des coordonnées de tous ses points. A l'inverse, on peut appliquer des fonctions mathématiques sur l'ensemble des points du modèle qui produiront certaines transformations géométriques spécifiques.

## 2. Vue générale sur les techniques de relevé HD



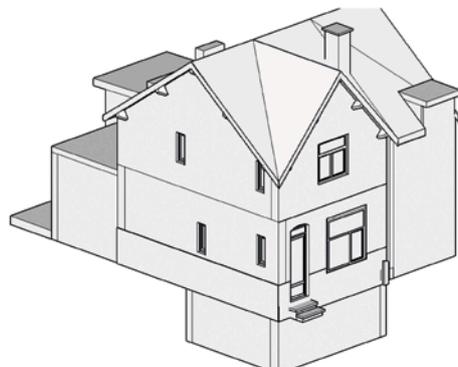
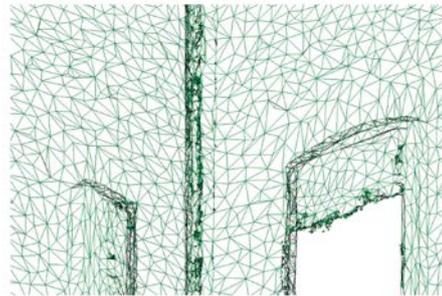
A. Nuage de points de haute résolution avec information RGB



B. Modèle surfacique texturé



C. Modèle filaire



D. Modèle solide issu d'une modélisation paramétrique

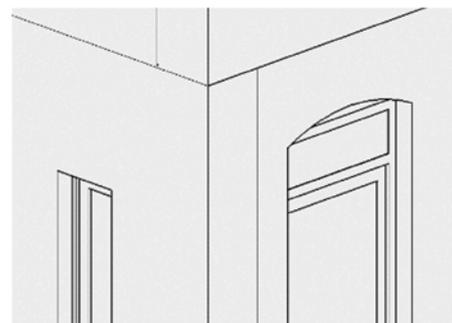


Fig. 5 Quelques types de modèle (source des images : CSTC / source du modèle : De Ceuster).

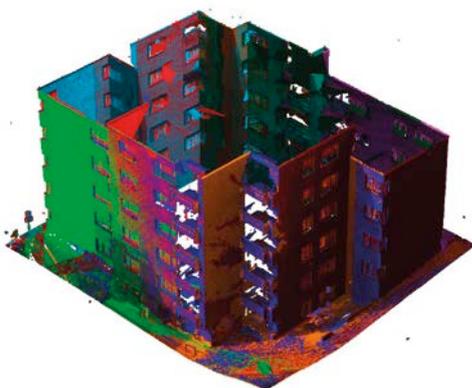
On parle de 'géoréférencement' lorsque les nuages de points sont donnés par rapport à un référentiel terrestre (le référentiel 'absolu'). Chaque point est alors décrit par une latitude, une longitude et une altitude. Une technologie GPS est dans ce cas évidemment requise en plus de l'appareil de scanning. Inversement, certaines technologies de relevé HD produisent des modèles 3D bruts qui ne sont ni correctement référencés dans l'espace (l'origine et l'orientation du modèle sont 'arbitraires'), ni à la bonne échelle. L'opérateur devra alors utiliser des méthodes de transformation géométrique en post-traitement s'il veut effectuer des mesures dimensionnelles correctes à partir du modèle.

La situation se complique si plusieurs relevés sont effectués sur un même objet avec une technologie qui ne propose pas de géoréférencement direct. On obtiendra alors plusieurs nuages de points, représentant plusieurs vues (les différentes façades d'un bâtiment, p. ex.), mais orientées chacune de manière arbitraire dans l'espace. Le géomètre devra réorienter chacun de ces nuages les uns par rapport aux autres. En d'autres termes, il devra leur assigner un référentiel spatial commun. On parle dans ce cas de 'calage des modèles' ou de 'consolidation'. La stratégie la plus répandue pour effectuer cette opération est de lever des points de référence 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 (voir figure 6b). La consolidation peut aussi être réalisée sur la base de zones de recouvrement entre les différents nuages. Il y a donc lieu de s'assurer d'un recouvrement suffisant. La fiabilité du calage dépendra de la robustesse des algorithmes utilisés.

### 2.1.3 ATTRIBUER UNE SIGNIFICATION AU MODÈLE

Les points géométriques constituant un nuage ou les triangles formant un maillage ne possèdent intrinsèquement aucune information sémantique. En d'autres termes, ils ne sont pas 'groupés' selon certains attributs (orientation, élévation, identité, ...). Il revient à l'opérateur de regrouper les points/triangles appartenant, par exemple, à un même élément architectural (mur, colonne, châssis, ...) pour leur assigner cet attribut d'appartenance. Il s'agit du processus de 'segmentation'. Si la segmentation manuelle est longue et pointilleuse, elle constitue toutefois une étape bien souvent inévitable. Les solutions semi-automatiques ou automatiques sont encore rares (voir figure 7, p. 14).

Plus loin dans le post-traitement, on pourra s'appuyer sur des groupements de points (ou de triangles dans le cas d'un maillage polygonal) pour dessiner des 'objets paramétriques'. On pense, par exemple, à la modélisation d'une colonne à l'aide d'un cylindre où, en plus des paramètres géométriques permettant de générer sa forme, l'utilisateur pourra encoder une série de paramètres tels que le matériau, la date de construction, ... On entre alors dans un processus BIM (voir chapitre 6, p. 41) et on peut parler de modélisation sémantique (voir figure 8, p. 14).



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

Fig. 6 Calage de nuages de points issus de scans laser (source des images : CSTC / source du modèle : De Ceuster).

## 2. Vue générale sur les techniques de relevé HD

### 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 en un autre ou d'un format en un autre. Une opération très courante est la transformation d'un modèle 3D en dessin CAO 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, à partir de laquelle on dessinera un plan d'étage en 2D. On peut aussi réaliser un dessin d'élévation sur la base d'une projection du nuage de points sur un plan. L'information 3D n'est d'ailleurs pas toujours complètement perdue lors d'un passage de nature 3D vers 2D.

On peut donc différencier :

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

Les transformations du modèle 3D sont essentielles. Elles permettent d'isoler les informations nécessaires à partir d'un scan brut. Le paragraphe 5.2 (p. 34) aborde ces possibilités en détail.

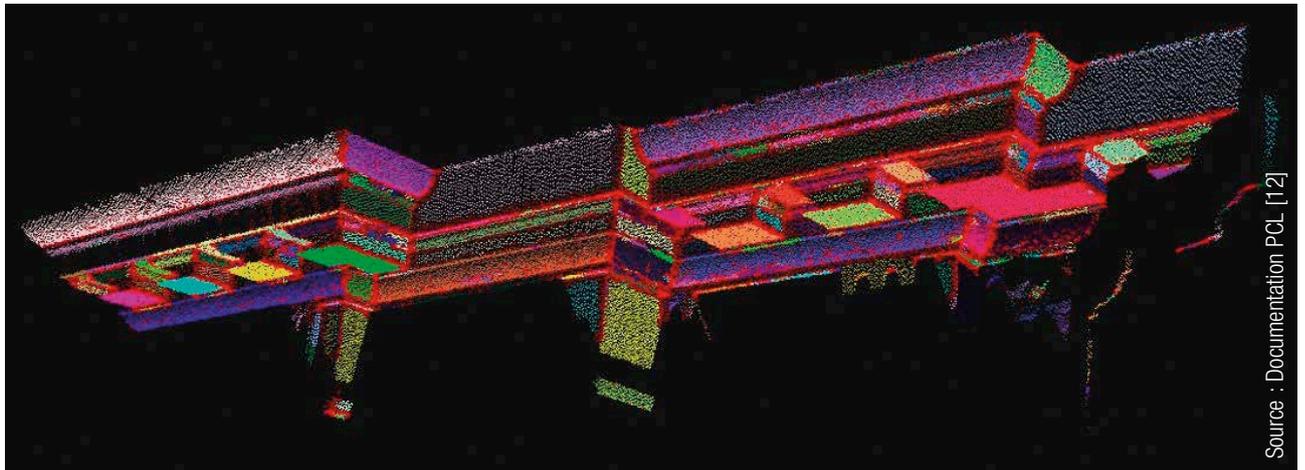


Fig. 7 Segmentation d'un nuage de points sur base d'un algorithme.

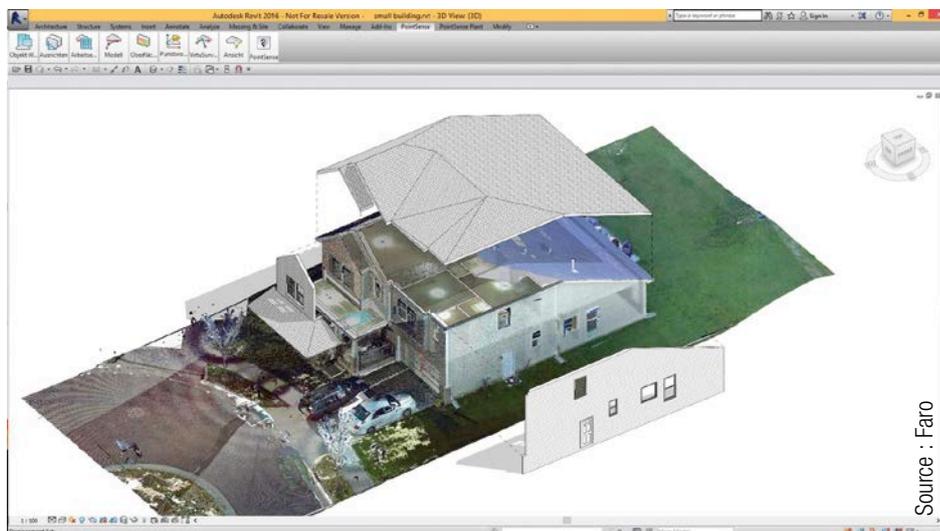


Fig. 8 Modélisation sémantique d'un nuage de points en objets paramétriques dans un workflow BIM.

## 2.2 TECHNIQUES D'ACQUISITION 3D

La figure 9 reprend les méthodes de numérisation 3D sans contact utilisant le spectre lumineux applicables dans le domaine de la construction. On peut tout d'abord distinguer les méthodes basées sur la triangulation, celles basées sur un décalage temporel (analyse du temps de vol d'un signal ou décalage de phase entre émission et réception de ce dernier) et celles basées sur l'analyse d'images successives sans triangulation. Il s'agit d'une possibilité de classement bien que d'autres soient possibles : par exemple, différencier 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 (méthodes de photogrammétrie, p. ex.).

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. La méthode la plus adaptée sera différente pour chacun de ces besoins.

Le tableau 1 (p. 16) 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 si on vise à numériser l'ensemble 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 sur site à l'échelle du bâtiment entier, à savoir le balayage laser et la photogrammétrie rapprochée. Les autres méthodes seront abordées de manière synthétique au § 2.2.4 (p. 22).

### 2.2.1 BALAYAGE LASER (LASERGRAMMÉTRIE)

Le terme de balayage laser reprend divers principes de mesure, mais tous se basent 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 éléments solides en premier plan créent donc des 'zones d'ombre' en arrière-plan et les objets s'y trouvant ne peuvent être transcrits géométriquement. Un objet doit, par conséquent, souvent être relevé à partir de plusieurs positions, afin de limiter au maximum ce type de zones invisibles.

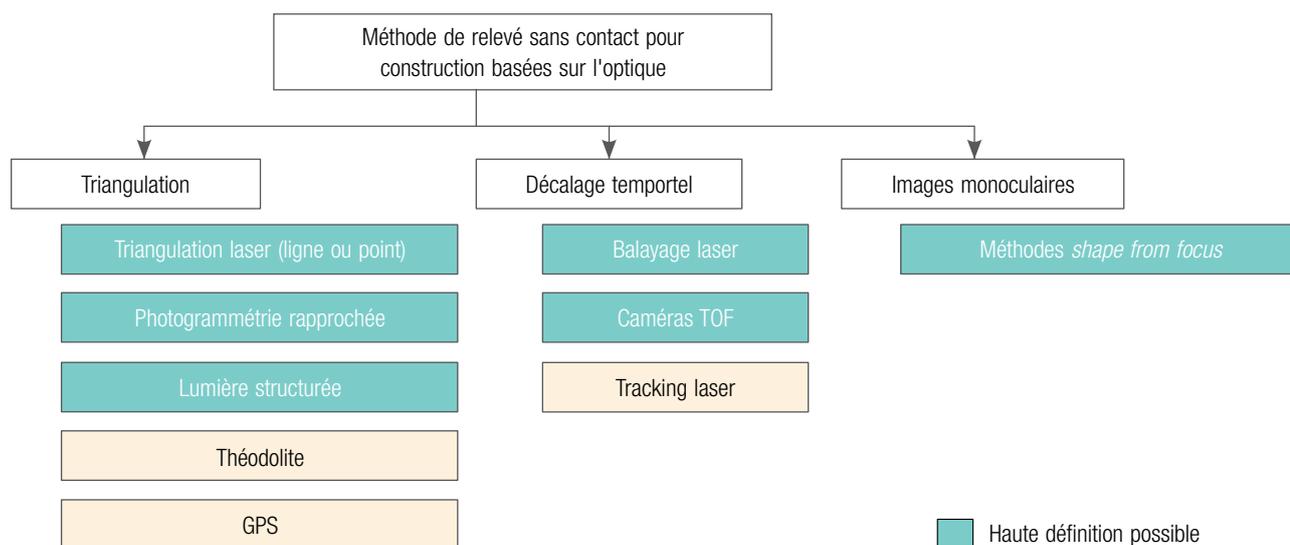


Fig. 9 Les techniques d'acquisition 3D sans contact basées sur le spectre lumineux et adaptées au domaine de la construction (TOF = *time of flight*).

## 2. Vue générale sur les techniques de relevé HD

**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. Les cases en vert correspondent au domaine traité plus en détail dans ce document.

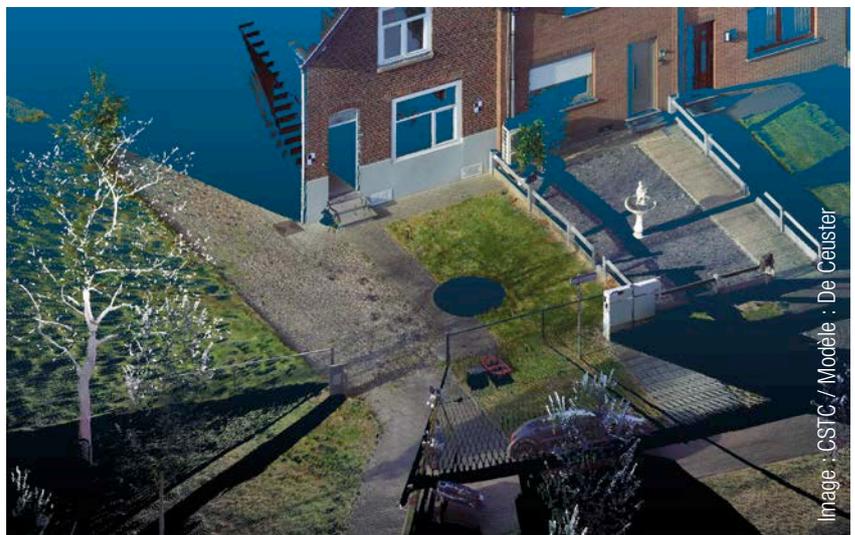
	Extérieur (sur site)	Intérieur (sur site)	Environnement contrôlé (laboratoire ou atelier)
Échelle $\gt 1$ m	(façade, terrain, ...) <ul style="list-style-type: none"> <li>balayage laser (voir § 2.2.1)</li> <li>photogrammétrie rapprochée : RPCI (voir § 2.2.2)</li> </ul>	(salle, p. ex.) <ul style="list-style-type: none"> <li>balayage laser (voir § 2.2.1)</li> <li>photogrammétrie rapprochée : RPCI(*) (voir § 2.2.2)</li> </ul>	(élément de façade préfabriqué, p. ex.) <ul style="list-style-type: none"> <li>balayage laser</li> <li>photogrammétrie rapprochée : RPCI</li> <li>caméras TOF</li> </ul>
Échelle 0,1-1 m	(détail architectural extérieur, p. ex.) <ul style="list-style-type: none"> <li>balayage laser (voir § 2.2.1)</li> <li>photogrammétrie rapprochée : RPCI (voir § 2.2.2)</li> </ul>	(détail architectural intérieur, p. ex.) <ul style="list-style-type: none"> <li>balayage laser (voir § 2.2.1)</li> <li>photogrammétrie rapprochée : RPCI (voir § 2.2.2)</li> <li>caméras TOF (voir § 2.2.4)</li> </ul>	(bloc de matériau analysé en labo, petit élément industriel préfabriqué, ...) <ul style="list-style-type: none"> <li>balayage laser</li> <li>photogrammétrie rapprochée : RPCI</li> <li>lumière structurée</li> <li>caméras TOF</li> </ul>
Échelle $\lt 0,1$ m	(texture d'une pierre de parement analysée sur site, p. ex.) <ul style="list-style-type: none"> <li>photogrammétrie rapprochée : RPCI</li> </ul>	(texture d'un enduit, p. ex.) <ul style="list-style-type: none"> <li>photogrammétrie rapprochée : RPCI</li> </ul>	(microstructure d'une pierre de parement prélevée sur site, p. ex.) <ul style="list-style-type: none"> <li>photogrammétrie rapprochée : RPCI</li> <li><i>shape from focus</i></li> </ul>

(\*) 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.

Un scanner laser peut enregistrer un grand nombre de points par seconde. Chacun d'eux est au moins défini par :

- ses coordonnées spatiales (X, Y, Z)
- une valeur d'intensité qui représente la magnitude de l'impulsion laser renvoyée par la surface de l'objet. Le nuage de points est donc colorisé en fonction de l'absorption du signal par les matériaux. A titre d'exemple, un mur blanc absorbera davantage le faisceau laser que le feuillage d'un arbre.

Les instruments susceptibles d'être utilisés pour l'étude de bâtiments sont les scanners statiques dits 'scanners lasers terrestres' (*terrestrial laser scanners* (TLS)). Ils sont généralement montés sur un trépied et balayent leur environnement par rotation (voir figure 11a, p. 17). Selon le principe de mesure, deux catégories d'appareils existent : les systèmes par temps de vol et ceux par analyse de phase. Les principales différences de propriétés sont présentées au tableau 2 (p. 18).



**Fig. 10** Les scanners laser sont des instruments à 'ligne de vue' : les objets en premier plan créent des ombres dans le nuage de point.

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 finale de points résulte de la définition du pas angulaire de balayage. Notons que le plus petit pas angulaire réalisable détermine la résolution angulaire du scanner. A titre d'indication pour l'utilisateur, l'appareil peut parfois exprimer la résultante finale en termes d'écart de point à point à une distance donnée (2 mm/10 m indique une distance de 2 mm entre deux points lorsque l'appareil est installé à 10 m de l'objet à mesurer, p. ex.). Un exemple d'interface utilisateur permettant de paramétrer la résolution désirée est donné à la figure 11b (p. 17).

## 2. Vue générale sur les techniques de relevé HD

Un nuage de points issu d'un TLS peut atteindre au final une résolution millimétrique. Cependant, le principe de mesure, sous la forme d'une 'grille' de points, nécessite des extrapolations géométriques pour représenter les 'arêtes' d'un élément architectural, qui ne sont pas immédiatement détectables (voir figure 12). En outre, plus la surface scannée est loin de l'émetteur laser et oblique à son faisceau, plus les points mesurés sur cette 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 successives de scannage<sup>(2)</sup>. 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).

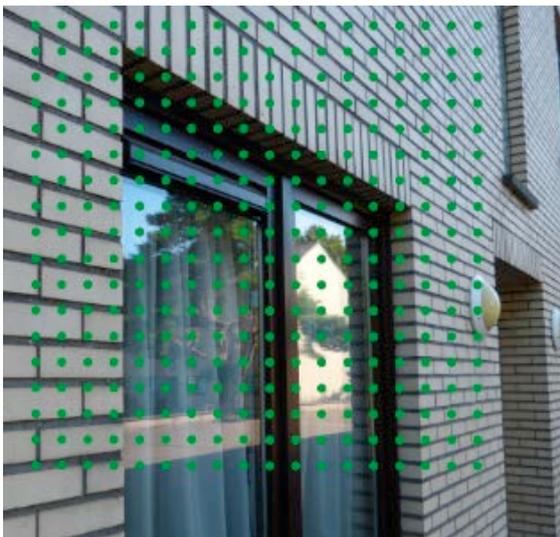


A. Appareil sur son trépied

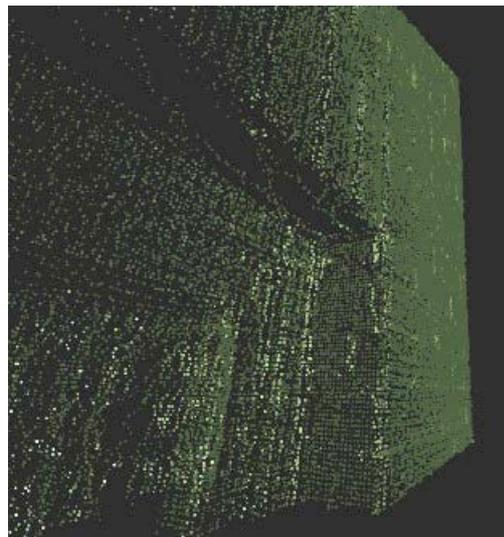


B. Menu de paramétrage

Fig. 11 Scanner laser.



A. Principe de mesure



B. Données brutes

Fig. 12 Les arêtes d'un objet ne sont pas immédiatement détectables avec un scanner laser (source des images : CSTC / source du modèle : De Ceuster).

(2) Ce qui garantit en outre l'absence de zones d'ombres.

## 2. Vue générale sur les techniques de relevé HD

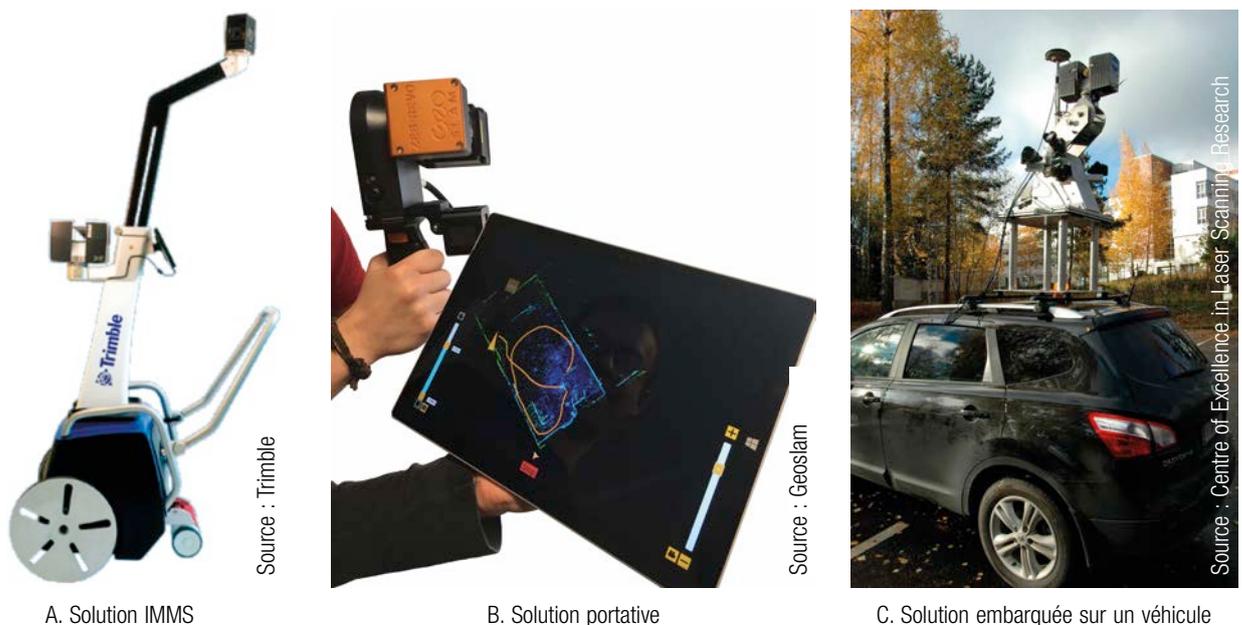
Dans certains cas spécifiques, on pourra également utiliser des scanners mobiles de type IMMS (*indoor mobile mapping systems*, voir figure 13a). Ceux-ci sont généralement montés sur une plateforme à roulettes déplaçable en continu par l'utilisateur, pouvant ainsi parcourir les espaces intérieurs d'un bâtiment. De grands espaces peuvent donc être scannés rapidement, jusqu'à 5000 m<sup>2</sup> au sol par heure. L'appareil est équipé d'un système permettant de corriger la mesure selon son déplacement. À l'heure actuelle, de tels systèmes sont toutefois nettement moins précis que les solutions statiques; on peut espérer une précision de l'ordre du centimètre [L1]. Il existe aussi des solutions portatives transportées par l'utilisateur (voir figure 13b), 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 (voir figure 13c). 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 très volumineux et lourds, ce qui proscrit leur utilisation embarquée sur de petits véhicules (drones, p. ex.).

**Tableau 2** Caractéristiques des scanners laser terrestres. D'autres caractéristiques peuvent être évaluées à partir des bases de données de produits<sup>(3)</sup>. Source : [J1]

	Temps de vol	Déphasage
Fréquence d'acquisition	10.000 – 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

### 2.2.2 RECONSTRUCTION PHOTOGRAMMÉTRIQUE PAR CORRÉLATION D'IMAGES (RPCI)

La photogrammétrie est apparue au cours de la deuxième moitié du XIX<sup>e</sup> siècle, juste après l'invention de la photographie. À l'origine, on effectuait des mesures manuelles à partir de deux images en s'appuyant sur le principe de la stéréoscopie permettant à l'être humain de juger du relief de son environnement. L'avènement des caméras numériques, l'évolution de leurs spécifications techniques et le développement de logiciels spécialisés ont nettement amélioré les possibilités et le champ d'études de la photogrammétrie. 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 et accessibles au plus grand nombre [J1].



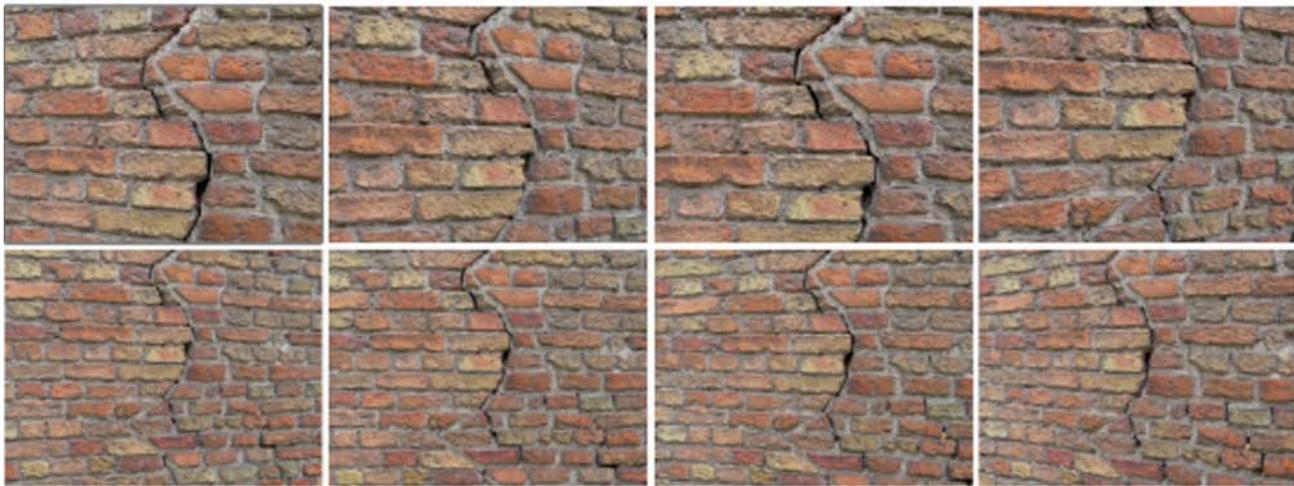
**Fig. 13** Plateformes mobiles pour le scanning laser.

(3) Voir [www.geo-matching.com/category/id46-terrestrial-laser-scanners.html](http://www.geo-matching.com/category/id46-terrestrial-laser-scanners.html)

Ce document ne fait référence qu'à la photogrammétrie rapprochée, c'est-à-dire à l'utilisation de photographies avec une distance objet-caméra inférieure à 300 mètres. Plus spécifiquement, on s'intéressera à une méthode très récente de reconstruction en 3D par mise en corrélation d'un grand nombre d'images. Certains désignent cette technique par le terme 'photogrammétrie multi-images', ou plus simplement encore par le terme 'photogrammétrie 3D'.

### 2.2.2.1 Principe

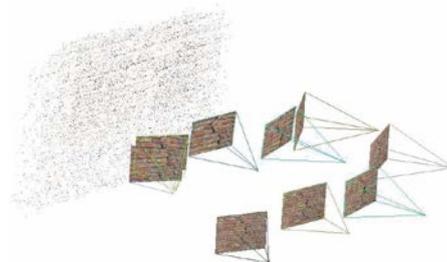
Comme son nom l'indique, la technique est basée sur l'exploitation automatique de plusieurs images (voir figure 14). On reconstruit la forme tridimensionnelle d'un objet au départ de projections bidimensionnelles de ce dernier : des photographies sous différents points de vue. Un récent logiciel de reconstruction photogrammétrique par corrélation d'images (RPCI) permet d'obtenir une reconstruction 3D détaillée, pouvant 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').



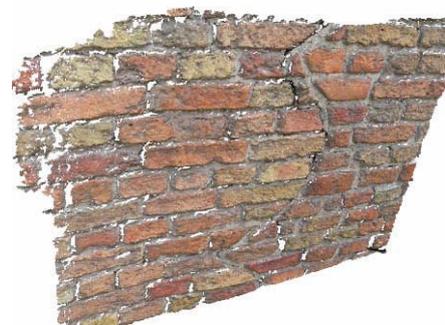
A. Sélection d'un ensemble de photographies d'un même objet



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

Fig. 14 Principe de la reconstruction photogrammétrique par corrélation d'images (source : CSTC).

## 2. Vue générale sur les techniques de relevé HD

Le logiciel de RPCI détermine tout d'abord les 'points de liaisons' ou 'points homologues' entre les différentes vues de l'objet (voir figure 14b, p. 19). Il s'agit d'une même zone de l'objet (un coin de brique, p. ex.) ayant 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 au final 'd'orienter' l'objet dans l'espace. Avec les avancées dans le domaine de la vision par ordinateur, des techniques de détection automatique des points homologues (algorithme SIFT (*scale invariant feature transform*), voir figure 15) sont récemment apparues et ont fortement enrichi les approches de photogrammétrie classiques. Elles permettent au logiciel de corrélérer de nombreuses images de manière automatique, là où les points de correspondance devaient être définis manuellement par le passé.

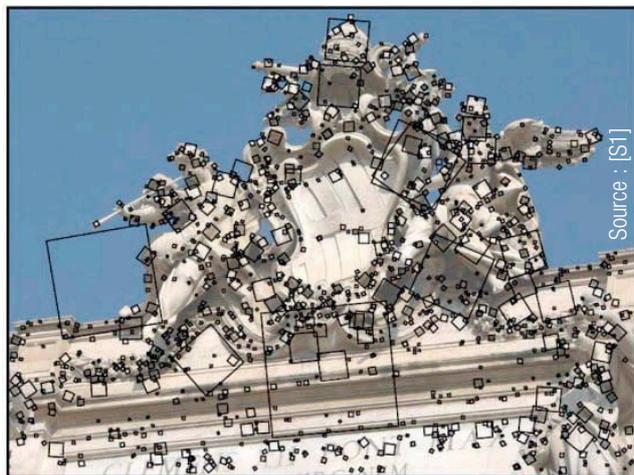


Fig. 15 Détermination automatique de descripteurs sur l'image par l'algorithme SIFT. Ces zones seront appariées sur les différentes photos afin de déterminer la géométrie tridimensionnelle de l'objet.

Il est possible de retrouver les paramètres de prise de vue (paramètres optiques de l'appareil photo et localisations des prises de vue) sur la base des positions des points homologues référencés sur les différentes images. Les photographies sont alors 'orientées' dans l'espace. Ce premier processus d'optimisation est appelé SFM (*structure from motion*). Il produit également un nuage de points de faible densité qui délimite sommairement l'objet photographié.

Un deuxième processus d'optimisation permet d'affiner le nuage de points à partir des images orientées et de produire une reconstruction beaucoup plus complète de l'objet, en se basant sur la calibration des caméras déterminée lors de la phase SFM. Cette deuxième phase est qualifiée de reconstruction dense (ou *dense image matching*). 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 (voir figure 16).

Des nuages de points précis et à densité très élevée peuvent donc être créés à partir d'un nombre important de photos (jusqu'à plusieurs centaines d'images traitées). Les logiciels modernes fournissent un degré élevé d'automatisation et l'utilisateur ne doit pas disposer 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.

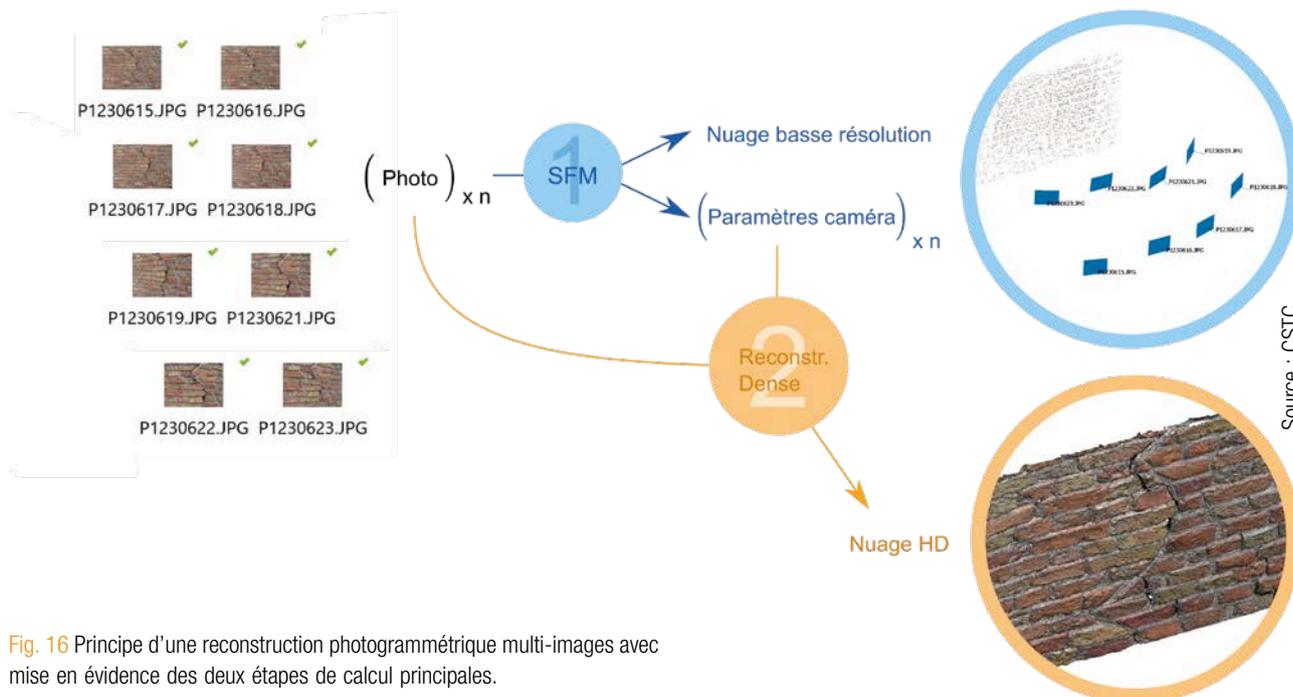


Fig. 16 Principe d'une reconstruction photogrammétrique multi-images avec mise en évidence des deux étapes de calcul principales.

### 2.2.2.2 Logiciels

La méthode de reconstruction par corrélation d'images 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 convient de distinguer les trois grands types de solutions :

#### 1) Les applications web ou mobiles simplifiées

Il s'agit de solutions simples réalisant les calculs par *cloud computing* et limitant les options pour l'utilisateur. Beaucoup ont découvert la technologie de reconstruction multi-images au moyen de l'outil web *Autodesk 123D Catch*, qui produisait des maillages texturés et était souvent référencé dans le monde de l'impression 3D. Aujourd'hui fermée, *Microsoft Photosynth* est un autre exemple d'interface web développée par Microsoft. La tendance actuelle semble être au transfert de ces outils web simplifiés vers des applications pour smartphone/tablette ou à leur intégration dans d'autres logiciels aux fonctionnalités plus larges.

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

#### 2) Les logiciels gratuits et open sources

Bien sûr, cette deuxième famille d'outils semble 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 bonne connaissance des algorithmes et des théories sous-jacentes est souvent requise).

Développé par C. Wu en 2012 pour des usages non commerciaux, le logiciel gratuit *VisualSFM* a été un des premiers à permettre l'utilisation du processeur graphique de l'ordinateur pour accélérer le calcul photogrammétrique. L'outil est relativement facile à utiliser et hautement interopérable, mais nécessite un bon niveau de maîtrise théorique afin d'obtenir des reconstructions optimales. Un exemple d'*open source* est *MicMac*, un groupement d'outils qui permet l'appariement des images (*TAPIOCA*), l'orientation (*TAPAS*) et la reconstruction dense (*C3DC*). Son utilisation est cependant rendue complexe par l'absence d'interface utilisateur.

#### 3) Les logiciels commerciaux

Dernier type d'outils, les solutions commerciales fournissent en général les meilleurs résultats en termes de reconstruction 3D, mais nécessitent un investissement financier pouvant être important. Parmi les logiciels commerciaux à l'état de l'art, on peut mentionner *Agisoft Photoscan*, *Pix4D Mapper*, *Bentley Context Capture* ou, plus récemment, *RealityCapture*.

Certains paramètres importants sont à prendre en compte lors du choix d'un logiciel :

- prix de la licence d'utilisation permanente (± 150 € – ±10.000 €)
- limites imposées aux fichiers d'entrée (nombre et taille des photos, ...)
- vitesse de calcul pour les différentes étapes de reconstruction et utilisation optimale des ressources de calcul disponibles (multiprocesseurs, multi-GPU, ...)
- possibilité d'utiliser des points de référence 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 polygonaux, ...)
- qualité du traitement des éléments potentiellement problématiques sur les images (surfaces unies, réfléchissantes, transparentes, ...)
- qualité du processus de texturage des modèles
- ...

### 2.2.3 RECONSTRUCTION PHOTOGRAMMÉTRIQUE FACE AU SCANNER LASER

Il est intéressant de comparer les deux méthodes les plus courantes pour le relevé HD 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.

## 2. Vue générale sur les techniques de relevé HD

La méthode RPCI est actuellement caractérisée par des limitations techniques importantes. L'imprévisibilité de la qualité finale de restitution constitue son principal défaut. En effet, cette dernière dépend de nombreux facteurs, parfois non maîtrisables (voir tableau 3). Une bonne retranscription de l'existant par photogrammétrie requiert une préparation sérieuse de la mission de prises de vues sur terrain et nécessite une absence de surfaces problématiques sur l'objet étudié. A titre d'exemple, la numérisation d'un mur intérieur blanc sera difficile. 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 ressources informatiques. Le tri des photos à utiliser pour la reconstruction est donc une étape cruciale; il faudra pouvoir supprimer les photos redondantes ou de qualité insuffisante, afin de garantir un temps de calcul et un résultat satisfaisants. Le masquage de certains éléments indésirables sur les photos (le ciel, p. ex.) peut également réduire le temps de calcul et améliorer la restitution. Après le calcul, si le géomètre réalise que certaines photographies supplémentaires sont nécessaires afin de garantir une bonne reconstruction, il devra réeffectuer une séance de prises de vues. Imaginons que les conditions de lumière soient alors différentes, l'ensemble de la série photographique pourrait devoir être réalisé à nouveau. On le devine, cet aspect peut être très contraignant quand un résultat est attendu rapidement.

Le coût matériel initial de la méthode RCPI est souvent attractif par rapport à celui du scanner laser. En outre, lorsqu'il est question d'embarquer un appareil de relevé, éventuellement très compact, sur un vecteur mobile, terrestre ou aérien, les technologies photographiques apparaissent souvent comme une solution idéale. Cette technique est aujourd'hui largement associée aux vols par drone permettant, par exemple, d'accéder à des zones difficilement atteignables avec un scanner laser (toitures, p. ex.). C'est également la technique à préconiser lorsque l'on doit relever un très grand site pour lequel le relevé laser serait long, lourd à mettre en place et au final assez coûteux. La compacité et la transportabilité des capteurs photographiques élargissent le champ d'application des possibilités de reconstruction 3D. La méthode RPCI offre également une qualité texturale très élevée et la restitution de l'apparence visuelle à partir de photographies haute résolution est beaucoup plus réaliste qu'avec les scanners laser actuels [D1].

L'avantage principal de la méthode lasergrammétrique est la possibilité d'obtenir une grande quantité d'informations tridimensionnelles, de manière directe, précise et sans nécessiter de compétences avancées pour l'acquisition<sup>(4)</sup> [D1]. 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. Le tableau 4 (p. 23) compare le RCPI au balayage laser selon un ensemble de critères pertinents pour les études relatives à la construction.

### 2.2.4 AUTRES MÉTHODES

Outre les méthodes de balayage laser et de reconstruction par corrélation d'images, il existe d'autres technologies de numérisation 3D pouvant appuyer l'étude d'un bâtiment ou de ses composants à des échelles très diverses, comme indiqué dans le tableau 1 (p. 16) (technologies pouvant être déployées en atelier afin de vérifier un processus de fabrication automatisé (contrôle dimensionnel), p. ex.).

Mentionnons tout d'abord les techniques de lumière structurée, à savoir une méthode de triangulation active à partir d'une projection d'un motif bidimensionnel sur la surface de l'objet étudié associée à une caméra (voir figure 17a, p. 22). Le motif, qui présente un ensemble de lignes, de points ou de carrés, se déforme à la rencontre de l'objet, ce qui permet au capteur

Tableau 3 Facteurs pouvant nuire à la précision du nuage de points avec la méthode de reconstruction photogrammétrique par corrélation d'images.

Au niveau de l'objet et du lieu étudiés	Au niveau de la caméra et des photographies
<ul style="list-style-type: none"><li>• peu de recul possible</li><li>• surfaces réfléchissantes</li><li>• surfaces transparentes</li><li>• textures uniformes</li><li>• sources de lumière en mouvement et ombres</li><li>• objets en mouvement sur la scène étudiée</li><li>• rayonnement direct du soleil</li><li>• ...</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• faible résolution du capteur photographique</li><li>• artéfacts (poussière sur l'objectif, halos lumineux, ...)</li><li>• bruit (ISO trop élevé, flou de mouvement, ...)</li><li>• effets indésirables d'un obturateur déroulant (<i>rolling shutter</i>)</li><li>• profondeur de champ trop faible</li><li>• 'chevauchement' insuffisant entre les photos</li><li>• nombre insuffisant de points de vue</li><li>• ...</li></ul>

(4) Si l'on ne prend pas en compte le relevé de points de contrôle à la station totale.

optique de relever l'information de profondeur. Les méthodes de triangulation par ligne laser peuvent également convenir à des applications similaires, c.-à-d. la numérisation d'objets relativement petits en environnement contrôlé (contrôle de la qualité, p. ex.). Cette technologie est très répandue et se base sur la production d'une ligne laser (source laser orientée vers une lentille cylindrique) parcourant l'objet et dont la déformation résultant de la rencontre avec sa surface est analysée optiquement (voir figure 17b).

Tableau 4 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 <sup>(1)</sup>
Texture 3D (microtopographie de la surface de l'objet)	Possible avec une précision très élevée	Possible avec une précision faible à élevée <sup>(1)(2)</sup>
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 (drones, p. ex.)	Non	Oui
Aptitudes requises pour l'acquisition <sup>(3)</sup>	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 <sup>(4)</sup>

(1) Peut être très élevée localement. La précision de la méthode dépend toutefois grandement de la qualité de la série de photos et de la présence de surfaces problématiques sur la façade (surfaces réfléchissantes, p. ex.).  
 (2) Au prix d'efforts importants et sans moyen de contrôle évident de la justesse des résultats.  
 (3) Sans prendre en compte les opérations liées au calage ultérieur des modèles (relevé des points de contrôle).  
 (4) Le calcul avec une solution de cloud computing peut réduire les ressources requises.



A. Lumière structurée

B. Laser linéaire monté sur un bras mécanique



Fig. 17 Scanner 3D par triangulation active pour la numérisation en environnement contrôlé.

## 2. Vue générale sur les techniques de relevé HD

Les caméras de temps de vol, ou caméras TOF (*time of flight*), constituent une autre catégorie d'appareils possédant le grand avantage d'offrir une restitution tridimensionnelle en temps réel. On parle parfois aussi de 'caméras 3D', bien qu'il faille éviter de les confondre avec certains produits grand public proposant une simple mise en relief de photographies. En effet, on s'intéresse dans ce document aux appareils produisant une véritable cartographie de profondeur basée sur une analyse impliquant plusieurs types de capteurs. Bien qu'offrant une précision moindre que les technologies de scanning laser, cette solution présente l'avantage d'obtenir rapidement une évaluation sur site (voir figure 18), à condition d'éviter les sources lumineuses trop importantes (usage proscrit en extérieur).

Une dernière méthode présentée 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*' qui permet la reconstruction tridimensionnelle par 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 (voir figure 19).



Fig. 18 Scanner 3D par caméra à temps de vol produisant une acquisition en temps réel pour les espaces intérieurs.

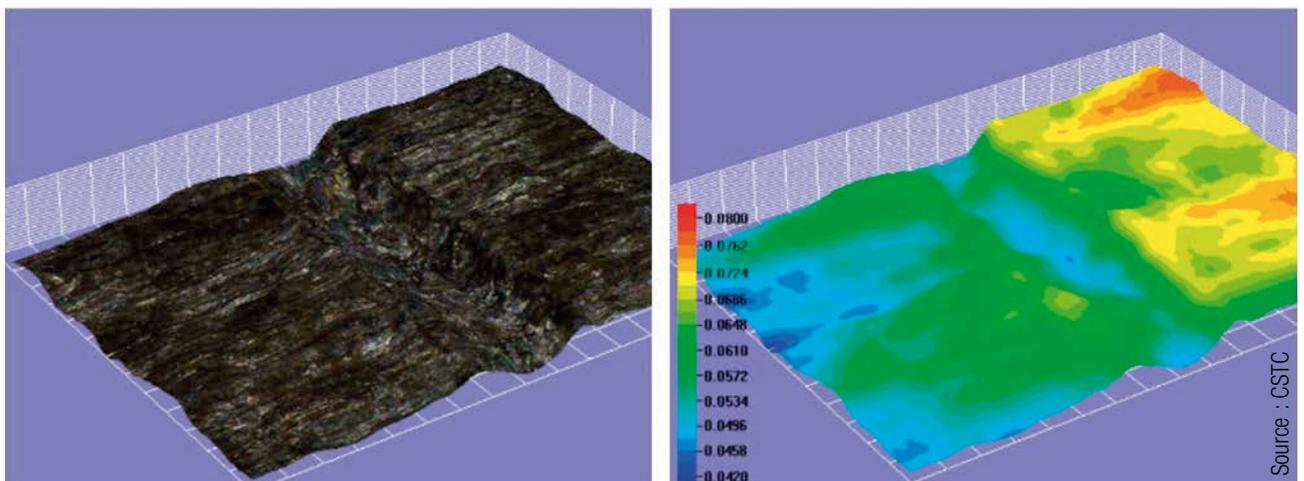


Fig. 19 Méthode *shape from focus* utilisée sur un microscope : analyse géométrique d'un échantillon prélevé sur site.

# 3. ETAPES CLÉS D'UN RELEVÉ HD SUR CHANTIER

Tout projet de relevé à haute définition devrait idéalement contenir une série d'étapes (détaillées dans les paragraphes suivants) [H1]. Les responsables de l'étude sont tenus d'analyser attentivement, à la lumière des objectifs initiaux, chacune de ces étapes afin de maximiser la satisfaction finale de l'utilisateur. La figure 20 donne une indication quant au niveau d'effort associé à chaque phase.

## 3.1 DÉFINITION DU CAHIER DES CHARGES DE L'ÉTUDE ET ATTRIBUTION DU MARCHÉ

Il s'agit d'explicitier un besoin ou un objectif sous une forme compréhensible pour les prestataires chargés de la numérisation et de la création des livrables finaux. Cette phase particulièrement critique est détaillée au chapitre 7 (p. 45). Le marché sera attribué à l'opérateur répondant le plus aux attentes du client sur la base du cahier des charges et d'éventuelles visites préliminaires sur site.

## 3.2 PLANIFICATION DE L'ÉTUDE

Le prestataire désigné pour la numérisation identifie la méthode de relevé la plus adaptée compte tenu du besoin exprimé par le client. Les spécifications des fichiers informatiques à livrer doivent être transcrites en termes techniques. Le prestataire est alors tenu d'entamer les démarches administratives 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 § 8.3, p. 48). Il est souvent nécessaire d'accrocher des cibles de calages à divers endroits du site, ce qui peut impliquer d'accéder 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 [H1]. Il convient alors d'élaborer un plan de scannage précis comprenant, entre autres, les emplacements de mesures successifs pour les différents appareils utilisés. Si on planifie une étude de reconstruction dense par photogrammétrie multi-image, il est essentiel de définir à l'avance un plan de capture photographique. En effet, le recouvrement entre les différentes photos et les angles de vue choisis joueront un rôle central dans la qualité de restitution. Des routes de passage précises doivent être établies pour les relevés au moyen d'appareils mobiles (drones ou stations IMMS en intérieur, p. ex.).

## 3.3 PHASE D'ACQUISITION SUR LE TERRAIN

La phase d'acquisition succède à la planification précise de la mesure. Il convient alors de suivre les étapes prédéfinies en gérant les éventuels obstacles identifiés au préalable. Si plusieurs personnes effectuent le relevé en même temps, il y a lieu d'éviter les interférences entre les opérateurs. En cas de météo défavorable, le prestataire doit trouver une manière de réorganiser ultérieurement les opérations, tout en s'assurant de rester en adéquation avec les autorisations obtenues pour la mission originelle.

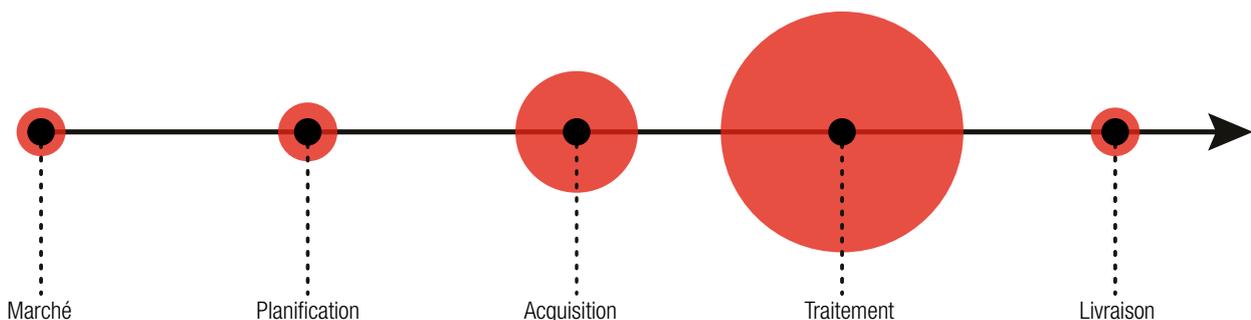


Fig. 20 Niveaux d'effort selon la phase du relevé. Source : [R1]

### 3. Etapes clés d'un relevé HD sur chantier

#### 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 diverses sous-tâches.

##### 3.4.1 PRÉTRAITEMENT

###### 3.4.1.1 Calage des différents nuages de points (voir § 2.1, p. 11)

Cette étape est généralement réalisée au moyen de logiciels spécialisés. Les fabricants de scanners lasers fournissent généralement des suites logicielles complètes permettant de réaliser de nombreuses opérations, dont le calage sur la base de points de contrôle (parfois appelés 'points d'appui'). Notons que le référencement spatial d'un scan laser est parfois directement assuré sur site, lorsque la position exacte du scanner ainsi que son orientation peuvent être définies à chaque mesure successives [D1].

Le calage de nuages issus de la photogrammétrie multi-image s'effectue à l'aide des logiciels de reconstruction. Ceux-ci permettront de nettoyer ces nuages et de les caler sur la base de points d'appui ou de recouvrements.

###### 3.4.1.2 Visualisation et nettoyage des nuages assemblés

Les opérations de base sur un modèle calé couvrent le débruitage (élimination des données aberrantes), le filtrage (suppression des éléments non pertinents pour le client), l'échantillonnage (diminution du nombre total de points par sous-échantillonnage ou rééchantillonnage<sup>(5)</sup>) ou la compression (réduction de la taille du fichier avec ou sans perte d'information) des nuages de points bruts [D1]. Ces opérations basiques peuvent être réalisées dans de nombreux logiciels, dont certains sont *open source* (*Meshlab*, *CloudCompare*, ...).

###### 3.4.1.3 Segmentation manuelle, semi-automatique ou automatique

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

##### 3.4.2 CONTRÔLE DE LA QUALITÉ

Une procédure de contrôle de la 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 toutefois possible de prévoir davantage de points de contrôle que strictement nécessaire pour le calage des différents nuages de points. Des points de contrôle surnuméraires, relevés à la station totale, permettent d'obtenir un meilleur contrôle de la justesse du modèle. Notons qu'un contrôle de la qualité sérieux est un processus qui concerne l'ensemble 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. Au vu du temps de calcul nécessaire à la reconstruction des modèles 3D à partir des photographies, de telles vérifications intermédiaires sont plus difficiles à mettre en œuvre pour les acquisitions photogrammétriques.

---

(5) Les deux opérations visent à réduire le nombre total de points. Le sous-échantillonnage consiste à conserver une partie seulement des points existant là où le rééchantillonnage recalcule une série de nouveaux points sur la base de ceux existants.

### 3.4.3 TRANSFORMATIONS DU MODÈLE ET TRAITEMENTS AVANCÉS

De nombreux traitements sont possibles à partir d'un modèle prétraité, et ce afin de satisfaire aux besoins du client. On trouve notamment :

- les transformations d'un modèle 3D de type A en modèle 3D de type B (nuage de points transformé en maillage polygonal texturé, p. ex. (voir § 2.1, p. 11))
- les modélisations complémentaires (modélisation BIM sur base d'un nuage sémantisé, p. ex.)
- les combinaisons entre modèles
- les transformations de modèles 3D en représentations 2D.

Le lecteur trouvera plus de détails sur ces traitements au § 5.2 (p. 34).

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 pouvant atteindre plusieurs dizaines de gigaoctets en cas d'acquisition à haute résolution ou 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, ce dernier peut requérir des services complémentaires de la part du prestataire (actualisation des données dans le temps ou mise en place d'une plateforme évolutive et/ou consultable à distance par plusieurs acteurs, p. ex.). De telles requêtes doivent évidemment 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 justifiées économiquement, leur utilisation est encore limitée dans le secteur du bâtiment. Pour les projets de rénovation, les responsables et entreprises générales travaillent encore souvent avec des plans et des élévations en 2D. 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 intuitivement 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. Bien sûr, les approches qui intégrant le relevé haute définition dans un processus BIM ne sont certainement pas adaptées à tout type de projet actuel. Cependant, l'utilisation du scan 3D de manière judicieuse, avec des objectifs clairs, peut se révéler particulièrement intéressante (voir chapitre 5, p. 29). Il est toutefois essentiel que les différents acteurs qui seront amenés à collaborer autour du relevé HD disposent d'une maîtrise satisfaisante des outils disponibles. Il convient de se concentrer particulièrement sur la définition correcte des cahiers des charges pour les marchés de service et sur le développement de procédures de contrôle de la qualité liées aux phases de traitement, de réception et d'utilisation des données 3D.

Au niveau industriel, l'utilisation des technologies de numérisation 3D pourrait trouver plus rapidement ses marques chez les fabricants de produits de construction de haute technicité. Ainsi, certains acteurs ont déjà compris l'intérêt d'une numérisation rapide et précise, que ce soit pour le contrôle de la 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 scan 3D.

Mentionnons que le relevé du patrimoine constitue un autre domaine précurseur dans l'utilisation des scans 3D. Compte tenu de la volonté et de la nécessité de compréhension de l'existant inhérente aux disciplines relatives aux bâtiments et aux sites historiques, de nombreux chercheurs et professionnels sont déjà familiers avec ces techniques de numérisation modernes. Le travail de relevé traditionnel pour le patrimoine est en effet long et fastidieux et la qualité des données obtenues par un relevé HD ainsi que la rapidité d'acquisition bouleversent les pratiques en place. L'apport du relevé HD 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, ...). Le projet CyARK<sup>(6)</sup> constitue un bon exemple d'une telle démarche. L'équipe en charge vise à établir une 'bibliothèque numérique' de sites du patrimoine mondial à l'aide des technologies de numérisation avancées (voir figure 21) et en mettant en avant leur force didactique.

Globalement, nous nous trouvons à un moment clé de la transition où les possibilités offertes par les technologies nouvelles exposent et où tout semble possible. Il peut toutefois paraître dur de juger de ce qui est raisonnablement réalisable, face à autant de technologies extrêmement séduisantes sur le papier, mais dont l'implémentation peut rencontrer des sérieux obstacles.

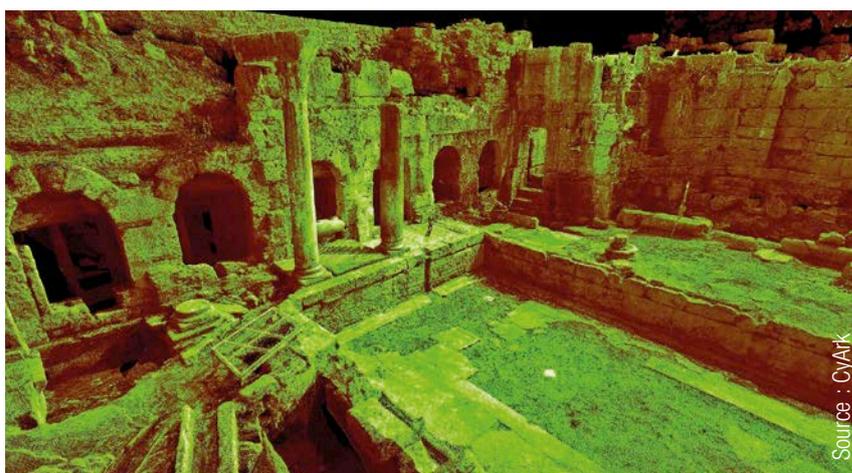


Fig. 21 Données issues d'un scan laser de la fontaine de Pirène à Corinthe.

(6) <http://www.cyark.org>

# 5. ANALYSE DES OPPORTUNITÉS

## 5.1 OBJECTIFS D'UNE ÉTUDE DE RELEVÉ HD

La numérisation haute définition du bâtiment fournit des opportunités gigantesques pour le secteur de la construction. Les architectes, entrepreneurs et bureaux d'études sont les premiers concernés, mais les gestionnaires à différents niveaux (depuis la gestion d'un bâtiment unique jusqu'aux politiques d'aménagement du territoire) peuvent également tirer profit de cette technologie. Le secteur du patrimoine n'est évidemment pas en reste, au vu des multiples applications en termes de diagnostic ou simplement d'inventaire comme indiqué précédemment.

Du point de vue de l'information délivrée, le grand avantage du scan 3D réside dans le niveau de détail géométrique inédit, pouvant traduire la microgéométrie et la couleur des surfaces scannées. Au niveau du champ d'application, l'accès à une série de lieux qu'il était difficile de mesurer auparavant constitue une évolution sensible des méthodes de relevés modernes; 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 HD en fonction du stade de vie d'un bâtiment ou d'un quartier sont donnés au tableau 5.

Plus précisément, il est possible de regrouper les utilisations des scans haute définition selon de grandes thématiques [H1].

### 5.1.1 NUMÉRISER POUR PLACER LE BÂTIMENT DANS L'ESPACE ET/OU DANS LE TEMPS

Dans ce cadre, le modèle HD sert à contextualiser l'existence du bâtiment ou d'un de ses éléments : contextualisation temporelle (situation à un moment donné) et/ou spatiale (situation dans un ensemble plus grand) pouvant précéder d'autres analyses plus poussées. On peut, par exemple, vouloir comparer la géométrie actuelle d'un bâtiment à de vieux documents d'archives. L'utilisation d'un modèle numérisé peut aussi servir de support pour présenter des aménagements futurs. Auquel cas, on touche également à une volonté de communication (voir § 5.1.4, p. 32). Enfin, le modèle HD peut permettre de développer un modèle évolutif, où des scans successifs sont planifiés dans le temps (représentation d'un bâtiment dans son environnement urbain, p. ex.). On peut également effectuer des relevés topologiques pour préparer l'installation de nouveaux projets immobiliers (voir figure 22, p. 30).

### 5.1.2 NUMÉRISER POUR COMPRENDRE UN BÂTIMENT OU UNE PARTIE DE CELUI-CI

Un modèle à haute résolution contient énormément d'information capturée en une seule fois et est consultable à souhait par la suite. L'exhaustivité des données géométriques 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, ... (voir figure 23, p. 30). Le scan 3D permet de prendre de la distance et donc d'accéder à des informations qui ne sont peut-être pas immédiatement visibles pour l'observateur sur place. Les drones sont, par exemple, de plus en plus utilisés pour le relevé de sites archéologiques (voir figure 24, p. 30).

Tableau 5 Exemples d'avantages clés d'un relevé haute définition et applications possibles selon le stade de vie du bâtiment ou du quartier concerné.

Avant une transformation	Pendant une transformation	Au cours de l'utilisation
<ul style="list-style-type: none"><li>• amélioration de la documentation disponible sur l'état existant (plans d'étages, élévations de façades, états de surface, p. ex.)</li><li>• développement d'une base de mesure géométrique pour de la production industrielle</li><li>• ...</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• contrôle du processus de transformation du bâtiment et anticipation des problèmes</li><li>• accompagnement des équipes sur chantier (installation ou désinstallation de systèmes, p. ex.)</li><li>• ...</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• amélioration de la documentation disponible sur l'état existant (systèmes, p. ex.)</li><li>• aide à la mise en place d'outils de <i>facility management</i> efficaces</li><li>• réalisation du suivi d'un élément au cours du temps</li><li>• ...</li></ul>

## 5. Analyse des opportunités



Fig 22 Modéliser une maquette topographique BIM à partir d'un relevé au scanner laser.

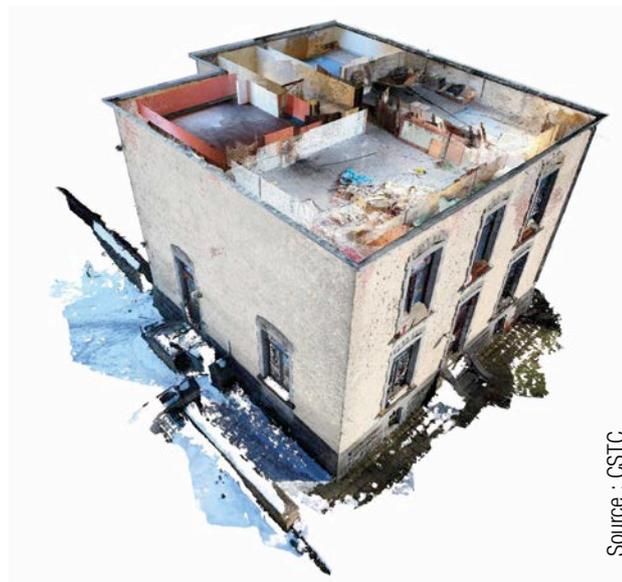


Fig. 23 La combinaison de scans intérieurs et extérieurs du bâtiment permet d'en déduire la géométrie avec un niveau de complétude inédit.



Fig. 24 Utilisation du drone pour le relevé RCPI d'un site historique.

### 5.1.3 NUMÉRISER POUR MESURER, DIAGNOSTIQUER ET ÉVALUER

Il s'agit de 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 nécessiter de multiplier les allers-retours sur site. L'expert peut également émettre différents diagnostics à partir du relevé HD : évaluation des déformations, mise en évidence de pathologies, ... (voir figure 25). L'évaluation rapide de l'avancement d'un chantier ou des dégâts matériels sur un site sinistré (voir figure 26) constitue un autre exemple type.

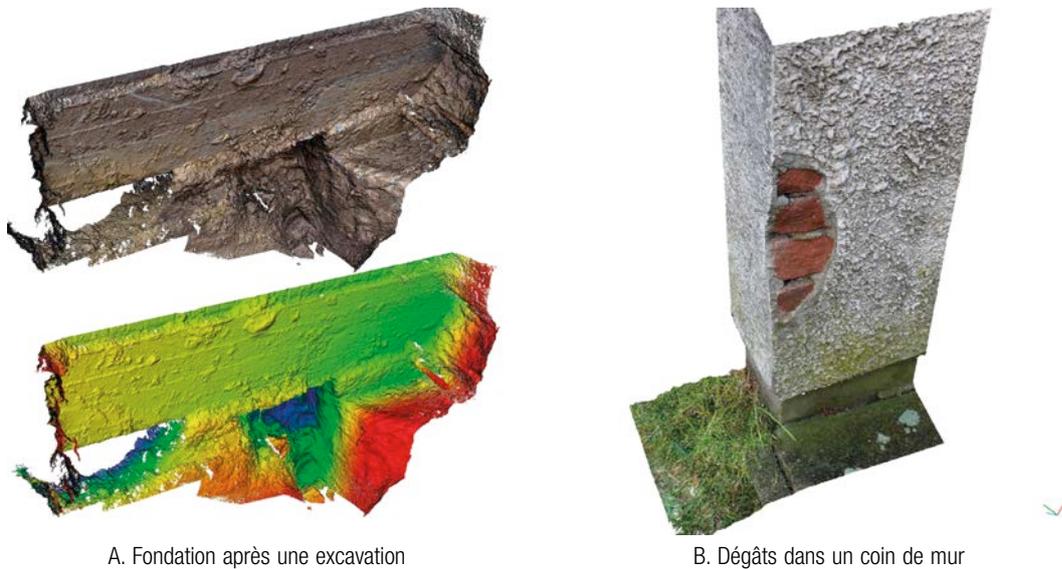


Fig. 25 Numérisation 3D d'éléments architecturaux au moyen d'une étude photogrammétrique (source : CSTC).

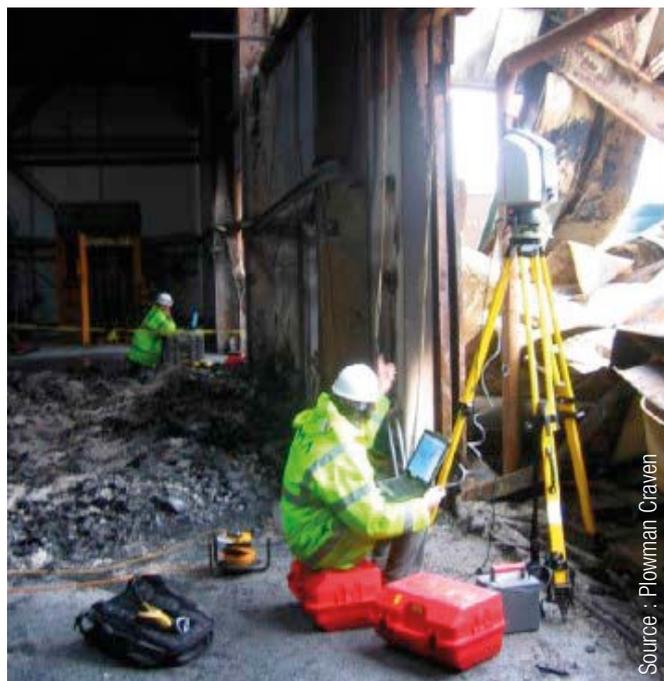


Fig. 26 Étude par scanner laser pour l'évaluation rapide de dégâts.

## 5. Analyse des opportunités

### 5.1.4 NUMÉRISER POUR COMMUNIQUER

Un scan 3D constitue une solide base pour la communication, car il permet de percevoir des informations sous une forme tridimensionnelle naturelle et observable sous de multiples points de vue dans l'espace. On retrouve de nombreuses applications des relevés HD. Là où les limites technologiques imposaient 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 éventuellement annotées (voir figures 27 et 28). On peut se servir du modèle pour produire une véritable maquette photoréaliste du bâtiment, du monument ou de l'élément architectural étudié.

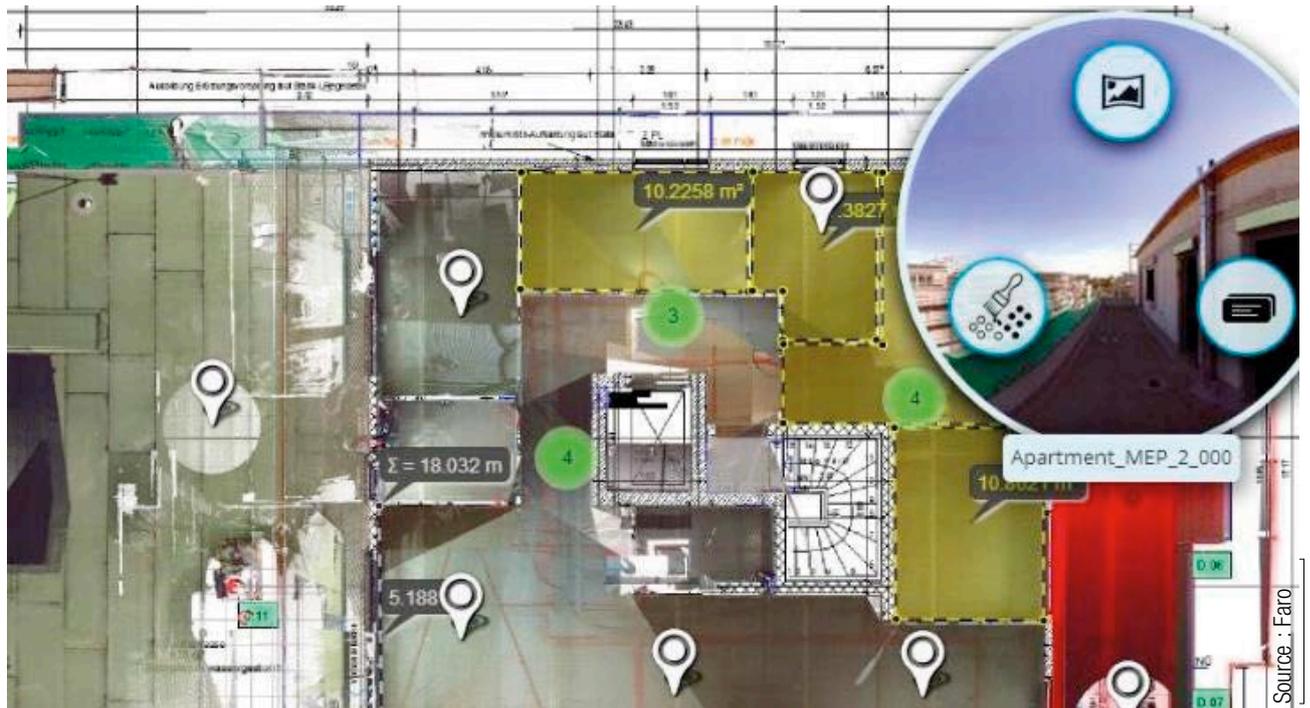


Fig. 27 Annotation d'un nuage de points dans une plateforme orientée vers la communication entre acteurs.



Fig. 28 Scan intérieur pour la mise en évidence des pathologies.

### 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 (*mechanical, electrical and plumbing*) permettant une préfabrication accrue grâce à une meilleure appréhension des espaces existants (voir figure 29).

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

### 5.1.6 NUMÉRISER POUR ADMINISTRER

Obtenir une représentation fiable d'un bâtiment ou d'un quartier 'tel qu'il est' est un résultat extrêmement précieux pour des gestionnaires (voir figure 30, p. 34). Un scan 3D permet de prendre les décisions en se basant sur une représentation complète des zones d'intérêts, et d'éventuellement mettre en évidence certains aspects non visibles sur des représentations bidimensionnelles ou lors de simples visites sur site. Les scans transformés en modèles BIM permettent de visualiser des décisions stratégiques quant à des transformations ou des réaménagements de l'existant. De tels modèles peuvent d'ailleurs également servir pour l'exploitation continue d'un bâtiment. À l'avenir, des nuages de points ou les modèles 3D qui en sont dérivés pourraient également soutenir diverses procédures administratives, comme les dépôts de permis.

### 5.1.7 NUMÉRISER POUR CONTRÔLER

Obtenir une représentation précise de l'existant permet également de contrôler certains aspects géométriques (contrôle sur chantier lors de rénovations, p. ex.). On peut ainsi facilement identifier d'éventuels défauts d'exécution et anticiper leurs conséquences. Pour des projets importants, où de telles requêtes viendront à être répétées, on peut également prévoir un processus de contrôle systématique et régulier (via une maquette BIM servant de référence, p. ex.). De même, les scans permettent également de vérifier si la documentation disponible sur l'existant est fiable (voir figure 31, p. 34). Pour les industriels, les possibilités de contrôle de la qualité sur les lignes d'assemblage constituent un dernier exemple évident.



Fig. 29 Préfabrication de systèmes HVAC sur la base d'un nuage de points.



Fig. 30 Étude à grande échelle pour la planification urbaine.

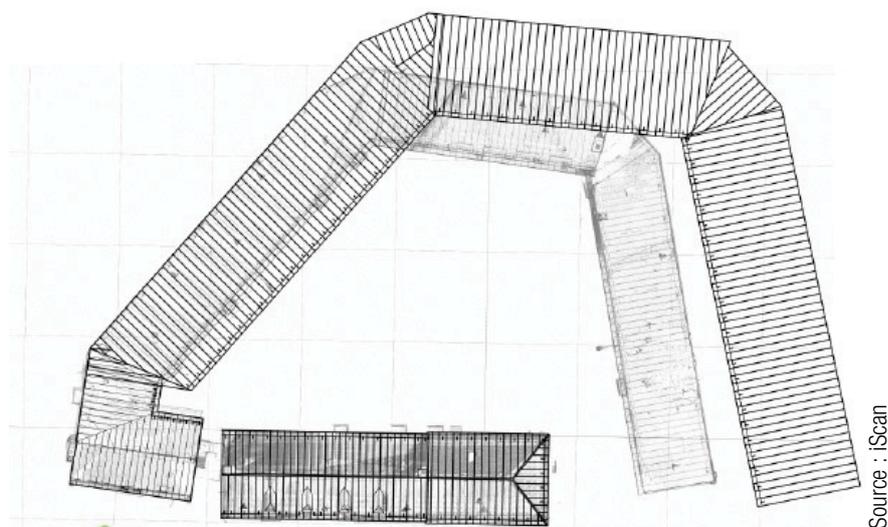


Fig. 31 Comparaison entre un tracé de toiture sur base du relevé HD et la documentation disponible.

### 5.2 MODÈLES FINAUX ET CHAÎNE DE TRAVAIL NUMÉRIQUE

On vient de le voir, il existe de nombreuses raisons de recourir à une étude de relevé géométrique à haute définition. On peut dès lors se poser la question de savoir quels sont les traitements numériques possibles, à partir du fichier brut du scan 3D (un nuage de points directement relevé ou dérivé de photographies) en vue d'atteindre les objectifs finaux d'utilisation.

On distinguera deux catégories de traitements : les traitements simples, qui rentrent dans les compétences générales des géomètres et les traitements avancés, qui expriment des besoins spécifiques pour lesquels des experts à la frontière de plusieurs domaines seront souvent requis. Un schéma synthétique en annexe illustre 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 HD en tout endroit du bâtiment. Ils se satisferont de dessins 2D créés à partir des nuages de points (élévations de façade, plans d'étages, coupes techniques, p. ex. (voir figure 32)). Pour le dessinateur, il peut également être utile de travailler à partir d'orthophotographie ou d'orthovues du nuage de points. Une orthophotographie ou ortho-image 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 [D1]. Il est souvent possible de générer de tels fichiers dans les logiciels de RPCI, ce qui est une des forces de l'approche photogrammétrique.

L'orthovue ou projection orthographique est une représentation orthogonale d'un modèle 3D. En d'autres termes, il s'agit d'un point de vue spécifique sur le modèle 3D sans effet de perspective. Contrairement aux orthophotographies, obtenues à partir de l'assemblage de photos et ayant donc une très haute résolution spatiale potentielle, la qualité visuelle des orthovues dépend fortement de la résolution du modèle sous-jacent. Quand la résolution offerte par un nuage de points est très haute (voir figure 33, p. 36), les orthovues peuvent servir comme un très bon support de dessin ou d'analyse.

Cette transformation de l'information 3D haute résolution en dessins en traits peut généralement se faire au sein des logiciels de mise en plan numérique (CAO ou 'CAD' en anglais), à condition que ces derniers permettent l'importation d'un nuage de points. On parle d'ailleurs de *scan-to-CAD*. L'intérêt principal du scan 3D 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. 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 scan-nage 3D modernes. A l'heure actuelle, on trouve déjà beaucoup d'applications où la modélisation CAO en trois dimensions apporte un plus. Le dessinateur se servira alors du nuage de points comme aide pour le dessin 3D en traits ou pour la modélisation en formes géométriques de bases (sphères, cubes, ...).

Beaucoup de fabricants de scanners laser proposent des suites logicielles ou des plug-ins pour le dessin CAO 2D ou 3D qui facilitent le processus de modélisation *scan-to-CAD* (voir figure 34, p. 36). Les fichiers CAO 3D pourront être intégrés dans un modèle BIM dans une phase ultérieure.

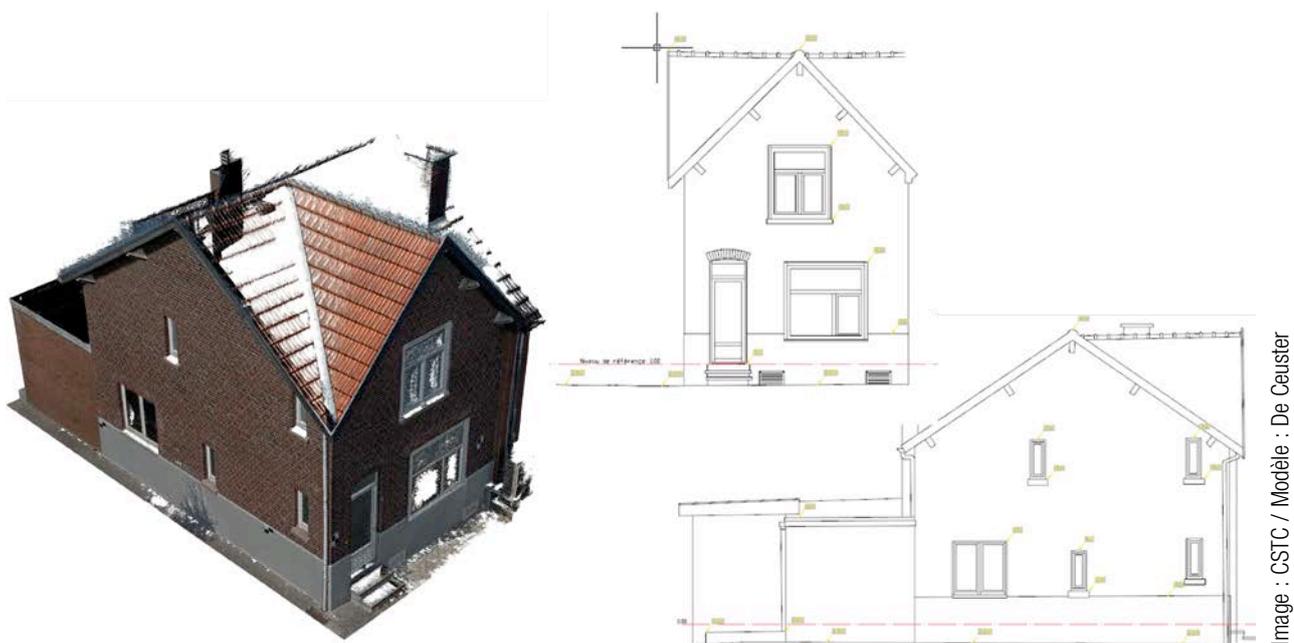


Fig. 32 Productions de dessins 2D sur base d'un relevé HD.

## 5. Analyse des opportunités

Certains acteurs n'auront besoin que du nuage de points brut ou faiblement transformé (nuage nettoyé, coloré, segmenté par groupe de points, ...). Pour des clients qui ne disposeraient pas des ressources informatiques nécessaires à la manipulation de tels fichiers (pouvant être très lourds), il existe en outre la possibilité d'héberger le nuage de points sur des serveurs informatiques. 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 (*Leica TruView* ou *Faro Webshare*, p. ex. (voir figure 35, p. 37).

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, les logiciels de modélisation 3D destinés aux applications multimédias sont traditionnellement basés sur de tels modèles, qui permettent de générer des rendus photoréalistes. 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 être attentif à la question des textures qui serviront à 'habiller le modèle'. Utilisée seule ou combinée au balayage laser, la méthode photogrammétrique offre dans ce cas un avantage indéniable.



Fig. 33 Orthovue d'un nuage de points de très haute résolution issu de la méthode photogrammétrique.

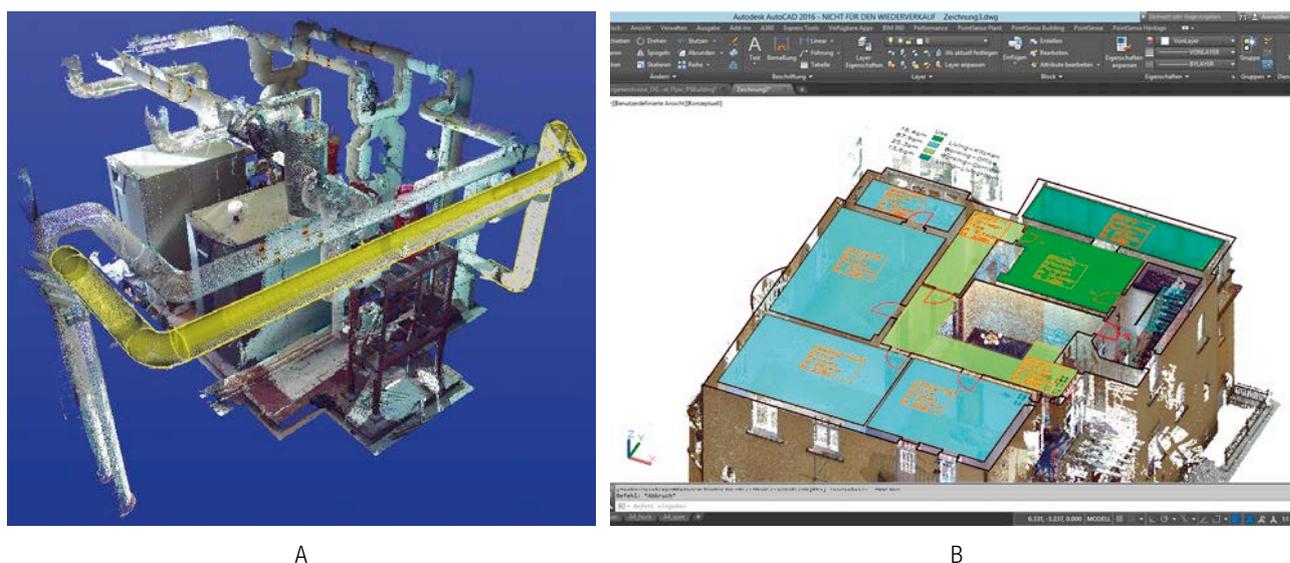


Fig. 34 A. Du scan 3D vers le dessin CAO 3D dans le logiciel *Trimble RealWorks*.  
B. Production de plans à partir du nuage de points dans le logiciel *Faro PointSense*.

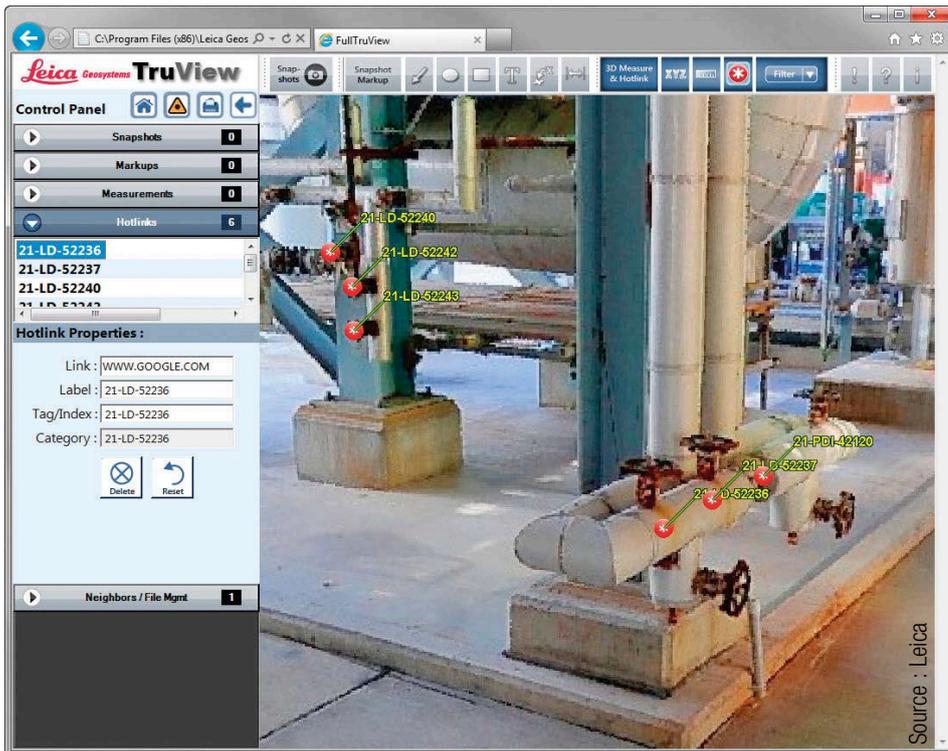


Fig. 35 Logiciel conçu pour les professionnels désireux de visualiser et de mesurer des nuages de points sans connaissances approfondies en balayage laser, CAO ou 3D.

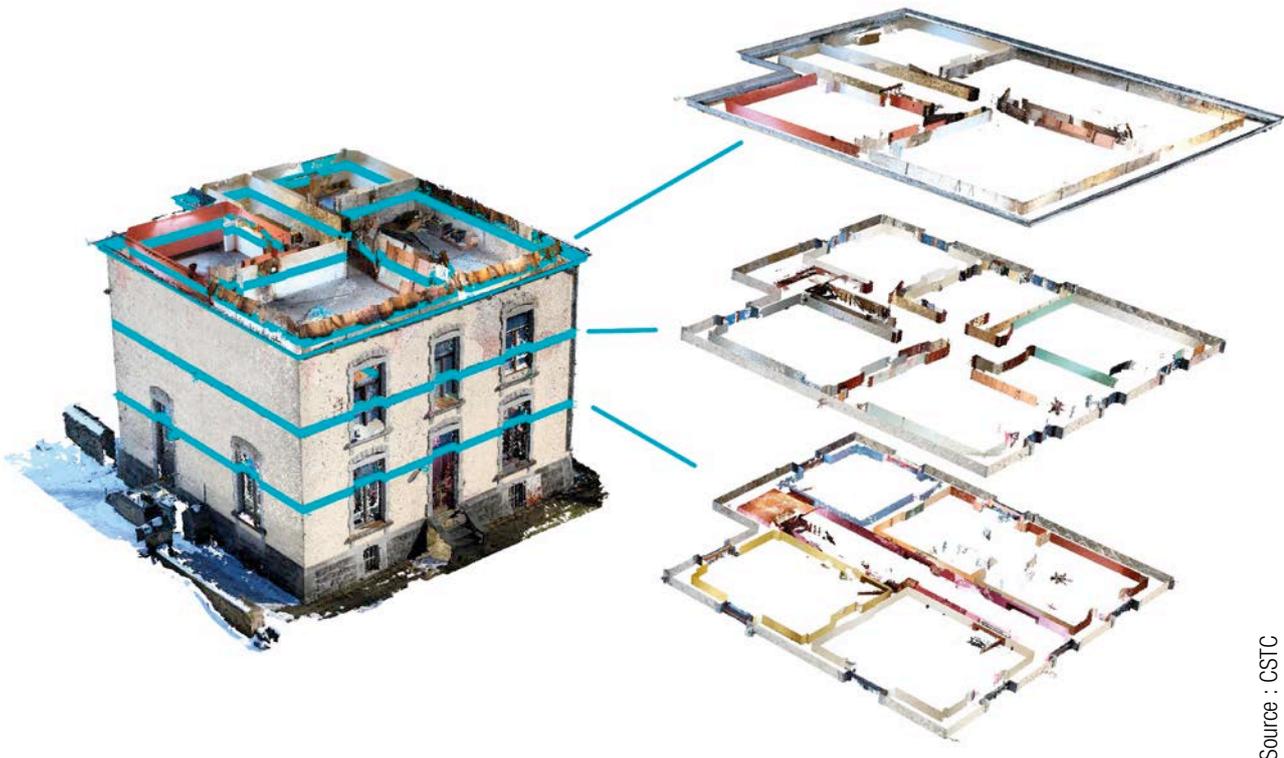


Fig. 36 Découpe d'un nuage de points en 'tranche' permettant de réduire sa taille tout en mettant en évidence des éléments d'intérêt.

## 5. Analyse des opportunités

### 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 ce paragraphe 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 le chapitre 6 (p. 41).

#### 5.2.2.1 Confrontation de scan 3D à un modèle de référence (*Scan-versus-CAD* ou *Scan-versus-Scan*)

De nombreux logiciels de modélisation ou de traitement de fichiers 3D permettent d'importer simultanément différents types de modèles (nuages de points, maillages, objets solides, ...). Parmi ces logiciels, certains disposent en outre d'outils d'analyse dimensionnelle. Il sera alors possible de connaître la déviation d'un scan 3D par rapport à un modèle de référence. Ces références géométriques peuvent inclure des primitives simples comme des plans (pour l'analyse de planéité d'une façade, p. ex.) ou encore un autre nuage de points (pour l'analyse des mouvements d'une structure au cours du temps, p. ex.). La figure 37 montre un exemple de comparatif entre deux nuages de points, issus respectivement d'un relevé au scanner laser et d'un relevé photogrammétrique. Des logiciels tels que *CloudCompare* permettent de colorer chaque point d'un nuage en fonction de sa distance au point le plus proche d'un autre nuage.

#### 5.2.2.2 Utilisation du scan 3D pour la fabrication (*Scan-to-CAM*)

Les outils numériques bénéficient d'une incorporation anticipée au sein des entreprises utilisant des méthodes de fabrication 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 (voir figure 38, p. 39). Ces machines requièrent des modèles de production contenant une succession d'ordre de déplacement de leurs outils de découpe ou de fraisage (commandes machine).

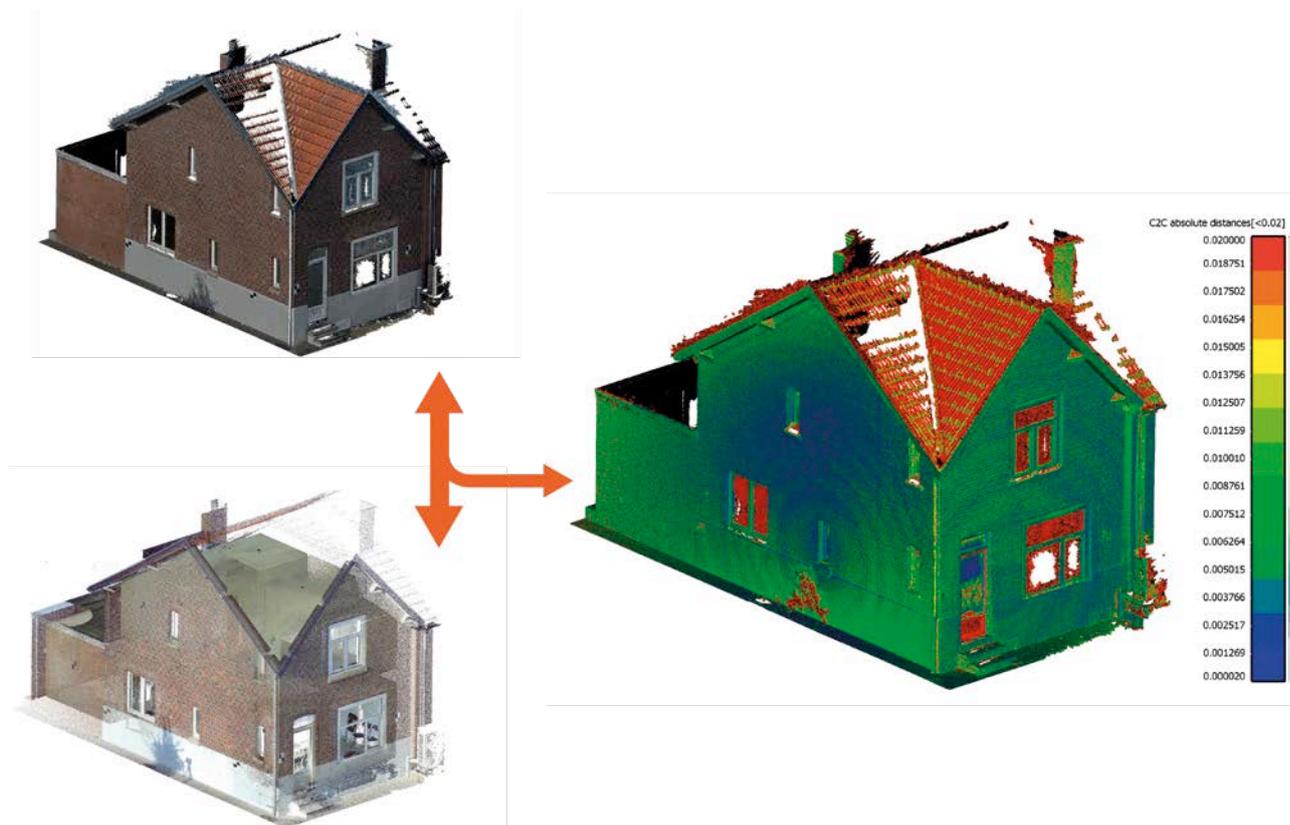


Fig. 37 Distance point à point entre un nuage de points obtenu par photogrammétrique (en haut à gauche) et un nuage de référence obtenu par lasergramétrique (en bas à gauche), indiquée par un code couleur.

À titre d'exemple, l'industrie des caissons d'enveloppe préfabriqués bénéficie de ces évolutions rapides sous l'impulsion d'un marché en pleine explosion et qui ne se limite plus à la construction neuve. Un guide complet pour la mise en œuvre de telles solutions en rénovation a d'ailleurs été produit lors de la recherche AIMES à Bruxelles [4]. C'est le paradigme de l'industrialisation la construction, avec une accélération de la phase de chantier associée à un contrôle accru de la qualité. 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.

Les éléments préfabriqués de grande dimension sont difficilement ajustables sur chantier. Par conséquent, il est précieux de disposer d'informations géométriques très précises sur les surfaces existantes qui seront en contact avec ces nouveaux éléments. L'analyse des données géométriques d'une façade existante peut, par exemple, fournir des informations contextuelles utiles pour la conception d'un caisson préfabriqué qui viendra s'y superposer. Dans la plupart des cas, la façade en contact avec ces parois préfabriquées présentera des irrégularités qu'il est possible de décrire grâce au relevé HD (voir figure 39). Une étude approfondie de ces dernières permet de limiter les ajustements sur chantier et de prévenir d'éventuels problèmes : programme, coût et performance sont garantis.

En résumé, une utilisation avancée des scans 3D permettra au fabricant de solutions préfabriquées d'intégrer le contexte géométrique en amont, directement dans la fabrication de son produit. Des solutions 'sur mesure' peuvent ainsi être conçues, dans lesquelles le nuage de points qui décrit l'élément architectural existant est utilisé pour définir un modèle FAO de la pièce qui viendra s'y adjoindre. Les modèles FAO désignent des modèles 3D ou 2D auxquels sont adjoints des ordres de mouvement pour les machines. Il s'agit d'une utilisation indirecte des scans, qui sont utilisés comme un support de conception pour la pièce à usiner. Il est également possible de les utiliser de manière plus immédiate pour certains procédés de fabrication. C'est le cas de l'impression 3D ou des autres techniques de 'fabrication additive' qui peuvent notamment servir à la reproduction d'éléments architecturaux (voir figure 40, p. 40).

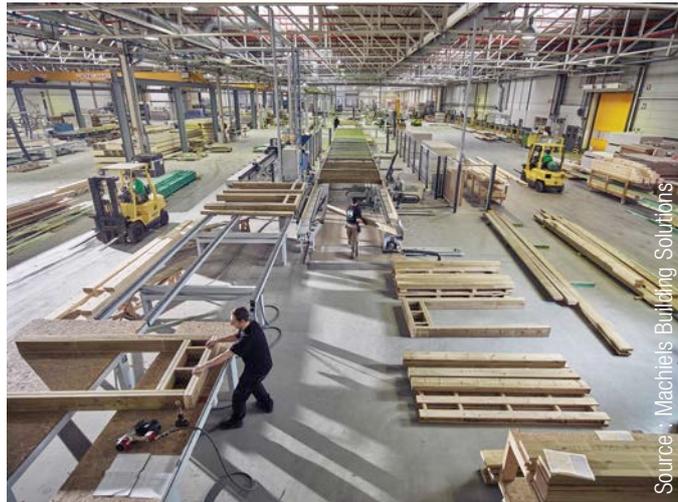


Fig. 38 Ligne de production semi-automatique de panneaux préfabriqués en ossature bois.

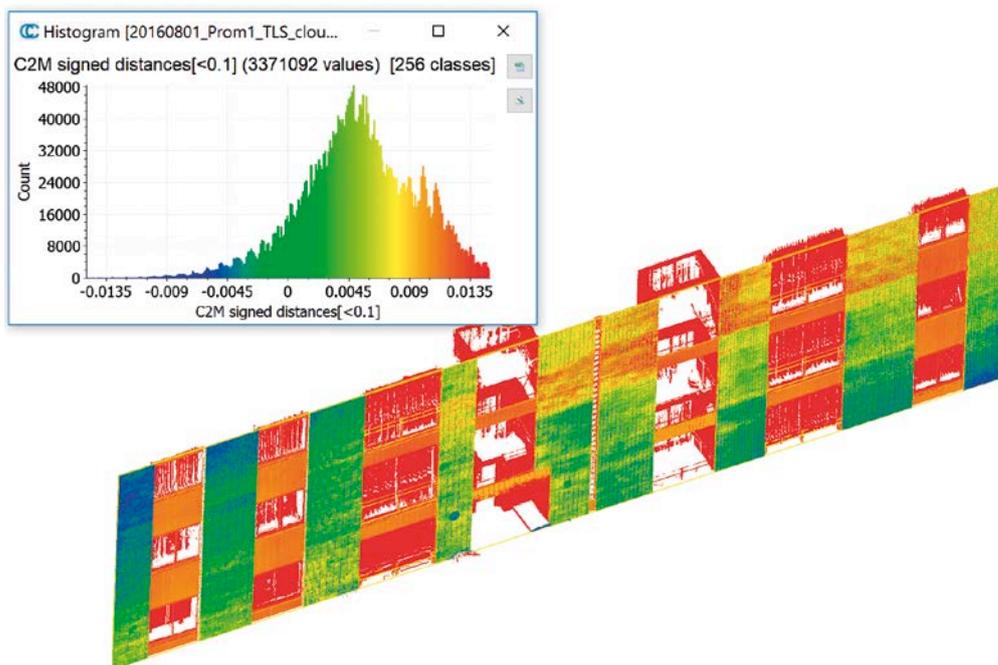


Fig. 39 Livrable utile pour le fabricant de façades préfabriquées pour la rénovation : une représentation des irrégularités de la façade existante sous la forme d'un code couleur.

Source : CSTC

## 5. Analyse des opportunités

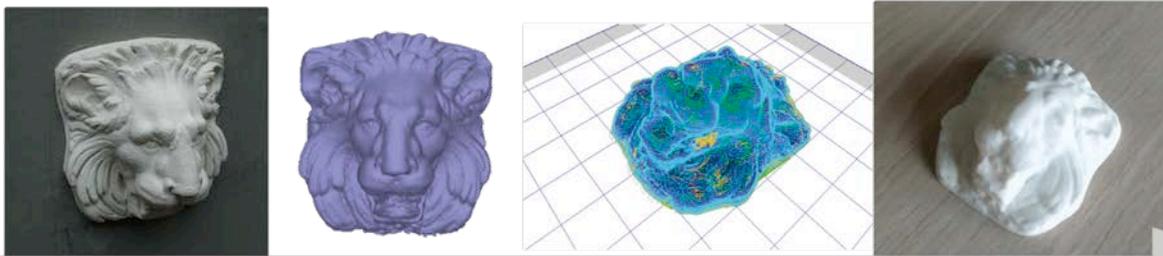


Fig. 40 Réplique d'un ornement architectural : production d'un fichier FAO pour l'impression 3D à partir d'un maillage.

### 5.2.2.3 Utilisation du scan 3D pour des simulations numériques

Les scans à haute définition peuvent aider à mettre en place de nombreux types de simulations numériques. Souvent, les scans 3D permettent d'accélérer la mise en place de la partie géométrique inhérente à toute simulation physique. Par exemple, la création d'un modèle BES (*building energy simulation*), qui permet la simulation dynamique d'échanges thermiques entre le bâtiment et son environnement, est plus facile lorsque l'on dispose de données géométriques à haute définition. En effet, une modélisation géométrique simple des zones thermiques peut être réalisée sur la base du nuage de points ou d'orthovues du nuage de points (voir figure 41).

D'une manière plus avancée encore, les données géométriques sous la forme de maillages triangulés peuvent être directement utilisées dans des modélisations à éléments finis. Ce type d'outil est utilisé pour transcrire des phénomènes physiques (analyse structurelle, analyse HAM (*heat, air and moisture*), analyse CFD (*computational fluid dynamics*), ...) avec un haut niveau de résolution spatiale.

### 5.2.2.4 Utilisation du scan pour la réalité virtuelle ou augmentée (Scan-to-VR/AR)

Il convient également mentionner les technologies de réalité virtuelle (VR, *virtual reality*), 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 contenus. 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. Parallèlement à 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 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 solides ou polygonaux texturés, retravaillés au sein d'environnements de modélisation spécifiques. Comme mentionné ci-avant, ce type de modèles est le plus courant pour le développement d'applications multimédia.

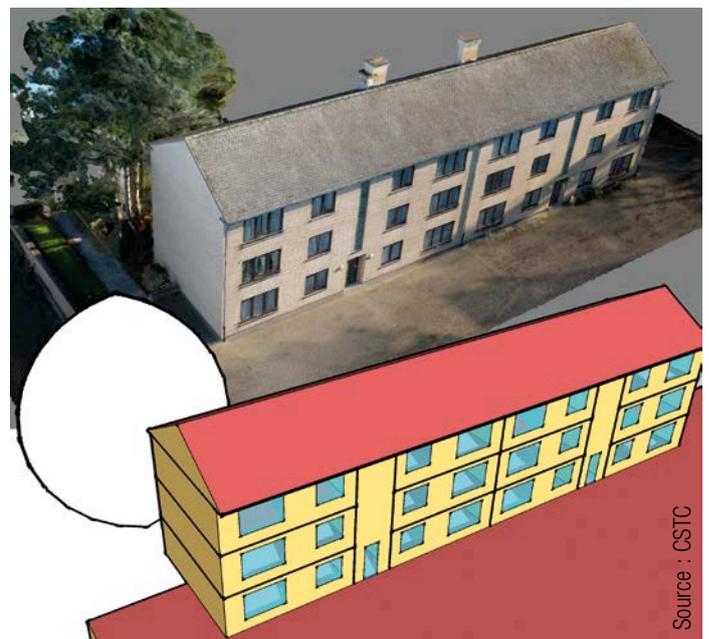


Fig. 41 Utilisation d'un scan 3D pour générer facilement un modèle BES.

# 6. INTÉGRATION DES SCANS DANS UNE DÉMARCHE BIM

L'intégration des scans 3D dans un processus BIM permet de révolutionner les mécanismes de collaboration autour d'un projet de construction. Les scans à haute définition peuvent servir de base au développement de modèles BIM de l'existant en présentant l'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 ?<sup>(7)</sup>

Le terme BIM peut signifier *building information model*, *building information modelling* ou *building information management*. Ces trois désignations représentent 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 du bâtiment, la 'maquette BIM', dans laquelle des métadonnées sont adjointes à l'information géométrique (voir figure 42). 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, entraînant une répercussion en chaîne de chaque modification. Le processus de modélisation BIM est donc très spécifique et plus exigeant qu'une modélisation 3D classique.

Tout au long du cycle de vie d'un bâtiment, ce paradigme du 'modèle intelligent' 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 considérant simultanément une série d'aspects. Une meilleure appréhension des impacts de chaque décision est dès lors permise. Tout le processus d'interaction entre professionnels s'en trouve modifié grâce au transfert optimisé de l'information. Au moment de la construction d'un bâtiment, par exemple, les efforts plus importants investis pour mettre en place un modèle BIM, plutôt qu'un 'simple' modèle 3D, peuvent garantir une réduction significative des ajustements sur site. On effectue l'entièreté du processus de construction de manière virtuelle avant la réalisation dans le monde réel, ce qui permet de détecter des conflits potentiels entre les différentes opérations. Après exécution, les informations compilées dans le modèle BIM pourront servir de support pour un entretien optimal de l'édifice ; à condition qu'il y ait eu une réflexion sérieuse autour de la gestion de l'information dans le temps.

Cette 'virtualisation' de la vie du bâtiment, depuis sa construction jusqu'à sa démolition, va de pair avec de nouvelles dimensions de travail, selon le type de données liées à la géométrie dans la maquette numérique; on parle de 4D, de 5D, de 6D et de 7D. Le BIM 4D désigne un modèle dans lequel les objets sont encodés sur une ligne du temps. Cette approche permet, par exemple, de mettre en place un phasage virtuel de chantier. La 5D ajoute la donnée 'coût' aux objets paramétriques du modèle. Travailler avec un modèle BIM 5D permet donc, par exemple, d'estimer les coûts du chantier, phase par phase. 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. Elle couvre, par exemple, les informations relatives à la maintenance et à la configuration des systèmes.

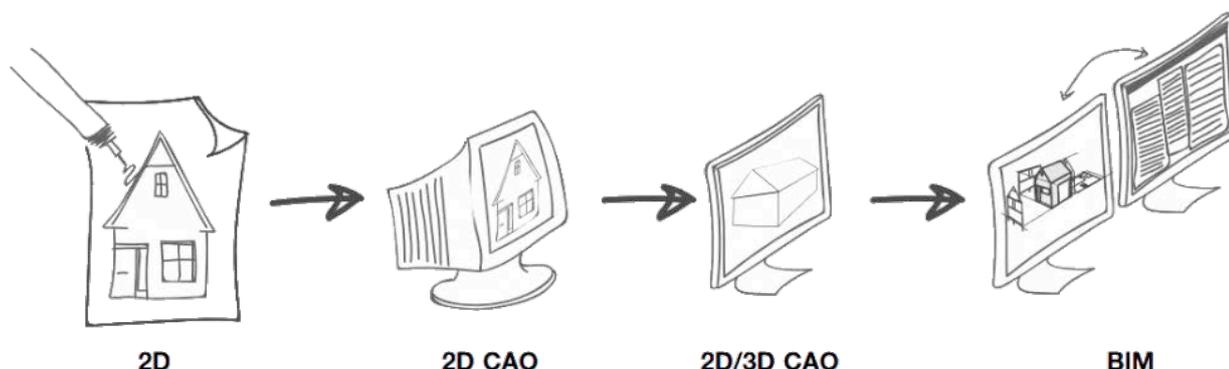


Fig. 42 À la base du BIM : joindre des métadonnées à l'information géométrique.

(7) Voir CSTC-Contact 2017-1

## 6. Intégration des scans dans une démarche BIM

### 6.2 L'UTILISATION DU SCAN 3D POUR ÉLABORER LA MAQUETTE BIM (SCAN-TO-BIM)

Intégrer des informations géométriques précises sur l'existant dans un modèle BIM est grandement facilité par le développement de technologies de scan 3D. Les nuages de points peuvent être valorisés de plusieurs manières au sein d'un processus BIM.

En rénovation, le scan 3D ouvre la voie à 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. A partir du nuage, on peut remodeler complètement le bâtiment en objets paramétriques BIM (voir figure 43). Malgré l'effort important que cela représente, on retrouvera alors les bénéfices du BIM pour un projet de rénovation (possibilité de planification de chantier ou simulations numériques avancées, voir figure 44, p. 43). 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, p. ex.), elle restera facilement accessible. Le relevé HD fournit en effet un niveau de confiance très élevé, bien plus satisfaisant que des plans en 2D. Pour certaines équipes de concepteurs, il en résulte 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 3D 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.

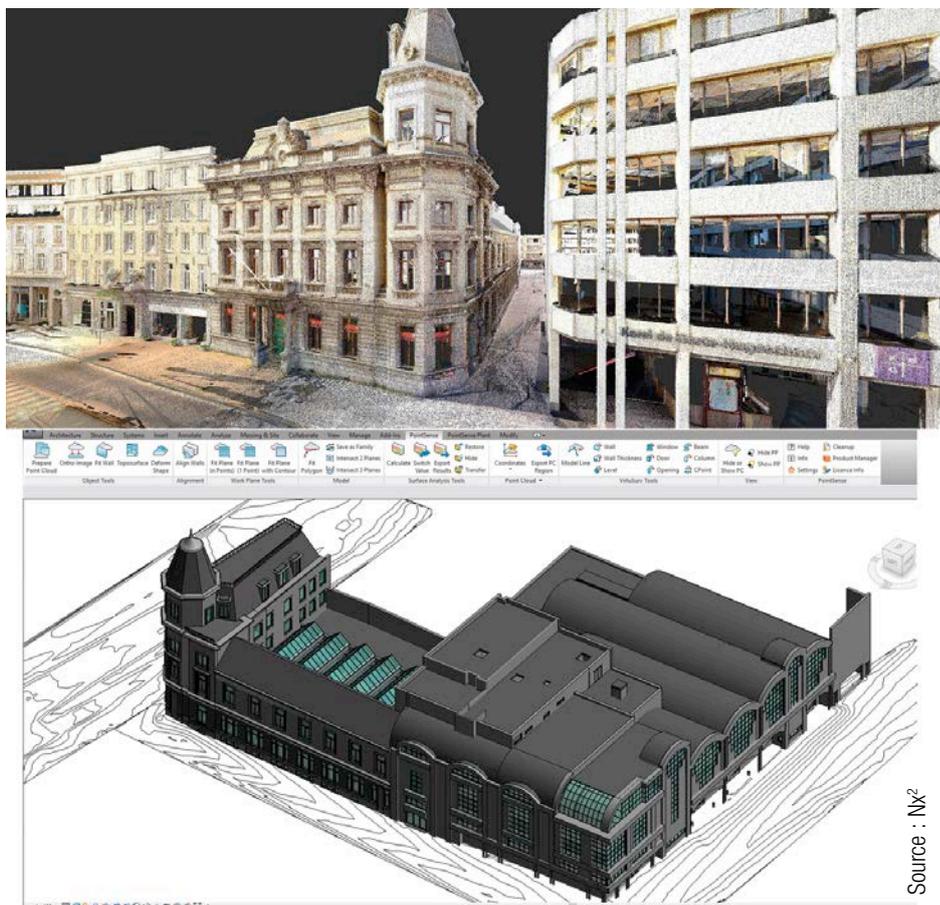
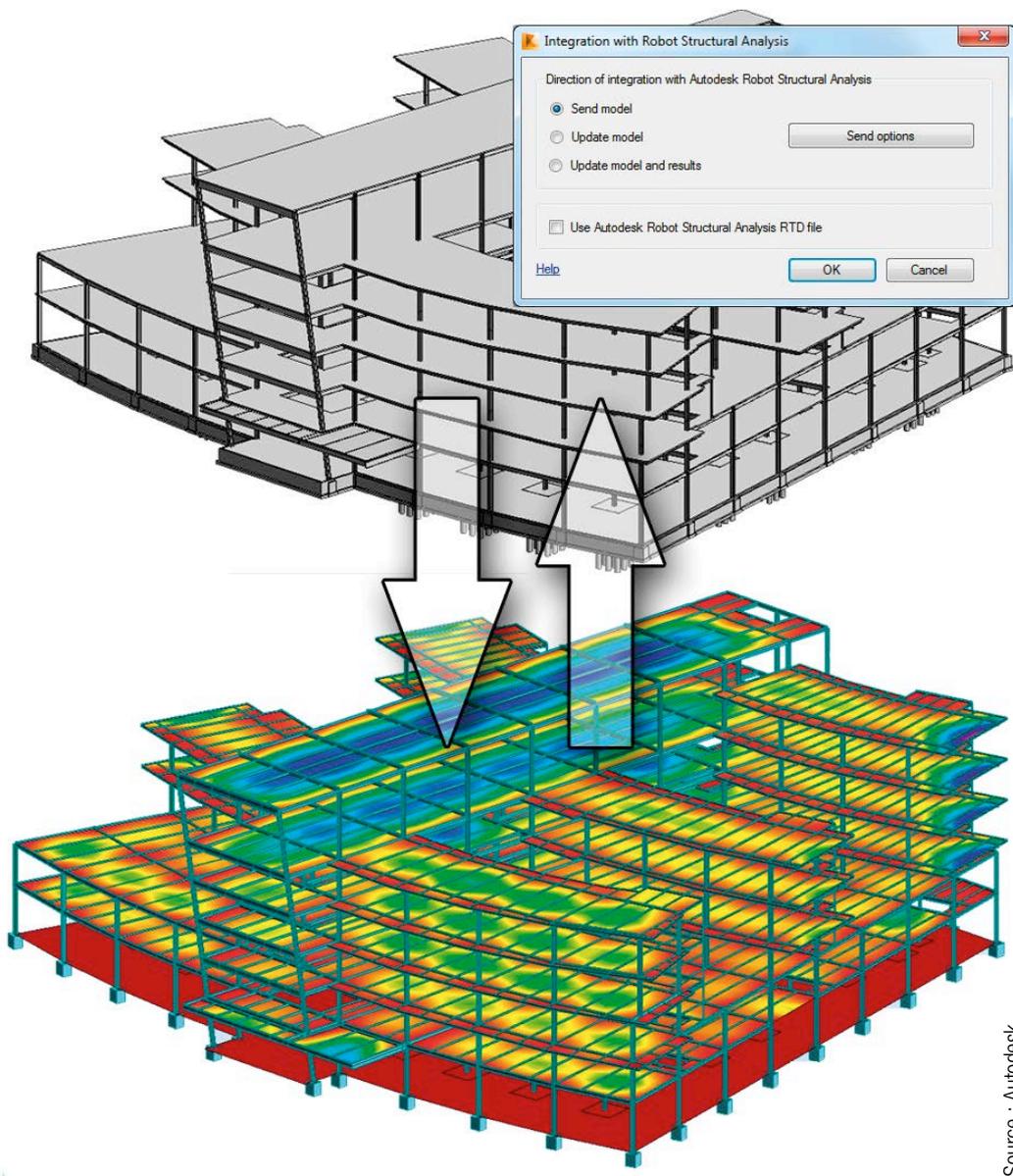


Fig. 43 Modèle d'une maquette BIM à partir d'un relevé au scanner laser. Les deux informations coexistent dans le logiciel BIM.

La transformation d'un nuage de points en objet BIM peut s'effectuer de plusieurs manières (à partir d'un processus *scan-to-CAD*, manuel ou semi-automatique, permettant de générer des solides tridimensionnels sur la base de nuages (voir § 5.2.1, p. 35), p. ex.). On peut alors importer ces objets géométriques dans le logiciel BIM afin de leur attribuer une sémantisation BIM. Toutefois, les interfaces de modélisation BIM permettent en général 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 objets. 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-ins pour les logiciels BIM (*Faro Pointsense*, *Leica Cloudworkx*, ...) ou encore intégrés au logiciel de prétraitement des nuages de points (*Trimble Realworks*, p. ex.).



Source : Autodesk

Fig. 44 Analyse structurale sur base d'un modèle BIM.

### 6.3 COMPARAISON DU SCAN 3D À LA MAQUETTE BIM (SCAN-VERSUS-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 de puissants outils de contrôle, via des algorithmes de comparaison géométrique (déjà présentés au § 5.2.2, p. 38). Les applications sont multiples. Il est, par exemple, possible de suivre l'exécution d'un chantier en réalisant des scans réguliers (voir figure 45). En superposant le modèle BIM à un scan pris sur chantier, des algorithmes de comparaison peuvent identifier les éléments déjà mis en œuvre et donc donner une indication de l'avancement des opérations en relation avec une approche BIM 4D [L1]. Pour les éléments BIM identifiés dans le nuage de points, il est également possible d'effectuer un contrôle dimensionnel et, ainsi, de mettre en évidence d'éventuels écarts par rapport aux tolérances requises. Le responsable peut alors 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 être effectuées 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. Du point de vue du logiciel, des plug-ins spécifiques existent et permettent de réaliser ces opérations comparatives au sein des programmes BIM (voir figure 46).



Fig. 45 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.

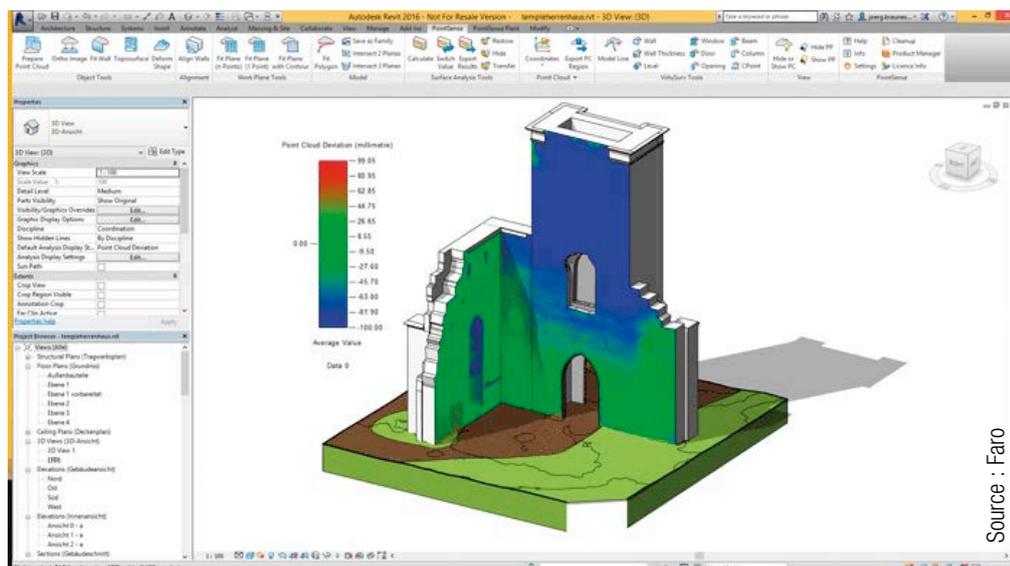


Fig. 46 Plug-in PointSense pour Autodesk Revit permettant de superposer l'information de planéité issue du nuage de points à la représentation simplifiée du bâtiment sous forme d'objets solides.

# 7. DÉFINITION DU CAHIER DES CHARGES POUR LE GÉOMÈTRE RESPONSABLE DU RELEVÉ HD

Au regard des opportunités abordées ci-avant, il est essentiel que le commanditaire définisse clairement les objectifs de l'étude de numérisation 3D, en concertation éventuelle avec des consultants ou avec les prestataires potentiels. Cette étape est aussi importante que le traitement en lui-même. En effet, une mauvaise définition initiale des objectifs se traduira nécessairement par une inadéquation entre les livrables et l'utilisation planifiée de ces derniers. L'explicitation des objectifs de l'étude doit comporter les informations suivantes :

- informations géométriques et/ou texturales attendues
- types de modèles informatiques souhaités et leurs caractéristiques selon l'utilisation finale envisagée. Sont également considérés :
  - volonté éventuelle de communiquer, de diffuser et d'échanger autour du modèle livrable. Ce point est important, car il conditionne la mise en place des phases de post-traitement permettant de nettoyer, d'alléger, de structurer et, éventuellement, de sémantiser le modèle [H1]
  - évolutivité potentielle des modèles (possibilité de se baser sur celui-ci pour en développer un nouveau). Cette dernière dépend notamment :
    - ➔ du type et du format du fichier
    - ➔ du cheminement numérique utilisé pour le développement du modèle
    - ➔ des bibliothèques intégrées dans les modèles
    - ➔ des modalités de géolocalisation
- actualisation potentielle du modèle au cours du temps
- stockage potentiel du modèle sur une plateforme hébergée.

Il convient de mentionner clairement les objets, volumes et surfaces du bâtiment à étudier pour que le géomètre puisse élaborer un plan de balayage détaillé, en vue d'optimiser 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.

Le client doit définir avec précision les modèles livrables pour chaque zone d'intérêt. Les données brutes provenant des appareils de mesure ne pourront pas souvent être utilisées directement et nécessiteront une phase de traitement pour obtenir des modèles 3D ou 2D exploitables. Par exemple, les modèles 3D finaux peuvent inclure :

- un ou plusieurs nuages de points nettoyés à densité élevée à partir de scans laser (TLS) ou d'une reconstruction à partir d'images
- une combinaison de divers nuages de points nettoyés<sup>(\*)</sup> dans un fichier de projet unique (nuage de points à densité très élevée)
- une interprétation ou simplification d'un nuage de points (nuage de points segmenté, p. ex.)
- un maillage polygonal 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

(\*) Ces données brutes peuvent être difficiles à exploiter sur des ordinateurs standards en raison de leur poids.

## 7. Définition du cahier des charges pour le géomètre responsable du relevé HD

- un modèle solide de l'enveloppe extérieure basé sur une combinaison de primitives géométriques
- un modèle solide 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 (phases d'un chantier, p. ex.) et/ou héberger sur une plateforme *Cloud*, surtout 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.

Les fichiers images tels que les orthophotographies constituent une première catégorie d'*output* 2D. D'autres modèles 2D plus classiques sont les dessins en trait qui incluent les plans, les sections, les élévations et les détails de construction. Ces modèles sont généralement produits à partir des modèles 3D susmentionnés ou d'orthophotographies. Enfin, le commanditaire peut nécessiter 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 qualité qu'il y a lieu de définir pour chaque zone d'intérêt :

- niveau de détail<sup>(9)</sup> (résolution d'un nuage de points, p. ex.)
- incertitude/tolérance de mesure acceptable
- fiabilité dans la détection des arrêtes
- qualité de la restitution texturale
- ...

Ces critères permettront au prestataire de définir au mieux une technique ou une combinaison de techniques adaptée. La justesse de mesure et la taille du bruit de mesure seront évidemment déterminantes pour des études géométriques destinées à évaluer la qualité d'une intervention sur chantier (évaluation de la planéité d'une dalle de plancher, p. ex.). Enfin, il importe de spécifier la précision requise (le cas échéant) pour la géolocalisation absolue du modèle.

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.

---

<sup>(9)</sup> Le niveau de détail a une signification toute particulière lorsqu'il est question d'un modèle BIM évoquant un LOD (*level of development* ou *level of detail*) pour les différents objets.

# 8. ANALYSE DES OBSTACLES

Bien que les opportunités liées à l'usage 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.

## 8.1 FREINS GLOBAUX À L'UTILISATION DES TECHNOLOGIES DE RELEVÉ HD

Un acteur peut hésiter à adopter les technologies de scan 3D pour différentes raisons :

- procédures de fonctionnement bien ancrées pouvant se révéler difficile à faire évoluer. Il est question 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
- coûts immédiats importants inhérents à la transition (formation, acquisition de logiciels, entretien des bases de données, ...). Ces coûts sont susceptibles de constituer un frein majeur pour les petites structures où les investissements à long terme peuvent représenter une menace pour l'équilibre budgétaire
- 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 HD

Deux grands types d'obstacles sont à distinguer :

- risques intrinsèques à chaque méthode, à savoir ceux qui sont liés à la technologie en elle-même, à ses limitations et aux prérequis techniques associés. Cela inclut les risques externes qui ne dépendent pas de facteurs humains (météo lors du relevé, p. ex.)
- risques extrinsèques relatifs 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 importants à chaque étape d'un projet de numérisation HD (voir chapitre 3, p. 25) :

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 6 (p. 48) offre un aperçu de ces risques pour le relevé par scanner laser et par photogrammétrie multi-images. Le tableau 7 (p. 49) fournit, quant à lui, un récapitulatif des obstacles extrinsèques.

Un premier point important, quelle que soit la méthode, est l'adéquation entre la volonté du client et la traduction de celle-ci 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. La communication entre requérant et prestataire doit donc se faire sans barrières liées à la compréhension des possibilités qu'offrent les différentes techniques disponibles auprès de ce dernier (qui a effectivement souvent l'impression que les clients peuvent avoir des attentes irréalistes quant à ces possibilités [R1]). Le géomètre doit être clair quant aux limitations techniques et accompagner le client dans la définition d'un cahier des charges et d'objectifs réalistes. 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 § 8.3, p. 48). On a pu également constater dans certains cas qu'il était utile d'impliquer les occupants en leur présentant la technologie et en réalisant une démonstration afin d'éliminer leurs appréhensions et ne pas les déranger dans leur travail ou leur espace de vie [G1].

Notons que l'acquisition par balayage laser en elle-même ne demande que peu d'expertise. Le point le plus crucial pour la planification sera la définition correcte des positions de scannage afin d'assurer une couverture suffisante des objets à sonder. La photogrammétrie nécessite une préparation beaucoup plus poussée. Quelle que soit la taille du bâtiment ou de l'objet à étudier, il est indispensable de mettre en œuvre une stratégie de capture réfléchi sous peine d'avoir une recons-

## 8. Analyse des obstacles

truction ultérieure peu fiable ou même impossible. En outre, le paramétrage adéquat de l'appareil photo devra être connu par l'opérateur afin d'optimiser la qualité des photos (paramètre ISO au minimum, petite ouverture du diaphragme, ...). En cas de relevé photogrammétrique mobile (par drone, p. ex.), le pilotage du véhicule et la manipulation télécommandée de sa nacelle photo doivent être maîtrisés par les opérateurs. En effet, il existe des prérequis spécifiques pour la photogrammétrie (stabilité, taux de couvertures des photos, ...) qui ne sont pas nécessairement pertinents lors d'études plus classiques.

La réalisation du relevé comporte des risques intrinsèques communs aux deux technologies, comme les défaillances matérielles aléatoires ou dues à des conditions environnementales incompatibles (vibrations, vent, pluie, ...). Les scanners laser et les appareils photo 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 en raison de l'embarquement de nombreux systèmes de communication. Un ensemble de facteurs pouvant nuire à la qualité de la restitution photogrammétrique (présence de textures unies ou de surfaces réfléchissantes (voir tableau 3 (p. 22), p. ex.) existe au niveau de l'objet étudié. Des problèmes similaires peuvent se poser 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 au § 2.2.2 (p. 18), la méthode photogrammétrique requiert, par exemple, une puissance de calcul importante pour effectuer la reconstruction tridimensionnelle. La configuration informatique nécessaire 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 (cibles relevées par station totale, p. ex.) 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 en vue d'atteindre les objectifs liés.

Tableau 6 Risques intrinsèques majeurs liés à l'utilisation des relevés HD.

	Problèmes généraux	Problèmes spécifiques	
		TLS	RCPI
<b>Planification et phase d'acquisition sur le terrain</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• alimentation électrique insuffisante (batteries, accès à un point de branchement secteur, ...)</li> <li>• défaillance matérielle</li> <li>• mauvaise réception d'un signal nécessaire au fonctionnement (GPS, p. ex.)</li> <li>• météo ou climat hostile au bon fonctionnement du matériel ou présentant des risques de dommages<sup>(*)</sup></li> <li>• recul disponible insuffisant.</li> </ul>	Instabilité de la station d'acquisition due au terrain (sol instable, ...).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• appareil photo non adapté</li> <li>• ensoleillement trop important</li> <li>• vent trop important (drones).</li> </ul>
<b>Traitement des données brutes</b>	Problèmes d'imprécision liés à l'objet sondé et à sa compatibilité avec la méthode (zones réfléchissantes ou transparentes sur le bâtiment, p. ex.).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• données brutes très lourdes</li> <li>• mauvaise représentation colorimétrique.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• puissance de calcul disponible insuffisante</li> <li>• temps de calcul très long</li> <li>• qualité inégale de la reconstruction 3D (zone unie ou à motif répétitif sur l'objet étudié, p. ex.).</li> </ul>
<b>Mise en forme et transmission des livrables</b>	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 7 Risques extrinsèques majeurs liés à l'utilisation des relevés HD.

	Problèmes généraux	Problèmes spécifiques	
		TLS	RCPI
Définition du cahier des charges	<ul style="list-style-type: none"> <li>incapacité du client d'exprimer son besoin en termes techniques</li> <li>mauvaise définition des responsabilités et droits</li> <li>mauvaise définition initiale des livrables.</li> </ul>		
Planification et phase d'acquisition sur le terrain	<ul style="list-style-type: none"> <li>mauvaise préparation de la mission</li> <li>accès difficile à certaines zones dont le relevé est prévu</li> <li>obstacles imprévus (véhicule garé, p. ex.) ou non anticipés (végétation abondante, p. ex.)</li> <li>obstacle humain (réaction négative d'un occupant, p. ex.).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>mouvement imprévu du scanner dû aux activités environnantes (choc, vibration, ...)</li> <li>mauvaise définition des emplacements de scan.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>mauvais réglage de l'appareil photo (ISO trop haut, p. ex.)</li> <li>mauvaise définition de la méthodologie de prise de vues.</li> </ul>
Traitement des données brutes	<ul style="list-style-type: none"> <li>pas de procédure claire pour le contrôle qualité</li> <li>calage des scans difficile dû à un mauvais recouvrement ou à un nombre insuffisant de cibles</li> <li>problèmes d'imprécision liés à une mauvaise utilisation de l'appareil de relevé (scanner ou appareil photo).</li> </ul>	Nombre de scans insuffisants pour garantir la couverture des zones d'intérêt.	<ul style="list-style-type: none"> <li>manque de connaissance quant au paramétrage du logiciel de reconstruction</li> <li>mauvais tri des photos utilisées pour la reconstruction.</li> </ul>
Mise en forme et transmission des livrables	<ul style="list-style-type: none"> <li>données complémentaires nécessaires à la création du livrable souhaité insuffisantes<sup>(*)</sup></li> <li>inadéquation entre le livrable et la capacité pour le client de l'utiliser (à cause de son poids ou de son format)</li> <li>difficulté de transmission des données de par leur poids numérique</li> <li>mauvaise utilisation du modèle par le client en raison d'une méconnaissance des possibilités que ce dernier offre<sup>(*)</sup>.</li> </ul>		

(\*) Il s'agit d'obstacles critiques lors d'un processus BIM.

### 8.3 QUELQUES IMPLICATIONS RÉGLEMENTAIRES

Pour clôturer ce chapitre consacré aux obstacles potentiels à l'utilisation des relevés HD, il est utile de s'attarder brièvement sur certaines implications réglementaires.

#### 8.3.1 SÉCURITÉ SUR CHANTIER

Les relevés HD réalisés au sol n'engendrent généralement que peu de mesures de sécurité spécifiques quant aux appareils utilisés pour le relevé. Il y a lieu cependant de garantir la sécurité des opérateurs sur site lors de l'activité de numérisation. Certaines dispositions sont donc nécessaires : équipement de sécurité, arrêts de certaines opérations, ... Un point particulier concerne les risques d'utilisation de la lumière laser pour la peau et les yeux des opérateurs et des personnes présentes dans le rayon d'action d'un scanner. Une classification a été mise en place dans les années 70 pour définir la dangerosité des scanners lasers et compte aujourd'hui sept classes : 1, 1M, 2, 2M, 3R, 3B et 4. Le 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 présentent peu de danger, à condition d'être manipulés avec soin [1].

## 8. Analyse des obstacles

L'utilisation de drones doit amener des dispositions plus strictes quant à la sécurité, car le risque inhérent 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 télépilotés dans l'espace aérien belge a été publié au Moniteur belge. Ce document régleme dorénavant l'utilisation des drones en Belgique et a été établi en concertation avec la fédération BeUAS (Fédération belge de l'Aviation Télépilote). Rappelons 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](http://Belgium.be) [S3].

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 a souscrit les 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 informations sensibles sont concernées par le relevé, le commanditaire doit s'assurer de mettre sur papier d'éventuelles clauses spécifiques, couvrant des aspects de non-divulgateion, de stockage informatique sécurisé, d'accès limité aux données, ...

### 8.3.3 DROITS, OBLIGATIONS ET RESPONSABILITÉS

Pour assurer la réussite d'un relevé HD, 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 [R1]. 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 haute définition au cours des prochaines années, avec des évolutions importantes des 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 de logiciel pour améliorer la correspondance entre leurs besoins et les possibilités techniques.

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 possibilités améliorées de complémentarité avec les techniques photogrammétriques. Le développement de solutions mobiles moins encombrantes et plus abordables permettra probablement une miniaturisation des appareils. Les premières solutions de scanner laser embarqué sur drone commencent d'ailleurs à apparaître (voir figure 47).

La méthode photogrammétrique de reconstruction 3D par corrélation d'images possède des atouts indéniables et sera sans aucun doute sujette à des améliorations significatives. L'amélioration de la précision de la restitution, l'optimisation du temps de calcul et le développement du traitement de vidéos constituent les principaux axes de travail. Une problématique majeure reste pour l'instant l'estimation de la qualité de restitution avant le traitement complet hors chantier. Pour la résoudre, il est souhaitable que des procédures de contrôle de la qualité claires soient définies à l'avenir. Bien qu'elles n'aient pas été abordées en détail, il est certain que les technologies de numérisation en temps réel connaîtront des avancées significatives. Encore fréquemment cantonnées aux environnements intérieurs, avec une précision souvent inférieure aux scanners fixes, leur champ d'action s'élargira très certainement à l'avenir.

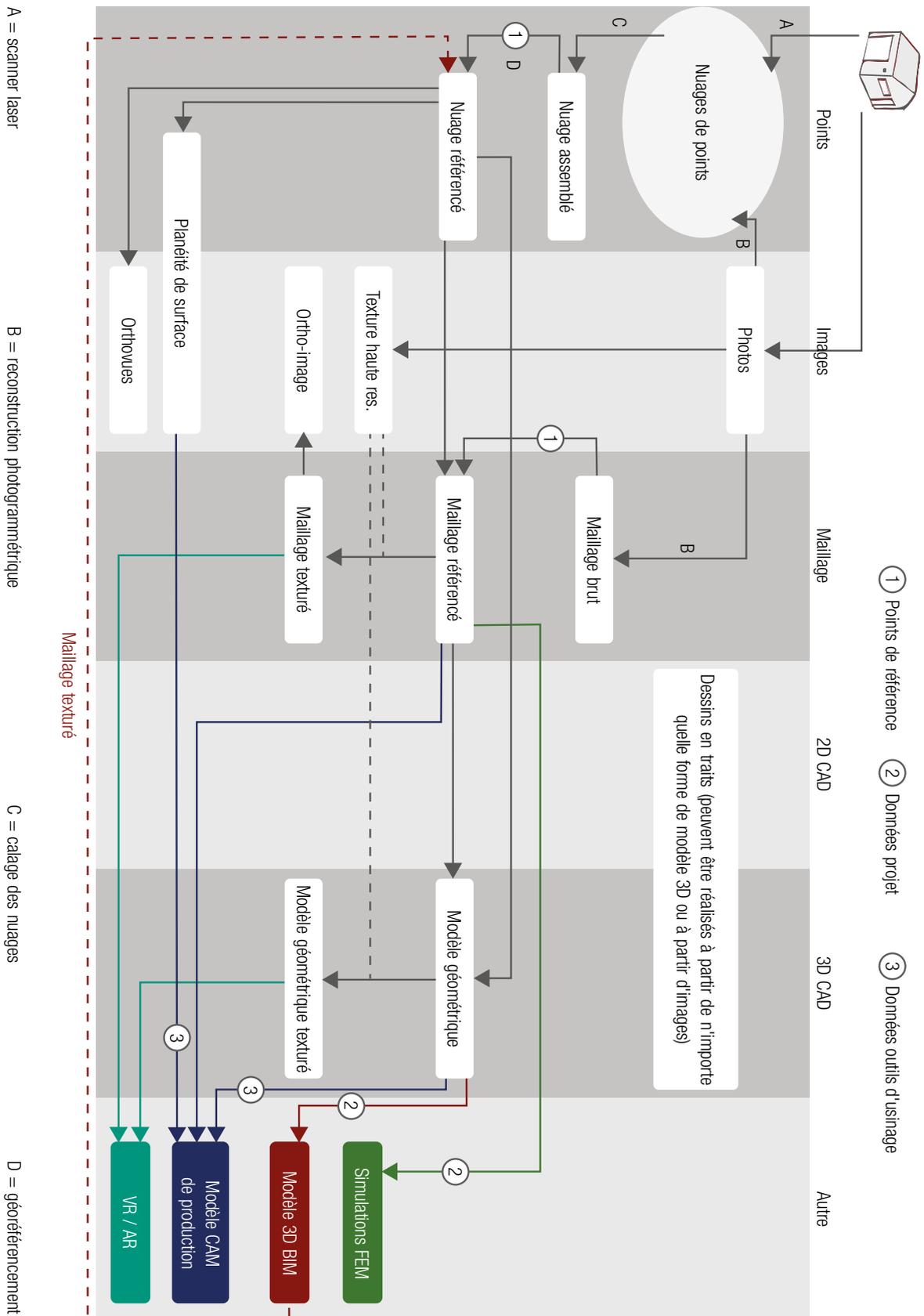
Au point de vue des logiciels de traitement des fichiers 3D, on attend de grands progrès dans le traitement automatique des nuages de points (filtrage, segmentation, sémantisation, comparaison, ...). On l'a vu, le BIM est appelé à occuper une place de plus en plus grande dans le secteur. L'intérêt de la conversion *Scan-to-BIM* et des algorithmes *Scan-versus-BIM* est évident, même si de grands efforts restent à produire pour faciliter le travail 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. Il sera particulièrement accru si les technologies se démocratisent davantage et 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.



Fig. 47 Premières solutions 'compactes' pour la lasergrammétrie embarquée sur drone.

# ANNEXE : LE CHEMINEMENT DE L'INFORMATION 3D



# BIBLIOGRAPHIE

## D

Devillers C.

D1 Complémentarité de la photogrammétrie et de la lasergrammétrie pour la modélisation 3D architecturale, Institut d'Enseignement de Promotion Sociale de la Communauté française, 2015.

Dubois S., Remy O. et de Bouw M.

D2 Retrofitting with AIM-ES: Guidelines for using Architectural Industrialised Multifunctional Envelope Systems, CSTC-WTCB-BBRI, 2016. [http://www.brusselsretrofitxl.be/wp-content/uploads/2016/07/AIMES\\_Guidelines\\_UK\\_2016.pdf](http://www.brusselsretrofitxl.be/wp-content/uploads/2016/07/AIMES_Guidelines_UK_2016.pdf)

## G

GSA

G3 GSA BIM Guide series 03 : BIM Guide for 3D imaging, GSA, 2009. <http://www.gsa.gov/portal/content/102282>

## H

Héno R. et Chandelier L.

H1 Numérisation 3D de bâtiments : cas des édifices remarquables. London : Hermes Science Publishing, 2014.

## J

Jaillet S., Ployon E. et Villemin T.

J1 Images et modèles 3D en milieux naturels, Collection EEDYTEM, no. 12, 2011.

## L

Lamaille G., Lahaye J. et Vandenberghe T.

L1 L'utilisation du Scanning Laser 3D pour la documentation as-built des projets BIM, Rev. Sci. Ing. Ind., no. 30, 2016.

Larsen K. E., Lattke F., Ott S. et Winter S.

L2 Surveying and digital workflow in energy performance retrofit projects using prefabricated elements, Autom. Constr., vol. 20, no. 8, 2011.

Luhmann T., Robson S., Kyle S. et Boehm J.

L3 Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging, Photogramm. Eng. Remote Sens., vol. 81, no. 4, 2015.

## P

Petzold F. et Donath D.

P1 Digital building surveying and planning in existing building, E-Des. Archit., 2004.

Point Cloud Library

P2 Documentation Point Cloud Library (PCL). [http://pointclouds.org/documentation/tutorials/region\\_growing\\_segmentation.php](http://pointclouds.org/documentation/tutorials/region_growing_segmentation.php).

## R

Randall T.

R1 Client guide to 3D scanning and data capture, BIM Task Group, 2013.

## S

Snavely N. et Szeliski R.

S1 Scene reconstruction and visualization from community photo collections, Proceedings of the IEEE, vol. 98, no. 8, 2010.

SPF Mobilité

S2 Découvrez l'arrêté royal (drones) relatif à l'utilisation des aéronefs télépilotés dans l'espace aérien belge. [http://mobilit.belgium.be/fr/nouvelles/nieuwsberichten/2016/decouvrez\\_larrete\\_royal\\_drones\\_relatif\\_lutilisation\\_des\\_aeronefs](http://mobilit.belgium.be/fr/nouvelles/nieuwsberichten/2016/decouvrez_larrete_royal_drones_relatif_lutilisation_des_aeronefs)

S3 FAQ UAV | SPF Mobilité. [http://mobilit.belgium.be/fr/Resources/publications/luchtvaart/pub\\_luchthavens\\_faq\\_drones](http://mobilit.belgium.be/fr/Resources/publications/luchtvaart/pub_luchthavens_faq_drones)

Editeur responsable : Jan Venstermans  
CSTC, Rue du Lombard 42  
1000 Bruxelles

D/2018/0611/09

## Recherche • Développe • Informe

Principalement financé par les redevances de quelque 85.000 entreprises belges représentant la quasi-majorité des métiers de la construction, le CSTC incarne depuis plus de 55 ans le centre de référence en matière scientifique et technique, contribuant directement à l'amélioration de la qualité et de la productivité.

### Recherche et innovation

L'introduction de techniques innovantes est vitale pour la survie d'une industrie. Orientées par les professionnels de la construction, entrepreneurs ou experts siégeant au sein des Comités techniques, les activités de recherche sont menées en parfaite symbiose avec les besoins quotidiens du secteur.

Avec l'aide de diverses instances officielles, le CSTC soutient l'innovation au sein des entreprises, en les conseillant dans des domaines en adéquation avec les enjeux actuels.

### Développement, normalisation, certification et agréation

A la demande des acteurs publics ou privés, le CSTC réalise divers développements sous contrat. Collaborant activement aux travaux des instituts de normalisation, tant sur le plan national (NBN) qu'europpéen (CEN) ou international (ISO), ainsi qu'à ceux d'instances telles que l'Union belge pour l'agrément technique dans la construction (UBAtc), le Centre est idéalement placé pour identifier les besoins futurs des divers corps de métier et les y préparer au mieux.

### Diffusion du savoir et soutien aux entreprises

Pour mettre le fruit de ses travaux au service de toutes les entreprises du secteur, le CSTC utilise largement l'outil électronique. Son site Internet adapté à la diversité des besoins des professionnels contient les ouvrages publiés par le Centre ainsi que plus de 1.000 normes relatives au secteur.

La formation et l'assistance technique personnalisée contribuent au devoir d'information. Aux côtés de quelque 650 sessions de cours et conférences thématiques impliquant les ingénieurs du CSTC, plus de 18.000 avis sont émis chaque année par la division Avis techniques.

### SIÈGE SOCIAL

Rue du Lombard 42, B-1000 Bruxelles  
Tél. 02/502 66 90  
Fax 02/502 81 80  
E-mail : info@bbri.be  
Site Internet : www.cstc.be

### BUREAUX

Lozenberg 7, B-1932 Sint-Stevens-Woluwe  
Tél. 02/716 42 11  
Fax 02/725 32 12

- Avis techniques – Publications
- Gestion – Qualité – Techniques de l'information
- Développement – Valorisation
- Agréments techniques – Normalisation

### STATION EXPÉRIMENTALE

Avenue Pierre Holoffe 21, B-1342 Limelette  
Tél. 02/655 77 11  
Fax 02/653 07 29

- Recherche et innovation
- Formation
- Bibliothèque

### CENTRE DE DÉMONSTRATION ET D'INFORMATION

Marktplein 7 bus 1, B-3550 Heusden-Zolder  
Tél. 011/79 95 11  
Fax 02/725 32 12

- Centre de compétence TIC pour les professionnels de la construction (ViBo)
- Centre d'information et de documentation numérique pour le secteur de la construction et du béton (Betonica)

### BRUSSELS MEETING CENTRE

Boulevard Poincaré 79, B-1060 Bruxelles  
Tél. 02/529 81 29

### BRUSSELS GREENBIZZ

Rue Dieudonné Lefèvre 17, B-1020 Bruxelles  
Tél. 02/233 81 10