NUMÉRISATION du patrimoine bâti 3D

Acquisition des données, nuages de points et livrables

Christophe Bagieu
Hélène Macher

Préface de Bertrand Clergeot

EDITIONS LE MONITEUR

PRÉFACE

D'après vous, à partir de quand peut-on dire que les deux mondes de la topographie et de la modélisation 3D se sont croisés ? Voire ont fusionné ? Pour certains, la 3D a toujours existé dans la topographie, même si les moyens numériques pour la représenter sont récents. Pour d'autres, le cap a été franchi avec la démocratisation des scanners 3D terrestres, il y a tout juste une petite vingtaine d'années.

Depuis, les évolutions dans ce domaine n'ont pas cessé et touchent aussi bien le *hardware* que le *software* : toujours plus de densité et de rapidité pour les scanners, avec assemblage « in situ » des nuages entre eux, et introduction massive de l'intelligence artificielle (IA) dans les algorithmes de calculs d'assemblage automatiques, de détection de clashs et de formes… si bien que nous assistons maintenant à de la détection automatique d'objets dans les nuages. Promis, ce sera fait en un clin d'œil quand une IA sera capable automatiquement de représenter un village en objets BIM dans le *cloud*…

Ce qui me laisse pantois, c'est la rapidité avec laquelle ces évolutions se sont enchaînées. Et Mme Hélène Macher, co-autrice de cet ouvrage, y est bien pour quelque chose. En effet, Hélène a travaillé sur une thèse portant sur l'automatisation de la création de maquettes numériques de bâtiments existants à partir de nuages de points entre 2014 et 2017 sous la tutelle de l'Ordre des géomètres-experts. C'est en tant que président de la commission Expertise de la mesure que j'ai eu la chance de la côtoyer et d'échanger à plusieurs reprises avec elle, sur ces sujets et beaucoup d'autres. Nous parlions alors d'algorithmes capables de reconnaître automatiquement des plans (sols, plafonds, murs), mais le codage de ces lignes se faisait à la force des poignets. Aujourd'hui, l'avènement exponentiel d'une IA comme ChatGPT laisse entrevoir des possibilités quasi sans limite…

En parallèle de mes échanges avec Hélène, Tania Landes et Pierre Grussenmeyer de l'INSA Strasbourg, j'ai également eu le grand plaisir de rencontrer et de me lier d'amitié avec M. Christophe Bagieu, le second auteur de ce livre. Christophe est à sa manière un visionnaire de l'éducation technique et de la topographie en général. Un homme passionné et passionnant pour tout ce qui touche à l'acquisition de la donnée 3D et à son traitement, avec cette farouche volonté de transmettre cette passion à ses élèves du lycée Cantau à Anglet. Preuve en est le nombre d'étudiants BTS MGTMN et licence

GEO 3D diplômés du brevet de télépilote de drone professionnel qui avoisine les 300 en ce début d'année 2023.

Il fait régulièrement intervenir chaque constructeur de matériels topographiques dans son école ainsi que les éditeurs des logiciels de traitement de la mesure. Voilà un procédé bien rodé pour se tenir informé, en plus des salons et autres évènements digitaux, des toutes dernières avancées sur la 3D.

Il aura suffi d'une rencontre pour que ces deux talents décident de vous concocter ce bel ouvrage, à conserver c'est certain dans son bureau et sur sa table de chevet.

Lorsque Christophe m'a demandé d'écrire cette préface, je me suis légitiment posé cette question : pourquoi écrire un tel livre aujourd'hui, alors que manifestement toutes les technologies ne sont pas encore abouties ? Ou il y a 5 ans, quand bon nombre de cabinets de géomètres-experts, topographes, bureaux d'études et architectes se sont mis à utiliser et souvent à acquérir des scanners (LiDARs terrestre ou aérien sur drone) ? Surtout qu'en parallèle, grâce à la démocratisation du drone, on a vu exploser le recours à la photogrammétrie. Cette dernière n'avait pas disparu, mais restait l'apanage de quelques spécialistes et initiés, les prises de vues étant la plupart du temps effectuées sur des surfaces très importantes, impliquant un traitement long et une restitution sur plan en adéquation.

Et certaines évidences me sautaient aux yeux :

- Nous avons concrètement atteint depuis 2021 le point de jonction entre le monde du LiDAR et celui de la photogrammétrie, annoncé depuis longtemps comme le meilleur des deux mondes par un grand monsieur et ami, M. Michel Kasser.
- Le besoin récent mais urgent de rappeler les principes fondamentaux de l'acquisition et du traitement des données à tout le monde, des utilisateurs (géomètres, architectes, bureaux d'études bâtiments, BIM modeleurs) jusqu'aux non-initiés (donneurs d'ordre, maîtres d'ouvrage, chefs de chantier) puisque la *data* apparaît de plus en plus facile à appréhender, voire donne l'illusion d'une maîtrise facile. Les égarements nombreux que l'on peut voir ça et là dans un reportage télévisé, d'une vidéo sur LinkedIn ou autre Facebook sont la parfaite illustration de cette dérive inquiétante. Inquiétante car illustrant un appauvrissement de la connaissance topographique en général, mais surtout parce qu'ils engendreront avec certitude des contentieux dans un avenir pas si éloigné.
- La diffusion, par les jeux vidéo d'abord, puis de manière plus générale, des casques de réalité virtuelle et autres logiciels de réalité augmentée, a permis à un public professionnel pas obligatoirement averti de découvrir la 3D autrement. Plus simplement, la diffusion sur les réseaux sociaux (professionnels ou non) de vidéos de modélisation d'ouvrages d'art et de bâtiments a démocratisé le recours à la maquette numérique, voire à l'utilisation du BIM (tel que conçu ou tel que construit).
- De plus en plus de décideurs veulent intégrer dans leur langage des notions comme *smart city*, *big data*, *blockchain*… sans vraiment savoir de quoi il s'agit.

À l'heure où la connaissance de notre environnement est primordiale, pour essayer de prédire *via* des modèles dynamiques les catastrophes naturelles et industrielles, d'enrayer les erreurs dites « humaines », l'approximation n'a plus sa place. Alors connaître c'est bien, comprendre c'est mieux, puisque connaître et comprendre font le savoir. Je vous propose donc de parcourir les pages suivantes, dans l'idée que ce livre vous permettra d'aller plus loin.

Sans vouloir vulgariser tous les thèmes abordés, il donnera les bonnes bases aux étudiants curieux, aux techniciens soucieux d'asseoir leur savoir, aux cadres ayant l'impression d'être parfois dépassés, aux patrons d'entreprises qui doivent deviser, rechercher des missions, appréhender les méthodes d'acquisition et de traitement et réussir la transformation du numérique, aux donneurs d'ordre qui ont le souci de comprendre les missions proposées par les professionnels de la 3D, et peut-être aux plus anciens qui veulent comprendre cette fameuse évolution numérique, qui ressemble à s'y méprendre à une Révolution.

Bonne lecture !

Bertrand CLERGEOT
Géomètre-expert
Président de la commission Expertise de la mesure
de l'Ordre des géomètres-experts

SOMMAIRE

Préface V

Avant-propos XIII

Chapitre 1 • Le nuage de points 1

1. Une capture de la réalité en 3D 2

2. Les techniques d'acquisition 5

La photogrammétrie 5

La lasergrammétrie 7

Des techniques complémentaires 9

3. Les spécificités d'un nuage de points 10

La densité 10

L'incertitude des mesures 12

Les occlusions 12

L'absence d'informations sémantiques… 13

… mais des données complémentaires 14

Les formats de fichiers 18

4. Le géoréférencement 19

Les géoréférencements direct et indirect 20

La détermination des coordonnées de points caractéristiques 21

Les systèmes de coordonnées 24

5. Les points spécifiques pour le traitement des données 26

Les points homologues pour l'assemblage 27

Les points d'appui pour le géoréférencement 27

Les points de contrôle pour la validation du résultat 29

6. Les étapes clés d'une campagne de numérisation 3D 29

La reconnaissance du terrain 29

Le choix du système d'acquisition 29

Le paramétrage de l'appareil et la configuration du levé 29

Le contrôle du nuage de points 29

7. La modélisation à partir de nuages de points 30
Les types de modèles 30
Les préalables à la modélisation 30
La modélisation par maillage et par primitives géométriques 31
La modélisation d'objets paramétriques 33
8. En résumé 34

Chapitre 2 • La photogrammétrie 35
1. Un cas d'usage : la digue de l'Artha à Saint-Jean-de-Luz 36
2. Notions essentielles 42
La stéréoscopie 42
L'image numérique 43
L'appareil photographique numérique (APN) 49
Les paramètres géométriques internes de l'APN 50
La calibration de l'APN 53
Les réglages de l'APN : les aspects radiométriques 55
La précision du levé et la taille du pixel objet 58
3. L'acquisition des données et le protocole de contrôle 59
Préparer le relevé 59
Établir le protocole de contrôle 59
Paramétrer le recouvrement des images 62
4. Des images au nuage de points 64
Le process 65
Les contrôles et les vérifications 68
5. Typologie et exemples 69
Photogrammétrie aérienne par drone (UAV) 69
Photogrammétrie terrestre 78

Chapitre 3 • La lasergrammétrie 85
1. Un cas d'usage : la tour Heinrich des Ponts Couverts de Strasbourg 86
2. Notions essentielles 91
La mesure par balayage laser 91
Les principales caractéristiques 93
3. L'acquisition, le traitement des données et le protocole de contrôle 99
Le repérage 99
Le paramétrage de l'appareil et la configuration du levé 99
La consolidation 100

Le géoréférencement des nuages de points 103
Les contrôles 104
4. Typologie et exemples 105
Lasergrammétrie terrestre statique 106
Lasergrammétrie terrestre dynamique 114
Lasergrammétrie aérienne 119

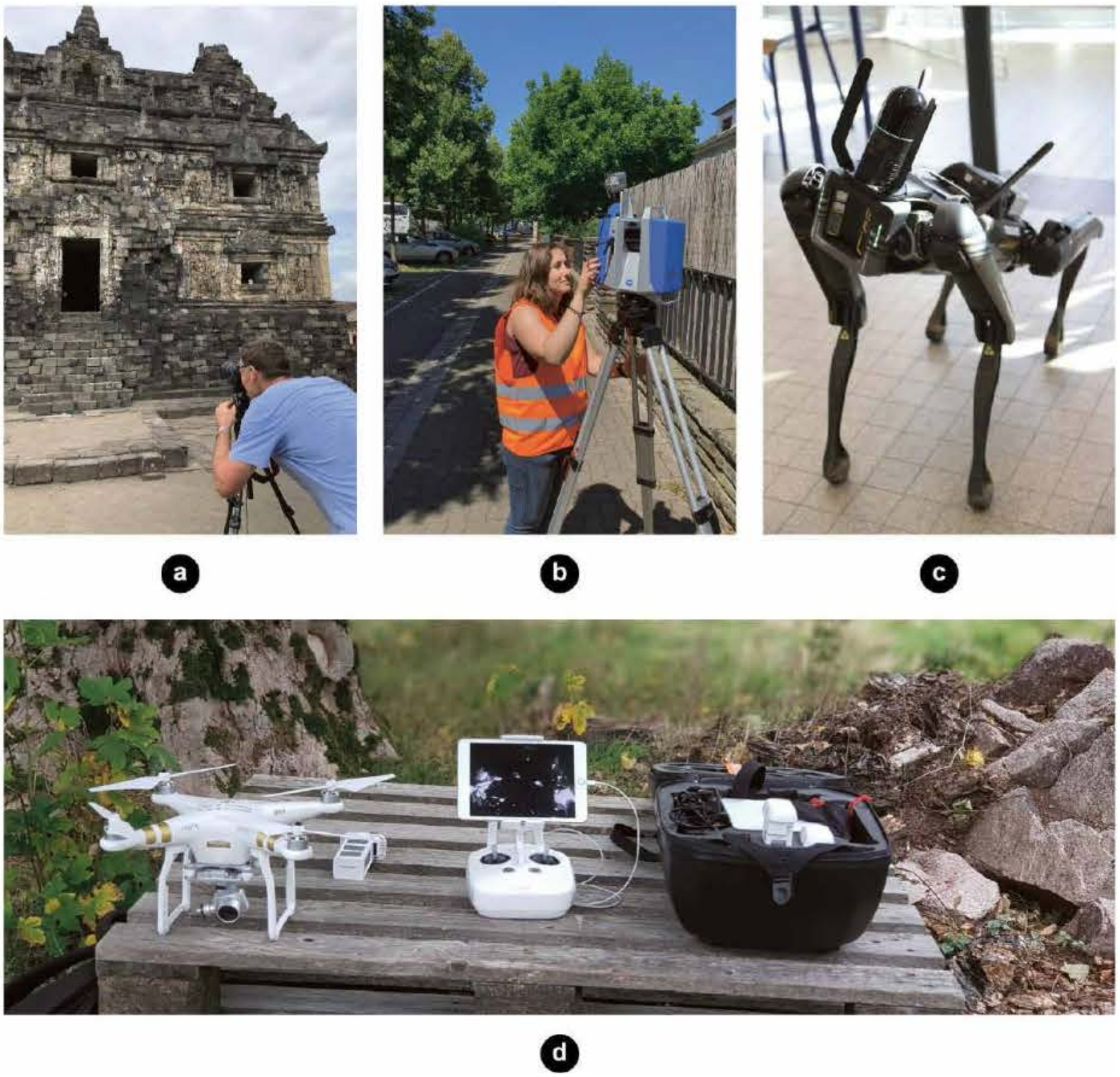
Chapitre 4 • Du nuage de points aux livrables en 2D et 3D 127

1. Le contrôle du nuage de points 128
2. Nettoyage et rééchantillonnage 129
Suppression des points parasites 129
Réduction du nombre de points 131
3. Segmentation et classification 132
Définitions 132
Étude de cas 133
Algorithmes de segmentation et de classification 134
4. Extraction de vues en plan et de coupes, création d'orthoimages 137
L'extraction de vues en plan et de coupes 138
Les orthoimages 141
5. Création de modèles surfaciques 142
La modélisation par maillage 142
La modélisation par primitives géométriques 150
La modélisation hybride 151
6. Création de maquettes numériques 3D 152
À l'échelle du bâtiment 152
À l'échelle de la ville 153
Modélisation manuelle 155
Modélisation semi-automatique 156
7. Outils de visualisation 158
Visionneuses 3D 159
Exploitation de moteurs de rendu 3D 159
Exploitation de moteurs de jeux vidéo 160
Immersion en réalité virtuelle 162
Utilisation de la réalité augmentée 163
8. Stockage et exploitation des nuages de points 165
9. La synthèse 166

Chapitre 5 • Définir le besoin et établir le cahier des charges . 169

1. Définir l'usage du client et les besoins du projet 170
L'usage du client 170
Les besoins du projet 171
2. Déterminer le niveau de détail et le niveau de précision 172
3. Maîtriser la réglementation française sur les « drones » 174
4. Comprendre les spécificités juridiques de la mission 181
Les intervenants 181
La propriété des données 181
La fiabilité de la modélisation 3D 182
5. Établir le cahier des charges 183
Les systèmes d'acquisitions 187
Les traitements des nuages de points 187

Perspectives 187
Références 191
Index 195



Acquisition par : (a) photogrammétrie terrestre (appareil photo sur trépied) ; (b) lasergrammétrie terrestre (scanner laser sur trépied) ; (c) scanner laser dynamique (scanner laser sur robot) ; (d) photogrammétrie aérienne (appareil photo sur drone) (source : INSA)

Fig. 1.2

Le choix de la technique et de la technologie dépend de l'objet ou de la zone d'étude à numériser. Un système monté sur avion sera, par exemple, plus adapté à une numérisation à l'échelle de la ville. Le choix dépend également de la précision géométrique attendue. Les systèmes statiques permettent d'obtenir des nuages de points de meilleure qualité que les systèmes dynamiques.

En termes de **livrables**, le nuage de points constitue à lui seul un rendu intéressant car il fournit des informations géométriques sur la forme de l'objet et on peut y prendre des cotes, y mesurer des surfaces (fig. 1.3 a). Il sert surtout de base à l'extraction de divers types de produits :

- **livrables 2D** : création de profils, plans, coupes (fig. 1.3 b) ;
- **livrables 3D** : création de modèles numériques de surface, de terrain, de modèles 3D, de maquettes numériques de bâtiments (fig. 1.4).

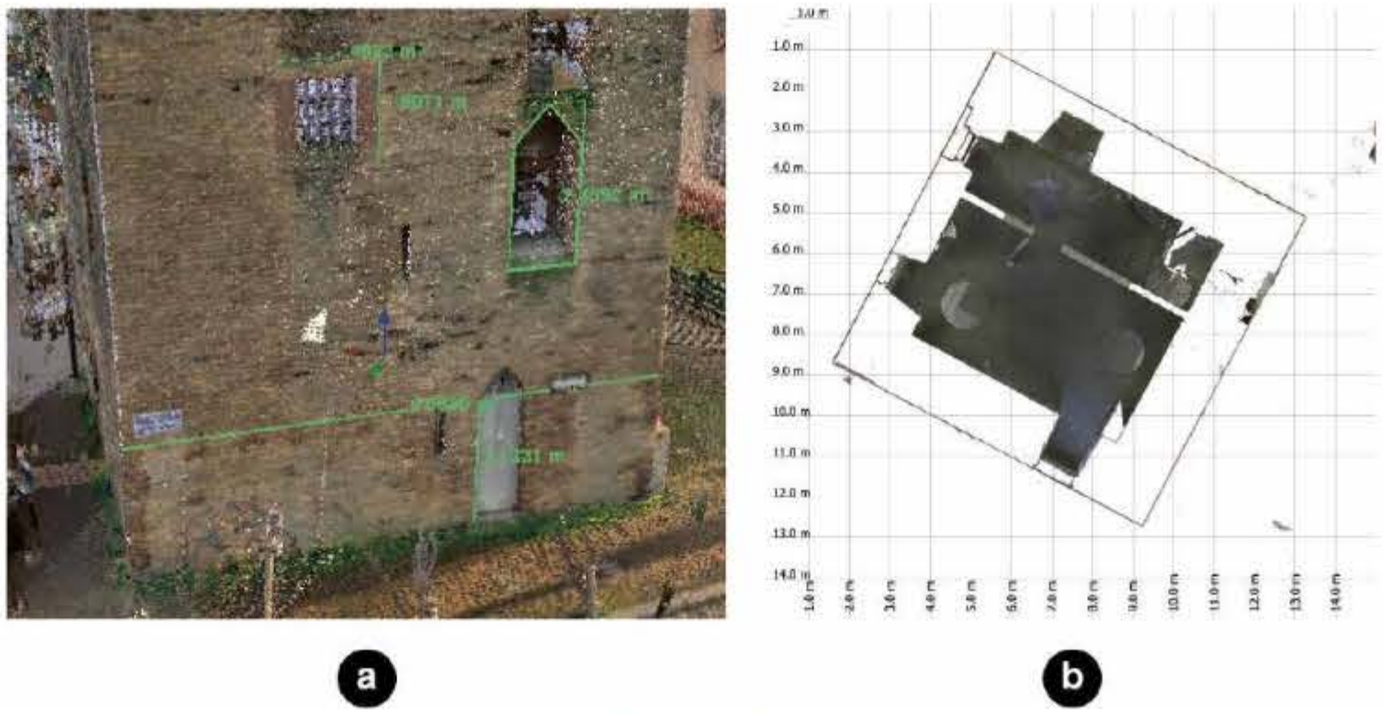


Fig. 1.3
Le nuage de points comme support de mesures (a) ou de création de coupes (b) (source : INSA)

Création d'une maquette numérique de bâtiment à partir d'un nuage de points et extraction de documents 2D (source : INSA)

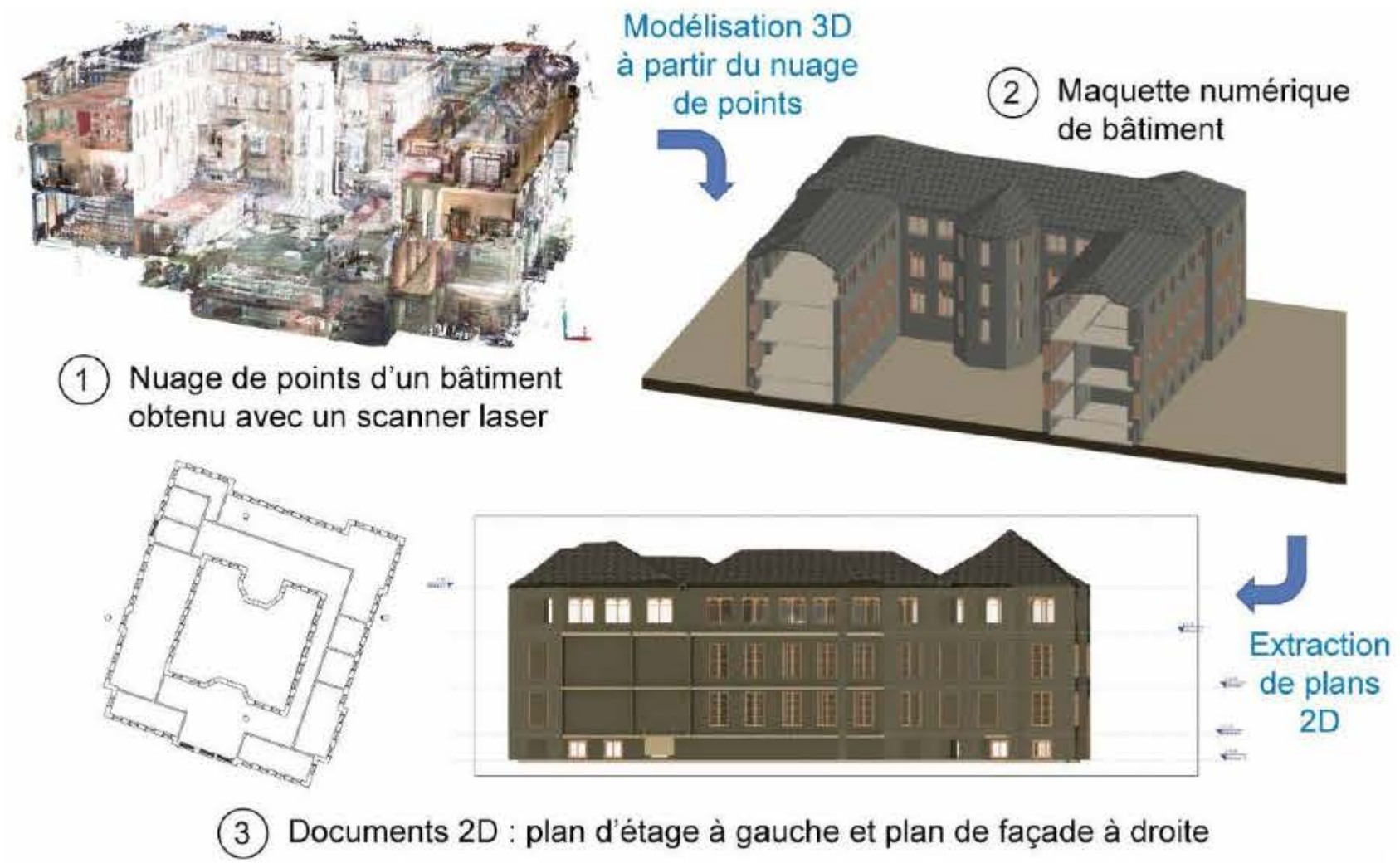


Fig. 1.4

La création de modèles à partir de nuages de points est appelée **modélisation**. Les livrables 3D se démocratisent de plus en plus avec l'amélioration des performances des ordinateurs et l'évolution des processus de travail tels que l'utilisation du processus BIM. À partir de modèles 3D, des documents en 2D peuvent toujours être extraits si nécessaire.

colorisés peut être généré. Par la suite, les images orientées pourront être exploitées pour texturer des modèles.

La photogrammétrie nécessite comme son nom l'indique de la lumière. Il est donc compliqué d'obtenir des résultats satisfaisants en cas de faible luminosité ou de masquage dû, par exemple, à la végétation ou, au contraire, lorsqu'il y a une forte surexposition de l'objet à numériser.

Images issues de vidéos

Certaines solutions photogrammétriques permettent de capturer une scène par le biais d'une vidéo, de la désynchroniser et d'en extraire les images nécessaires à une reconstruction 3D.

À noter, il sera de la responsabilité de l'opérateur d'effectuer les paramétrages adéquats de la vidéo pour une extraction d'images de qualité.

La lasergrammétrie

La **lasergrammétrie** est, quant à elle, une méthode dite **active** car le nuage de points est obtenu immédiatement et est directement à la bonne échelle. Pour chaque point, le **scanner laser** mesure la distance entre l'instrument et l'objet à l'aide d'un **rayon laser**. Les coordonnées sphériques (d, φ, θ) des points mesurés sont définies par rapport au centre du scanner (fig. 1.8).

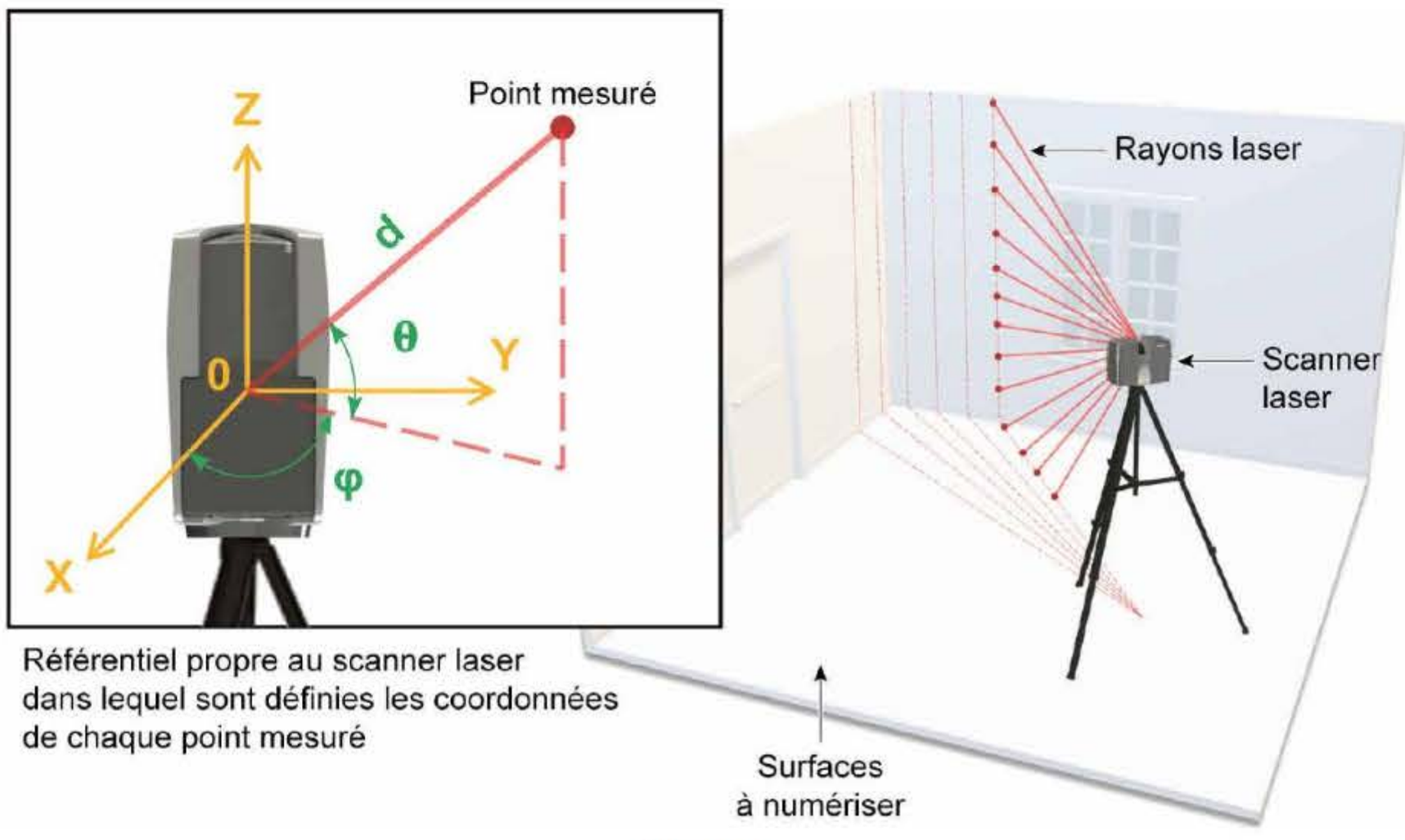


Fig. 1.8

Mesure des coordonnées sphériques (d, φ, θ) des points d'impact dans un référentiel centré sur le scanner (source : H. Macher)

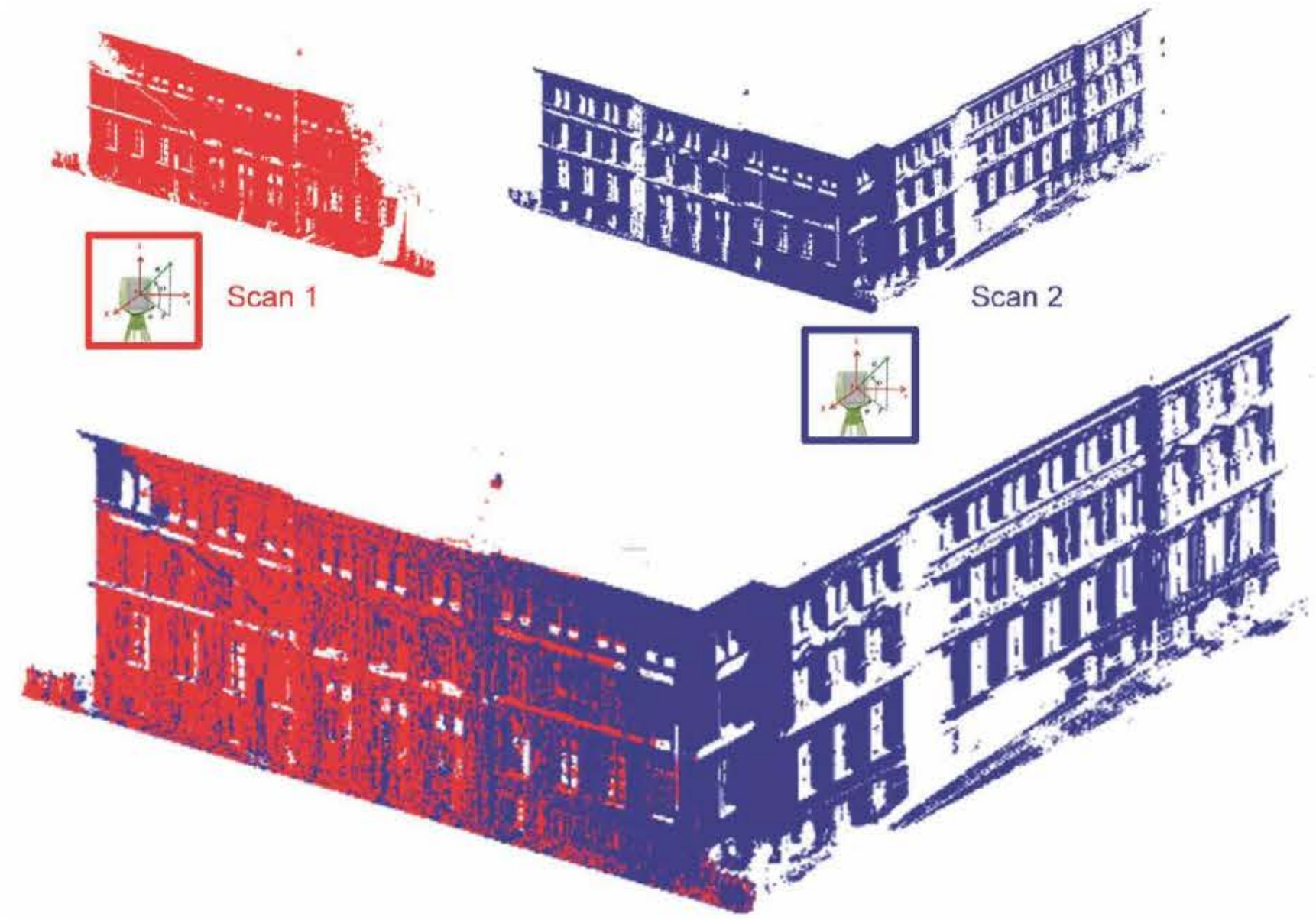


Fig. 1.10
Consolidation de deux nuages de points acquis à partir de deux stations de balayage laser (source : H. Macher)

La lasergrammétrie est une solution plus simple mais dont le coût d'investissement reste important. De plus, pour attribuer une information de couleur aux points du nuage, les scanners laser doivent être équipés d'appareils photographiques. Ces derniers sont généralement de moins bonne qualité que ceux utilisés pour les travaux photogrammétriques.

Le choix de la technique dépendra du **cahier des charges** (précision espérée, détails à représenter, qualité de l'information de couleur…) et de la surface de l'objet ou de la zone à numériser.

Des techniques complémentaires

La photogrammétrie et la lasergrammétrie peuvent être complémentaires et utilisées pour un même projet de numérisation. Par exemple, la figure 1.11 présente les nuages de points intérieur et extérieur d'une église. Le nuage de points extérieur a été obtenu par photogrammétrie aérienne (drone), technique particulièrement intéressante pour l'acquisition des toits. L'intérieur a, quant à lui, été numérisé avec un scanner laser, technique plus adaptée pour la numérisation d'espaces intérieurs. Il est possible d'assembler des nuages de points issus de ces différentes techniques de mesure.

On peut néanmoins y associer d'autres informations :

- **des données de couleur en RVB** (rouge, vert, bleu) : ces valeurs associées à chaque point du nuage sont extraites des photographies pour la photogrammétrie. Dans le cas de la lasergrammétrie, si le scanner est doté d'une caméra numérique, ces informations peuvent être extraites d'une image numérique acquise sur l'objet scanné. Le nuage de points reflète alors d'une manière plus réaliste l'objet considéré et il est plus facile d'identifier les éléments de la scène (fig. 1.16) ;

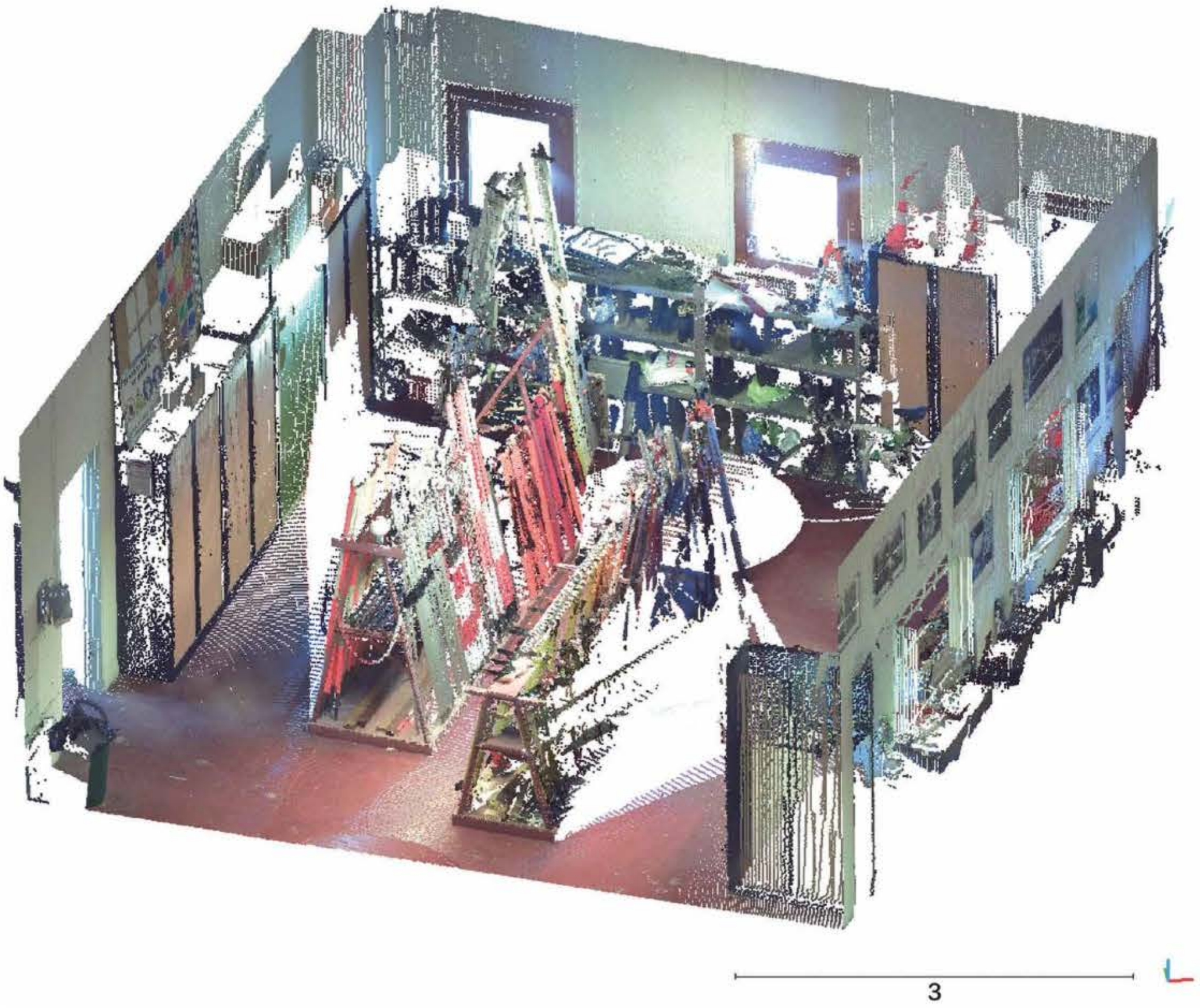


Fig. 1.16
Portion d'un nuage de points d'une pièce avec une information de couleur (RVB) (source : H. Macher)

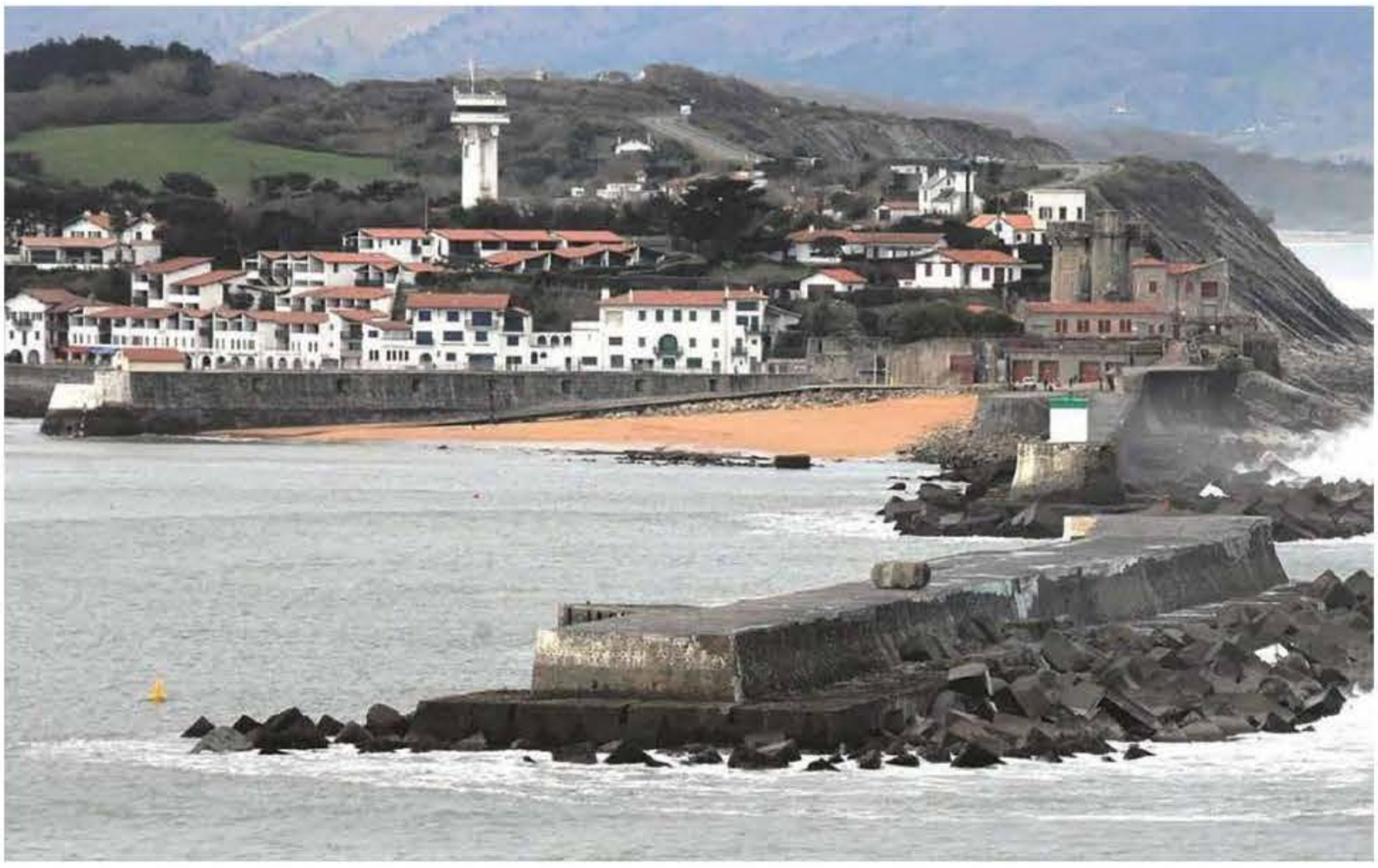


Fig. 2.2
Digue de l'Artha après une tempête
(source : droits réservés)

Le but de cette étude est d'être en capacité de mesurer les déplacements des enrochements qui bordent la digue. La numérisation 3D va permettre de mesurer et de visualiser ces changements.

Compte tenu des contraintes d'espace et de stabilité du lieu, le choix de la technologie de mesure 3D s'est rapidement orienté vers la photogrammétrie aérienne par drone.

Pour cette mission, c'est le modèle de drone Phantom 4 Pro V2.0 de DJI qui a été utilisé (fig. 2.3).



Poids	1375 grammes
Autonomie	30 minutes
Batterie	5870 mAh
Système de positionnement satellise	GPS, GLONASS
Stabilisation	3 axes

Caractéristiques techniques du capteur photo embarqué :

Technologie du capteur	CMOSS 1" 8,8*13,2mm
Pixels effectifs	20 Mpx
Sensibilité ISO	De 100 à 6400 iso
Ouverture	f/2.8 - f/11
Vitesse d'obturation max	1/8000 s
Format enregistrement photo	JPEG, DNG (RAW)
Objectif	Equivalent 35mm

Fig. 2.3
Drone Phantom 4 Pro V2.0
(source : DJI, dji.com)

Un appareil photo numérique reflex standard propose en général une définition de 6 016 × 4 016, soit 24 mégapixels.

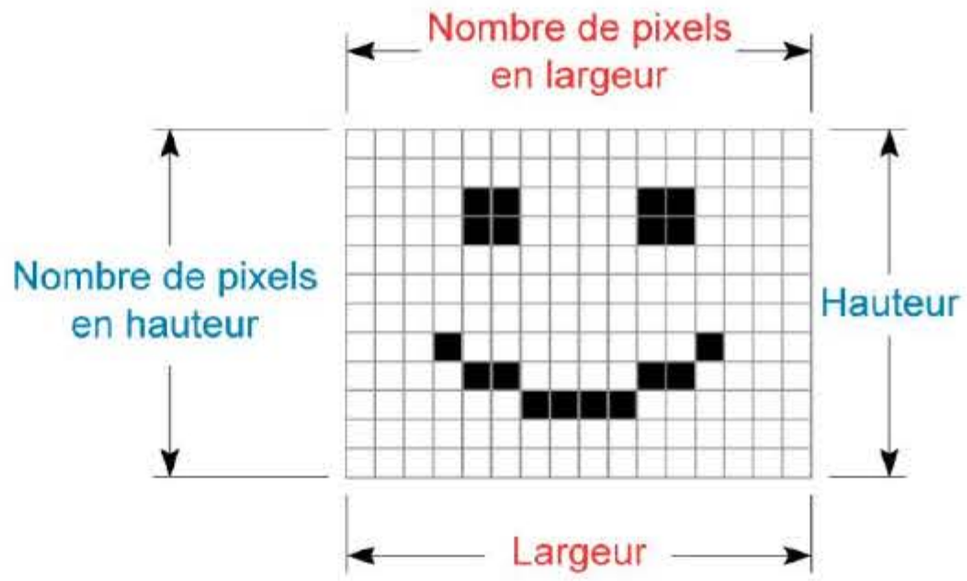


Fig. 2.12
Définition de l'image

- La **colorisation** de l'image : l'appareil photo numérique (APN) peut acquérir une image en nuances de gris en codant chaque pixel par un nombre fini de valeurs entre le noir et le blanc (de zéro à 255 nuances, fig. 2.13). Ce sont les cellules photoélectriques (photosites) du capteur qui transforment la lumière reçue en signal électrique.

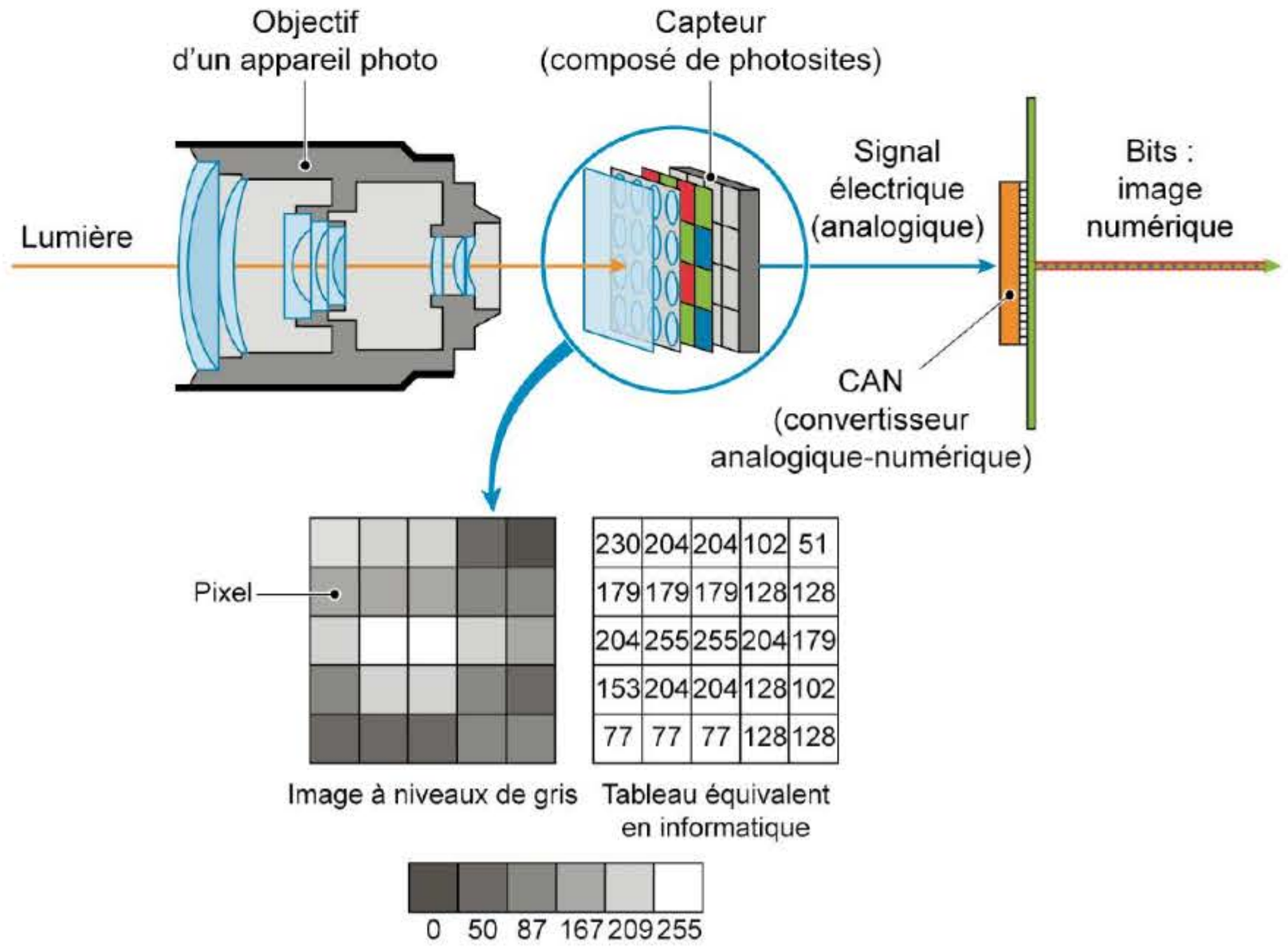


Fig. 2.13
Nuances de gris

Suivant le même principe, l'APN peut réaliser une acquisition colorisée pour chaque pixel en synthétisant et codant les trois couleurs primaires (fig. 2.14) : le rouge, le vert et le bleu (RVB ou RGB, *Red Green Blue*).

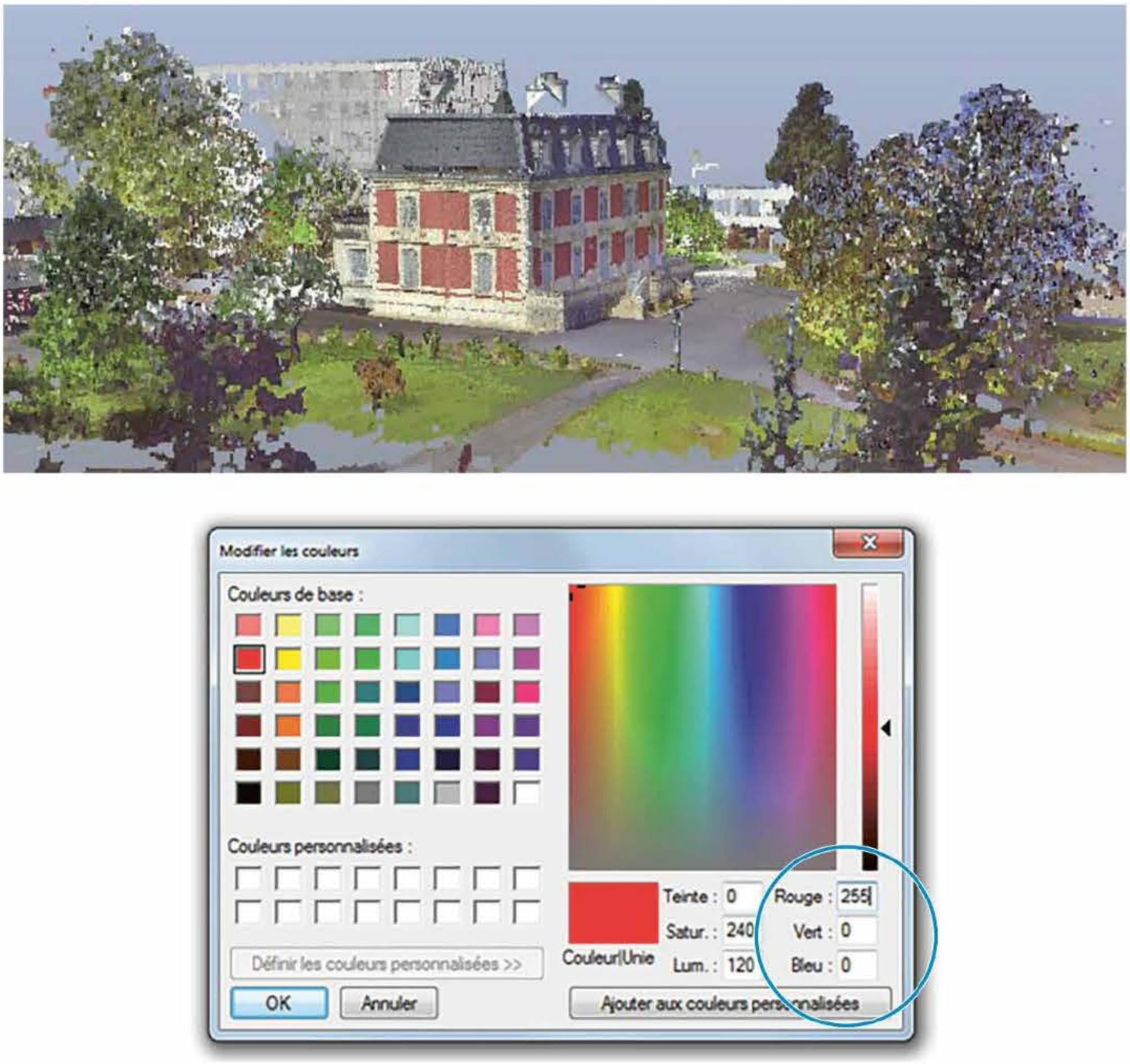
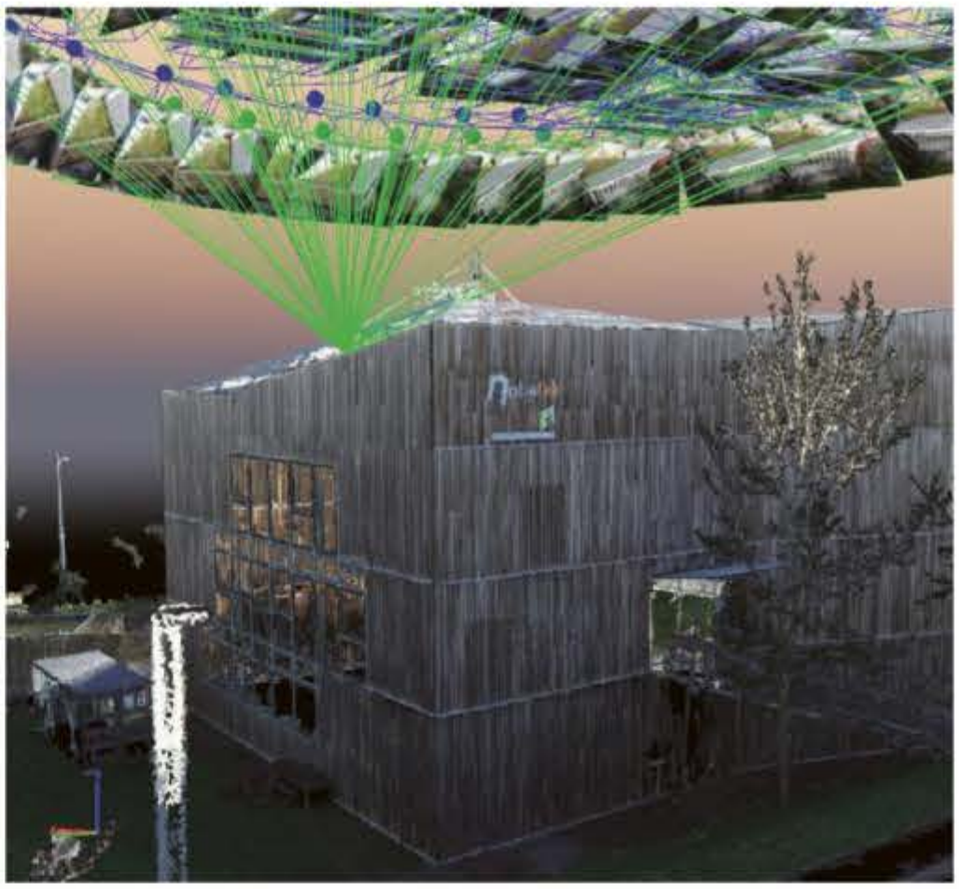


Fig. 2.14
Gamme de couleur du pixel
(source : Chr. Bagieu)



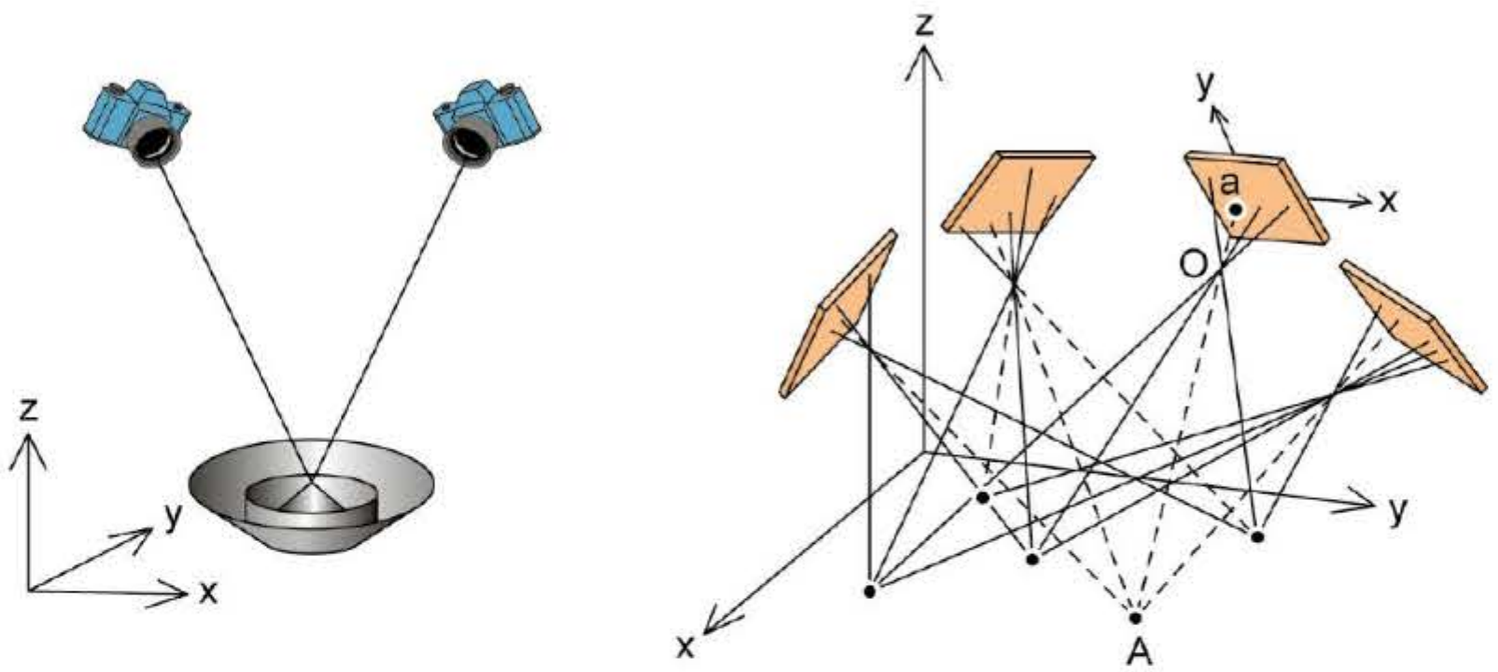


Fig. 2.45
Corrélation épipolaire dense

La fenêtre de corrélation (fig. 2.46) correspond à un point caractéristique qui sera recherché sur l'ensemble des autres images du projet. Lorsque des valeurs similaires sont retrouvées, l'appariement entre photographies est rendu possible, le point caractéristique devient alors **point homologue**.

Ce principe de traitement informatique est d'autant plus efficace que les valeurs des pixels sont précises et correctement transformées par le capteur de l'APN. Ce travail de calcul réalisé par le logiciel peut demander un temps de traitement conséquent.

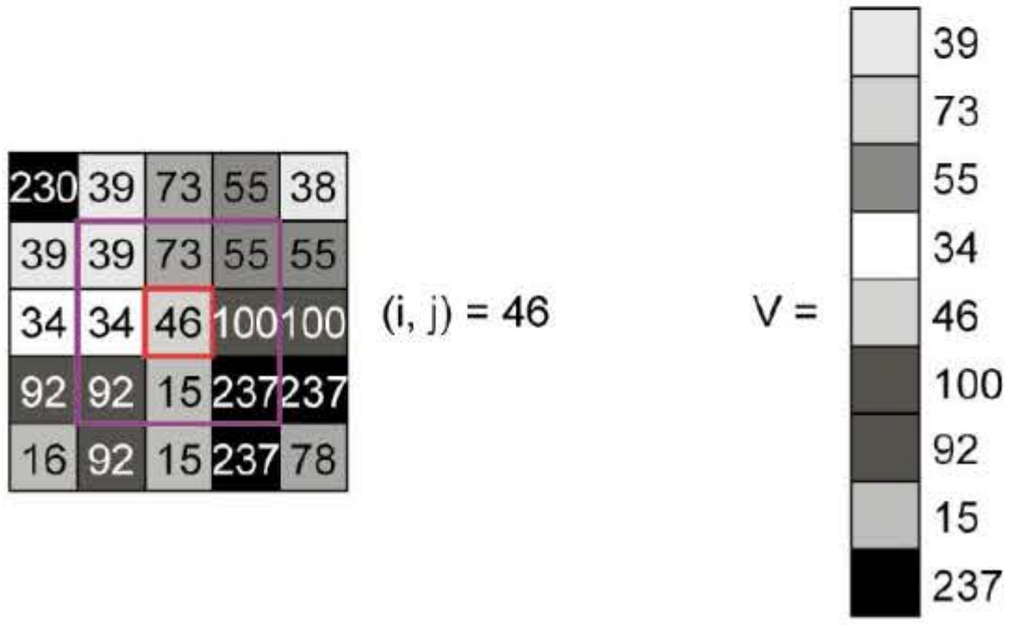


Fig. 2.46
Fenêtre de corrélation SIFT sur des pixels avec des valeurs de colorisation en nuance de gris.

L'orientation absolue (ou validation des points de contrôle)

Il s'agit de l'étape qui permet de basculer d'un modèle relatif (système de coordonnées local) vers un système de coordonnées connu et de mettre à l'échelle le nuage de points (fig. 2.47). On utilise le **géoréférencement direct ou le géoréférencement indirect** (voir chapitre 1).

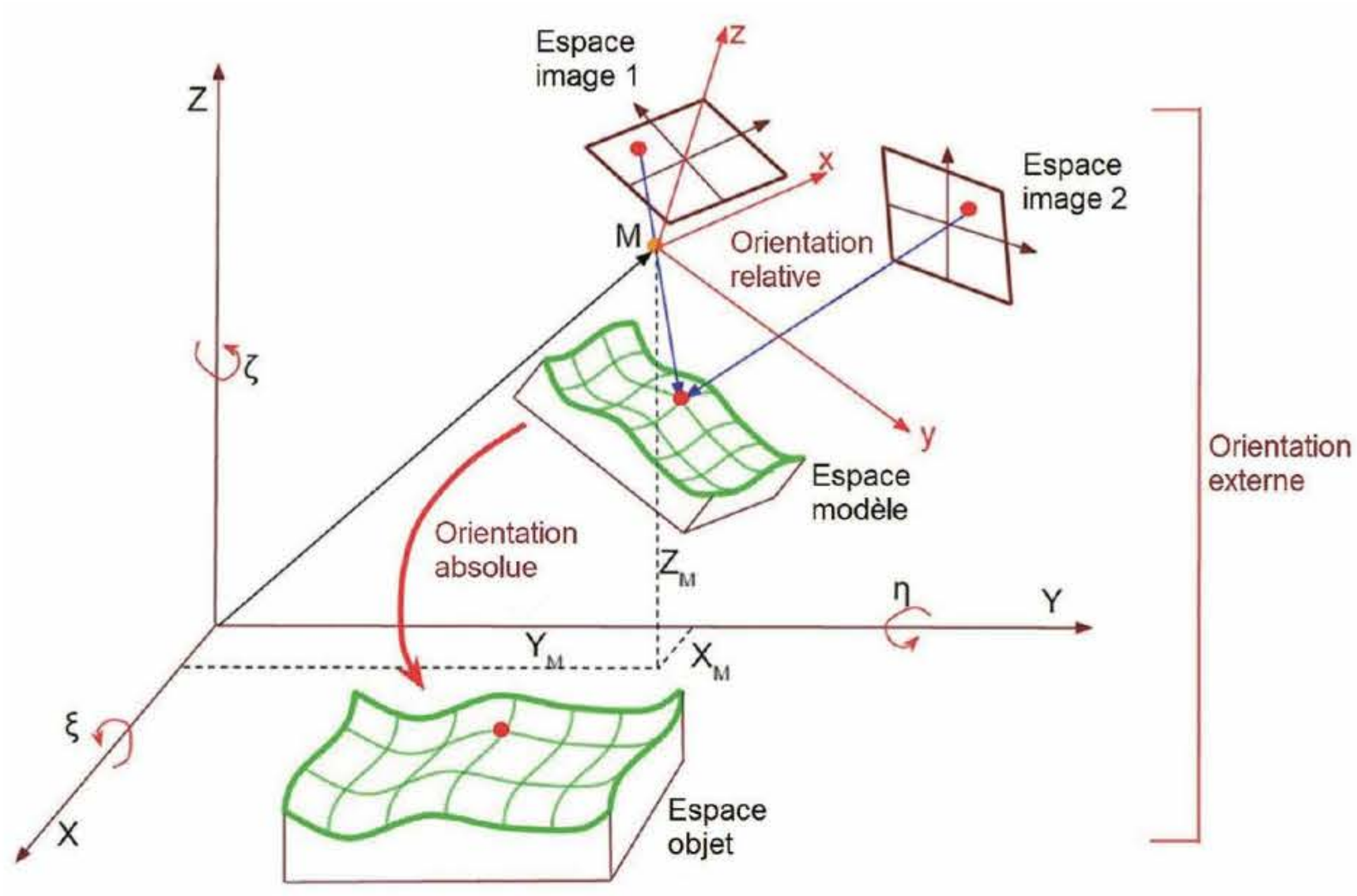


Fig. 2.47
Illustration de l'orientation externe
(source : A. Murtiyoso d'après Luhmann et al., 2014)

Les contrôles et les vérifications

Attention c'est à cette étape qu'il est primordial de vérifier la qualité du travail réalisé par le biais des listings des GCP et CP (voir fig. 2.39).

Les trois étapes du traitement photogrammétrique sont maintenant terminées. Une fois le contrôle réalisé, il est possible de récupérer des livrables comme le nuage de points, le MNS et une ortho-image.

Le contrôle du géoréférencement est le second contrôle à effectuer. Les logiciels fournissent en général les écarts résiduels entre les coordonnées théoriques des points d'appui et les coordonnées de ces points dans le nuage de points géoréférencé (fig. 3.20).

		Result
Known targets	A49	1.97mm
Known targets	C2	2.04mm
Known targets	C54	2.11mm
Known targets	C3	2.61mm
Known targets	B70	3.61mm
Known targets	A52	4.14mm
Known targets	A50	5.16mm
Known targets	C56	5.34mm
Known targets	2001	5.65mm
Known targets	C4	5.80mm
Known targets	B53	9.01mm
Known targets	C57	10.22mm
Known targets	B52	12.02mm

Fig. 3.20
Évaluation du géoréférencement : étude des écarts résiduels (logiciel Z+F LaserControl®)

L'absence de ce contrôle peut entraîner des erreurs (décalages) si, par la suite, on souhaite combiner plusieurs types de données exprimées dans un même système.

4. Typologie et exemples

Il existe différents types de systèmes d'acquisition par lasergrammétrie (fig. 3.21) :

- depuis le sol, on parlera de **lasergrammétrie terrestre**. Le balayage laser peut être effectué à partir d'une station fixe (lasergrammétrie terrestre statique) ou d'une plate-forme mobile (lasergrammétrie terrestre dynamique) ;
- depuis les airs, on parlera de **lasergrammétrie aérienne**.

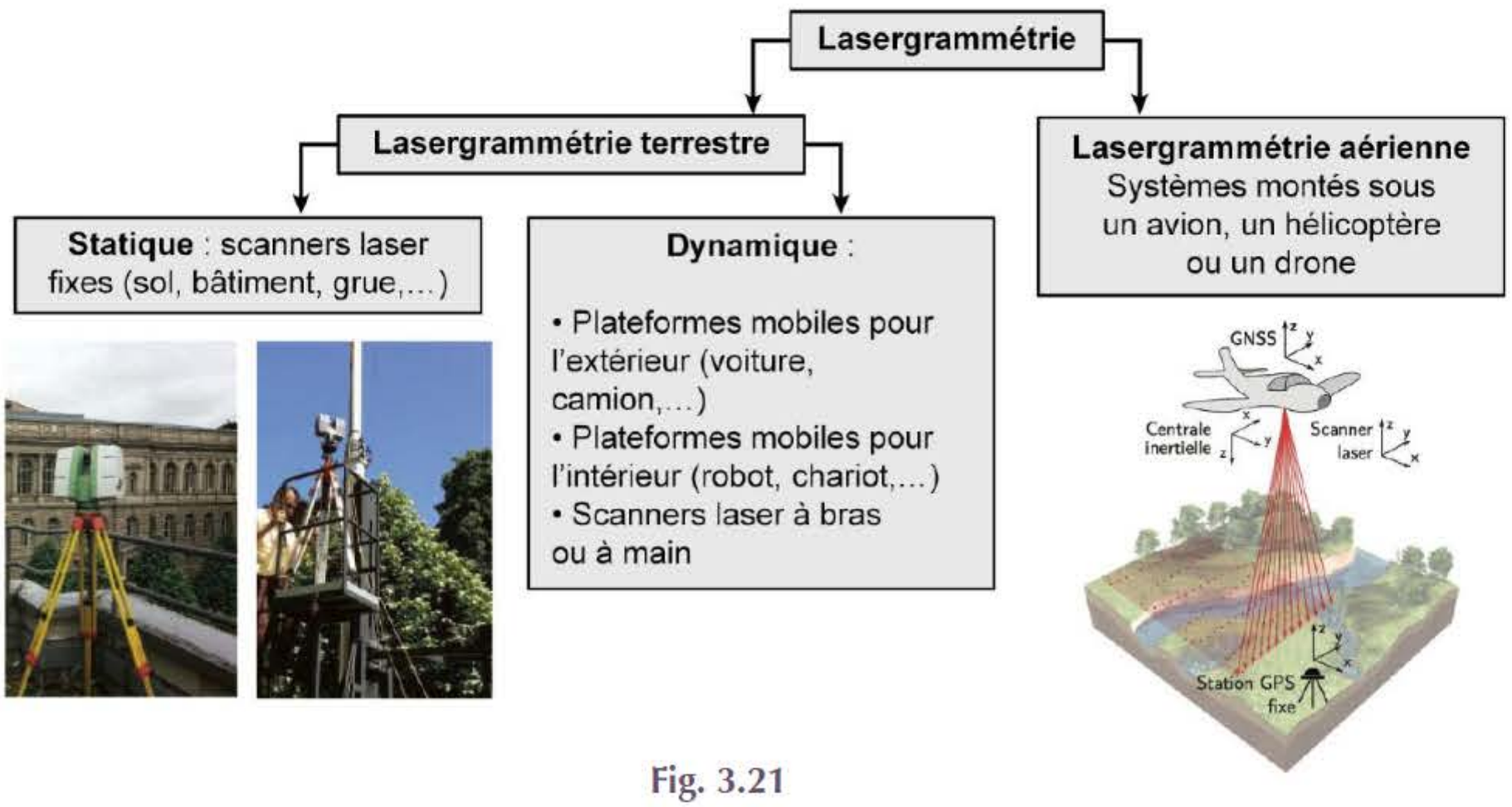


Fig. 3.21
Classification des systèmes d'acquisition par lasergrammétrie (source : H. Macher)

Lasergrammétrie terrestre dynamique

Lorsque le scanner laser est embarqué sur un système mobile, on parle de système dynamique. Des capteurs supplémentaires sont nécessaires pour déterminer la trajectoire du scanner et ainsi obtenir un nuage de points cohérent.

Avec de tels systèmes, la phase de consolidation n'est pas nécessaire, un nuage de points global est obtenu directement. Il est cependant primordial d'en contrôler la qualité.

Il existe des systèmes dynamiques de précisions différentes mais à l'exception des bras de mesure (mesure très précise de petits objets), ils produisent tous des nuages de points de moins bonne qualité et de densité moindre que les scanners statiques. Ils présentent néanmoins l'avantage de proposer des acquisitions rapides.

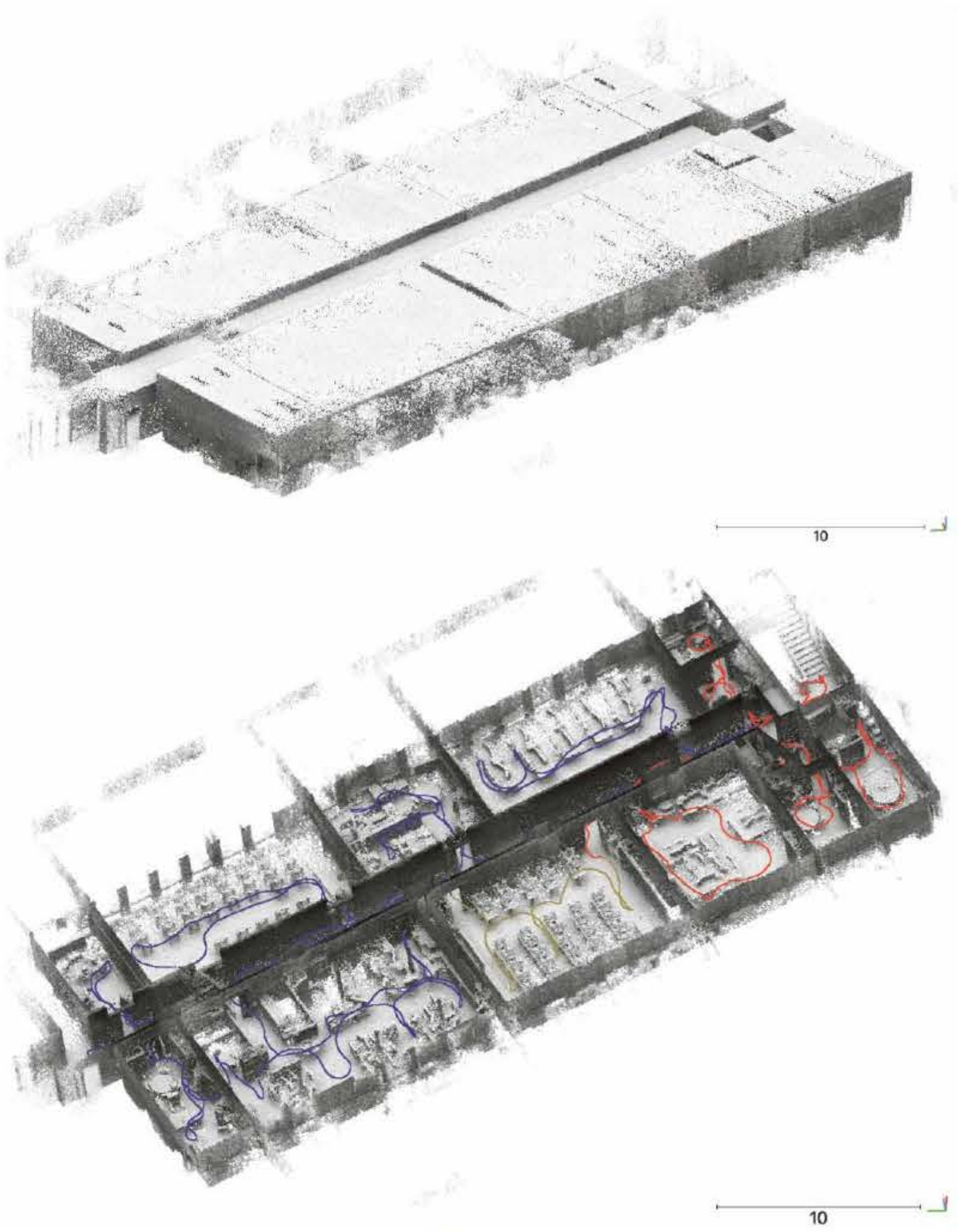
Systèmes mobiles en extérieur

Des systèmes d'acquisition mobiles ont d'abord été développés pour les relevés d'extérieurs. Ces systèmes mobiles appelés aussi *Mobile Mapping Systems* (MMS) sont composés d'un ensemble de capteurs imageurs (caméras, scanners laser, etc.) montés sur un véhicule ; il s'agit du système de perception. À cela s'ajoute un système de localisation qui consiste en la combinaison de plusieurs capteurs : un système de positionnement par satellites (GNSS), une centrale inertielle (IMU, *Inertial Measurement Unit*) et des roues odométriques.



Fig. 3.30
Exemples de MMS : (a) MX50 (Trimble®), (b) Pegasus TRK (Leica)

De tels systèmes sont disponibles depuis plusieurs années et peuvent atteindre une précision de mesure de quelques centimètres. Ils permettent une acquisition rapide de zones étendues à condition que la collecte des données soit ininterrompue et que la plateforme mobile se déplace en continu.



Exemple d'un nuage de points obtenu à l'aide du scanner à main Zeb-Revo (Geoslam). La trajectoire du système dynamique est représentée en couleur. (source : INSA)

Fig. 3.32

Les scanners mobiles basés sur la technologie SLAM permettent des acquisitions rapides et faciles. Cependant, ces scanners produisent parfois des données peu fiables. En effet, les expérimentations montrent que la technologie SLAM peut entraîner des problèmes de dérive dans les levés linéaires. Il est fortement recommandé de réaliser des boucles lors des acquisitions pour corriger les dérives. De plus, la faible densité de points et le bruit dans le nuage de points par rapport au système statique empêchent l'utilisation de points de contrôle au sol pour les étapes de consolidation et de géoréférencement. Les scanners laser statiques fournissent des données avec une meilleure densité de points et avec moins de bruit, mais avec un temps d'acquisition plus long.

Scanners laser à bras ou à main pour l'acquisition d'objets ou de détails

Les scanners laser manuels fonctionnent sur un principe très proche des scanners à triangulation, mais permettent un déplacement plus flexible autour de l'objet. Ce sont des scanners mobiles qui se repèrent dans l'espace selon deux méthodes principales : soit à partir d'un bras mécanique articulé, soit à partir de l'objet.

Dans le cas des bras articulés (fig. 3.33), les nuages de points sont automatiquement référencés dans un système de coordonnées global, localisé au niveau de la base du bras du scanner. *Via* les orientations et translations que subit le bras, les six degrés de liberté (3° rotations + 3° translations) peuvent être déterminés. Les scanners envoient soit un faisceau unique, soit un plan laser, ce qui se traduit à la surface de l'objet par des profils laser, soit des lignes composées de milliers de points.

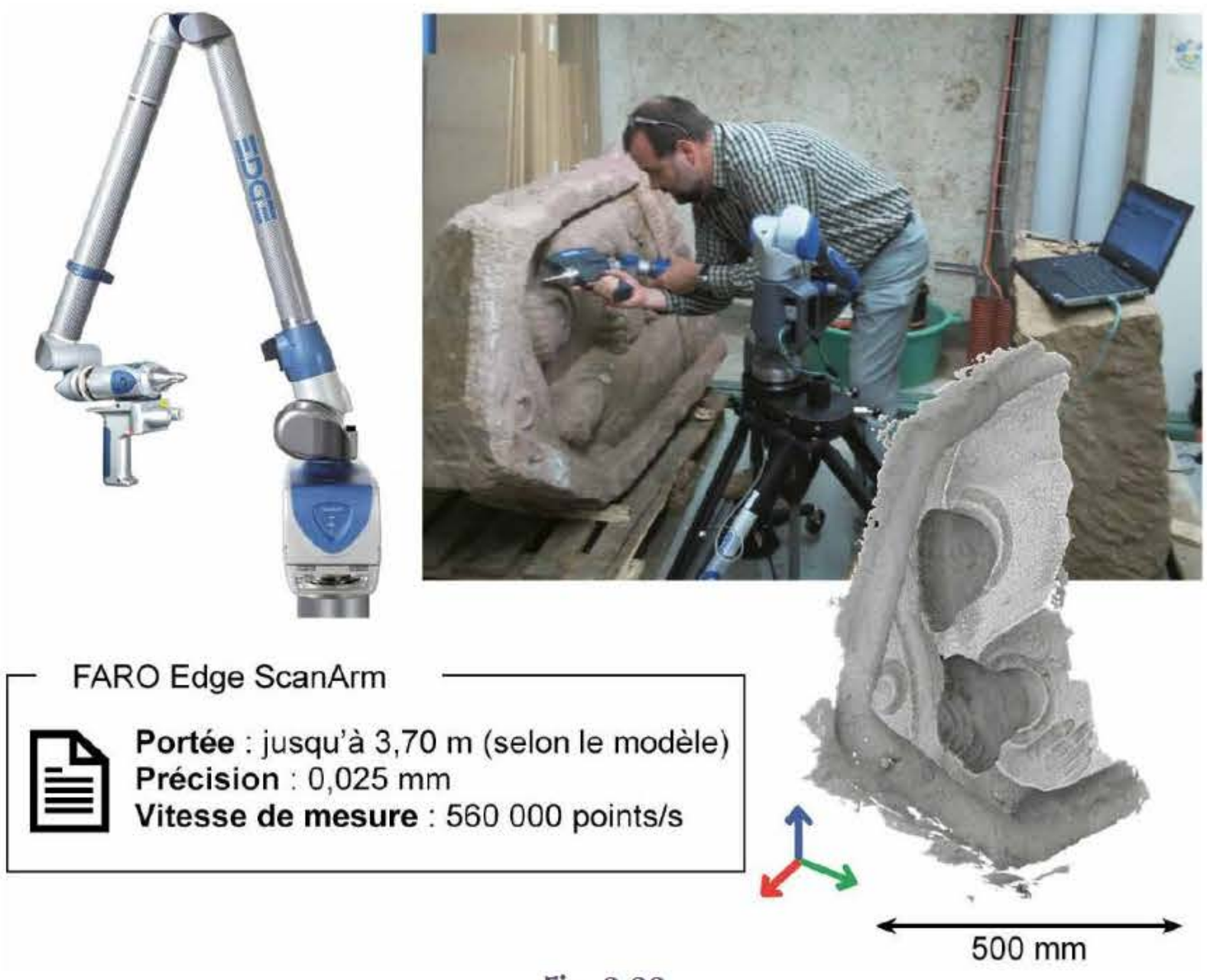


Fig. 3.33
Numérisation 3D d'une stèle avec le scanner à bras FARO® Edge ScanArm (source : H. Macher)

Les scanners laser à main sont quant à eux des instruments permettant une liberté totale de mouvement. La position du scanner dans l'espace est calculable par la connaissance de points de jonction entre deux nuages de points acquis successivement. Soit l'objet dispose d'une géométrie (texture) suffisamment variable pour que la jonction se fasse



Fig. 3.40

Extrait des données LiDAR classifiées produites par l'IGN (https://demo-lidar.ign.fr/?dataset=lidarhd-class&longitude=5.229079&&latitude=46.627263&range=1500)

Découvrir le programme LiDAR HD de l'IGN

https://geoservices.ign.fr/lidarhd



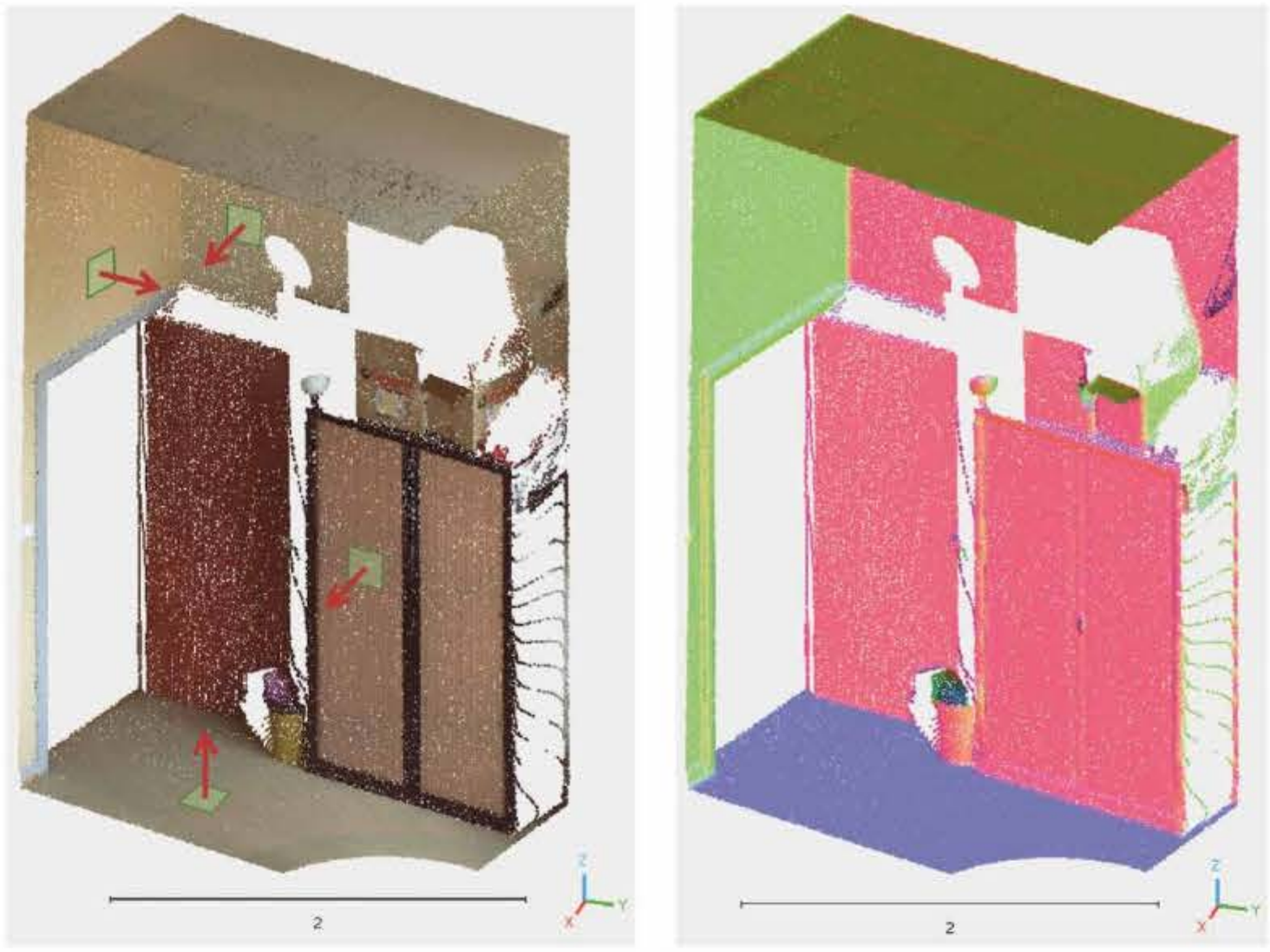


Fig. 4.7
Normales des points d'un nuage : (a) représentation de la normale pour quelques points ; (b) nuage de points colorisé en fonction de la normale aux points (CloudCompare). (source : H. Macher)

Attention, le calcul des normales des points du nuage peut s'avérer long et fastidieux si l'on dispose d'un nombre de points important.

La segmentation par reconnaissance de formes

Deux algorithmes issus du domaine de la vision par ordinateur sont largement utilisés lorsqu'il s'agit d'extraire des formes géométriques. Il s'agit du paradigme de **RANSAC** et de la **transformée de Hough**. Ces deux techniques ont fait leurs preuves pour la détection automatique de primitives géométriques (plans, cylindres, cônes…).

L'algorithme de RANSAC est plus adapté au traitement des données laser en termes de temps de traitement et d'insensibilité au bruit affectant les nuages. La figure 4.8 présente un exemple de segmentation basée sur la détection de plans par l'algorithme de RANSAC.

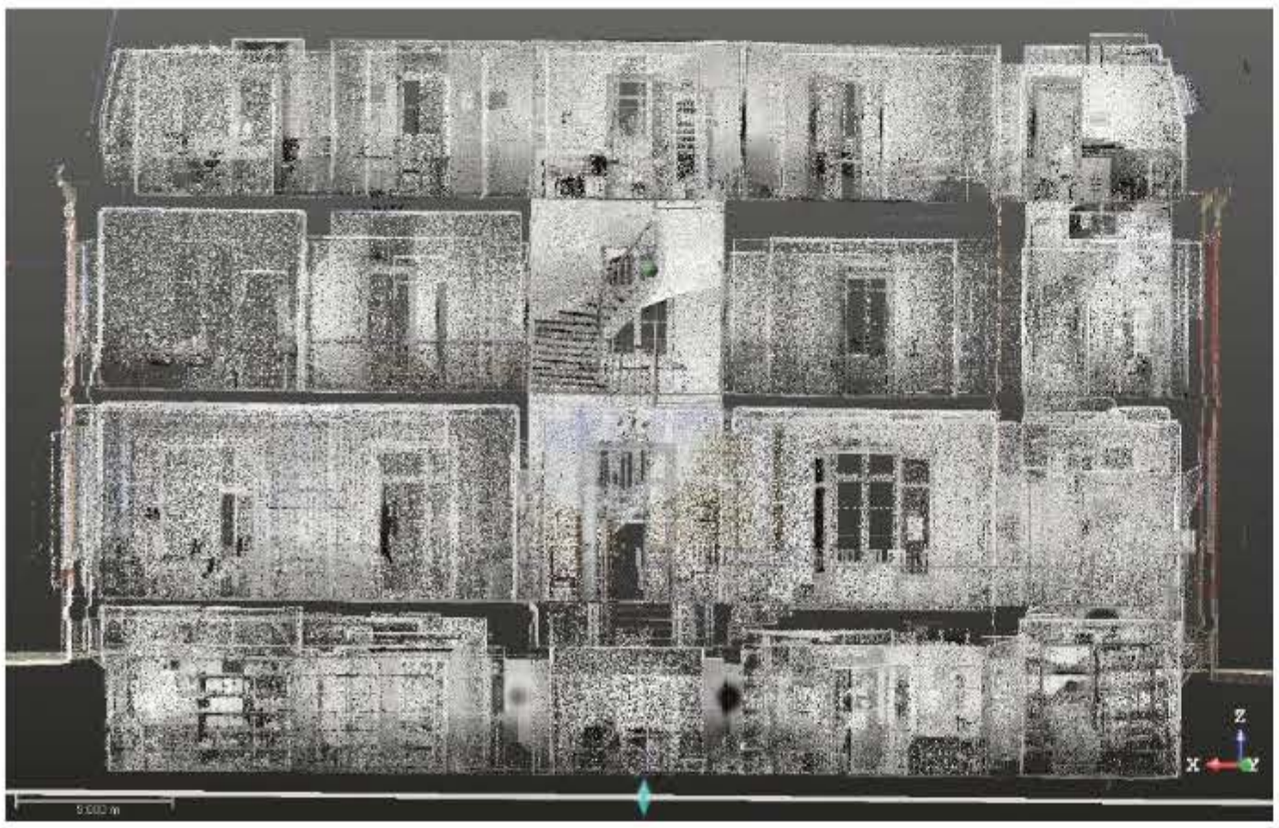
L'extraction de vues en plan et de coupes

Afin d'extraire des vues en plan et en coupes, des **boîtes d'extraction** (ou *clipping box*) sont créées (fig. 4.10). Ces boîtes sont paramétrables et peuvent être placées en tout endroit du nuage de points.

Création d'une boîte d'extraction dans le nuage de points du château de la cité scolaire (Trimble® RealWorks) (source : Chr. Bagieu)



Fig. 4.10



Il est important de bien appréhender la vue en 3D et de veiller à placer la boîte d'extraction en pensant à l'élément que l'on souhaite reproduire. Dans le cas de la figure 4.11, la boîte d'extraction a été placée afin de représenter une vue en coupe du bâtiment, il faut donc veiller à ce qu'elle soit parallèle aux façades du bâtiment.

Fig. 4.11
Création d'une vue en coupe du château de la cité scolaire
(source : Chr. Bagieu)

Chapitre

5

DÉFINIR LE BESOIN ET ÉTABLIR LE CAHIER DES CHARGES

Les besoins en termes de numérisation et modélisation 3D sont de plus en plus importants. Néanmoins, le niveau de maturité sur le BIM, la numérisation 3D et les connaissances de l'ensemble des interlocuteurs sont souvent disparates. Il est donc essentiel de réaliser un cadrage préalable à chaque étude.

Ce cadrage a pour but de :

- définir les usages présents et futurs du client ;
- choisir les livrables du projet et leurs moyens de stockage ;
- choisir les méthodes d'acquisition adaptées ;
- clarifier le contexte juridique qui en découle.

Ce cadrage doit prendre la forme d'une réunion préparatoire. Elle devra rassembler l'ensemble des intervenants et être conjointement menée par les maîtrises d'ouvrage, d'œuvre et l'expert en capture 3D. Elle doit permettre de clarifier le vocabulaire relatif au projet et vérifier que l'ensemble des intervenants utilise le même langage et lui donne le même sens.



Il est possible d'utiliser par exemple la méthode des « cinq pourquoi ? ». Il s'agit de poser de façon répétée des questions pertinentes commençant par un « pourquoi » afin de trouver la cause principale d'un projet (aussi appelée racine du projet) dans un contexte de gestion de la production. L'objectif est d'aller au-delà de la raison évidente du besoin, d'identifier les raisons les plus importantes de ce besoin et, par conséquent, d'aboutir à une meilleure réponse.

1. Définir l'usage du client et les besoins du projet

L'usage du client

Il est primordial de prendre le temps de définir certains points clés du projet relatifs à l'usage du client. Cet état des lieux permet de déterminer le contexte du projet, les attentes des acteurs et leurs ressentis. Il est nécessaire que le responsable de la capture de la réalité 3D connaisse les habitudes du client, ses connaissances dans le monde de la 3D, sa chaîne de production et les raisons pour lesquelles il se lance dans un tel projet.

À l'issue de l'entretien, il doit être possible de répondre aux questions suivantes :

- Quel sera l'usage du relevé par le client ?
- Quels sont les logiciels actuels ou futurs qui seront utilisés ?

- Quelles sont les caractéristiques du parc informatique de l'entreprise ?
- Qui sera l'utilisateur final ?
- Quelles sont les habitudes de l'entreprise sur ce type de demande ?
- Comment les données seront-elles stockées ?
- Y a-t-il des ressources humaines internes à l'entreprise pour « maintenir » à jour ces données ?

Ces questions n'ont pas toujours, en fonction des clients et de leurs projets, une réponse claire et immédiate. L'expertise des « sachants » doit permettre, par une approche proactive, d'y remédier par les conseils et l'expérience.

Les besoins du projet

Désormais, il faut clarifier les besoins propres au projet. Les questions suivantes peuvent aider à les identifier :

- Quel est le but du projet ?
- Pourquoi ? Pour qui ?
- Quels types de livrables sont demandés ?
- Quels contrôles seront réalisés ? Sous quelle forme seront-ils explicités ?
- Comment et par qui seront utilisés les livrables ?
- Quelle est la précision demandée sur les livrables ?

Par exemple, dans le cadre d'une rénovation d'un bâti ancien, le besoin peut varier du simple état des lieux des surfaces avec dessins des façades au montage de la maquette en 3D TCE (Tous corps d'état). L'acquisition de données sera donc conçue de façon à répondre à ce besoin de détails et donc de précision.

Il existe beaucoup de systèmes de mesure, que ce soit en lasergrammétrie ou photogrammétrie, qui permettent d'atteindre des précisions différentes en termes de géométrie 3D. Il n'est pas nécessaire d'adopter le système qui permet la meilleure précision dans tous les cas de figure. En effet, lorsqu'une précision importante n'est pas recherchée, certains capteurs, notamment des capteurs dynamiques, permettent des acquisitions plus rapides et donc un coût plus faible pour l'acquisition des données.



Il sera parfois possible d'anticiper les besoins ou de prévoir de montrer l'étendue du potentiel de ces nouvelles technologies en proposant une définition volontairement plus importante afin de donner des nouvelles pistes d'évolution du travail. Cette approche de type veille technologique peut permettre d'aborder de nouveaux marchés.

2. Déterminer le niveau de détail et le niveau de précision

Grâce à la connaissance des usages du client et des besoins du projet, il est possible de déterminer le niveau de détail et le niveau de précision de l'objet à modéliser.

Le concept de **niveau de détail** (LOD, *Level Of Detail*) correspond à la **quantité de détails** inclus dans un modèle 3D.

Le **niveau de précision** correspond à la précision avec laquelle un objet est modélisé (géométrie approximative ou géométrie précise des éléments).

Le niveau de détail et le niveau de précision d'un projet sont fondamentaux dans l'expression du cahier des charges pour déterminer en amont :

- quel système utiliser pour l'acquisition des données ;
- quelle est la densité du nuage de points nécessaire ;
- quelles sont les méthodes à utiliser.

En fonction de la phase d'un projet de construction, la quantité de détails et le niveau de précision requis dans la modélisation 3D sont différents (fig. 5.1).

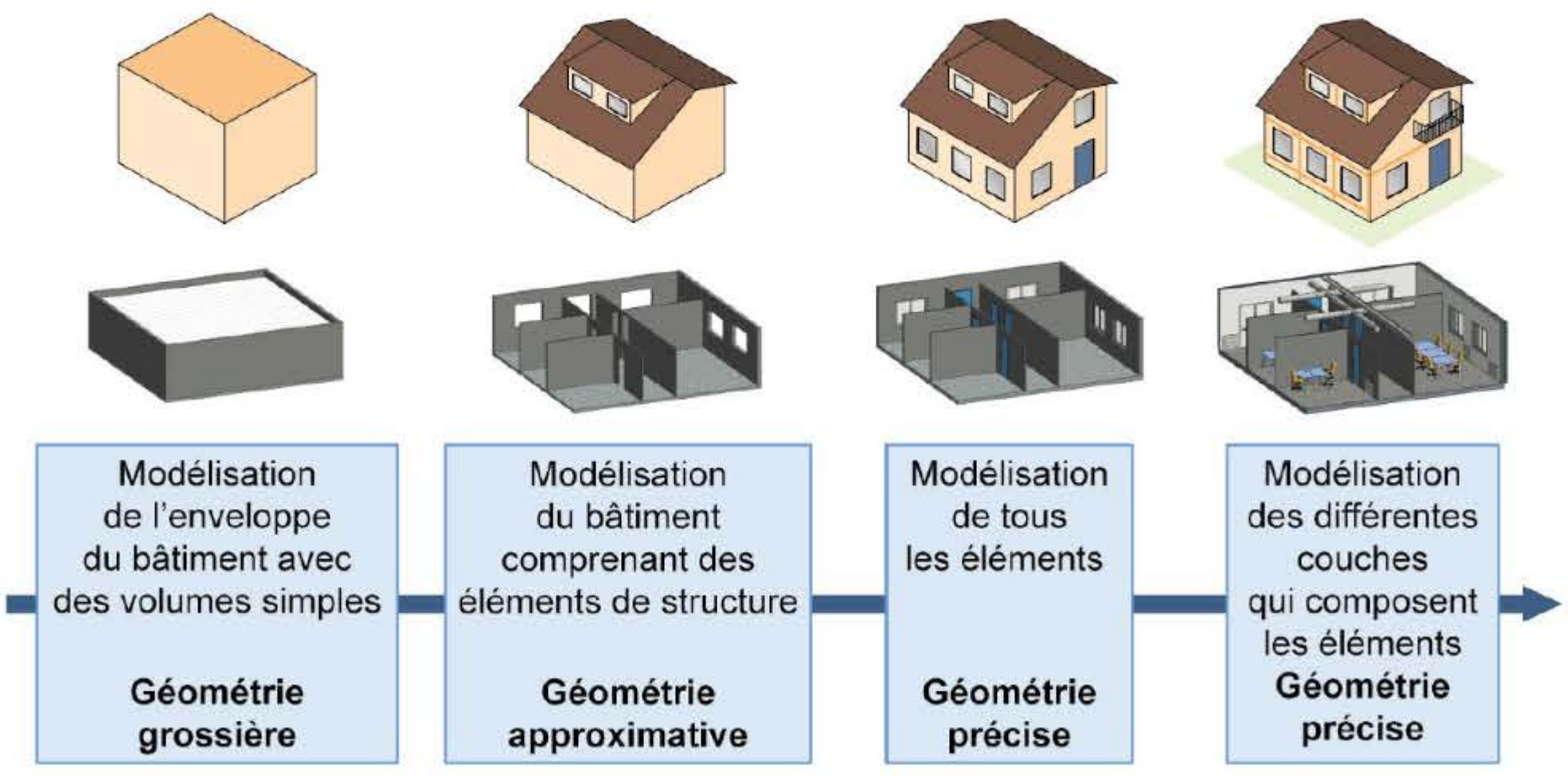


Fig. 5.1
Niveaux de détail et de précision pour différentes phases d'un projet de bâtiment

Dans le contexte d'une démarche BIM, la qualité d'un modèle est déterminée par le **niveau de développement** (ND, *Level Of Development ou LOD*) . Il s'agit du degré auquel la géométrie de l'élément et les informations qui y sont attachées ont été

PERSPECTIVES

Les systèmes d'acquisition

Les systèmes d'acquisition se sont développés de manière exponentielle ces dix dernières années. Les cadences de mesure se sont nettement améliorées ainsi que la qualité des capteurs (résolution). Parallèlement, les ordinateurs ont également beaucoup évolué et la tendance va certainement encore s'accélérer.

À l'heure actuelle, les systèmes mobiles fournissent des nuages de points de moins bonne qualité que les systèmes statiques mais cela tend à s'améliorer sans cesse.

Des systèmes multicapteurs se développent également, on parle d'hybridation des technologies. Dans ces systèmes, de nombreux capteurs sont associés et synchronisés. Ainsi, la photogrammétrie et la lasergrammétrie peuvent être utilisées dans un même processus d'acquisition, *via* un système unique qui se miniaturise de plus en plus.

Enfin, des systèmes robotisés autonomes sont développés pour l'acquisition des données. Ceux-ci permettent d'automatiser les processus d'acquisition. Il s'agit d'un domaine de recherche très actif. Par exemple, il est possible de fixer un scanner laser sur un robot chien ou un drone qui est capable de se repérer dans l'espace et de naviguer sans intervention humaine, simplement sous supervision.

Les traitements des nuages de points

Des évolutions sont en cours en ce qui concerne les traitements des données. Ainsi, lors de l'acquisition des données, certains traitements peuvent se faire directement sur site. Par exemple, pour les scanners laser statiques les plus récents, l'utilisateur peut effectuer la consolidation des nuages de points à l'aide d'une tablette dès l'acquisition – cela devient la norme.

L'évolution des espaces de stockage et des performances de calculs des ordinateurs permet le traitement de nuages de points toujours plus volumineux.

Numérisation 3D du patrimoine bâti

Acquisition des données, nuages de points et livrables

L'avènement du processus BIM *(Building Information Modeling)* dans le monde du bâtiment et des travaux publics révolutionne les pratiques et les usages professionnels. Le plus souvent, il fédère les intervenants autour d'une maquette numérique « telle que conçue » et donc modélisée nativement.

Dans le cadre d'un patrimoine bâti, c'est une maquette « telle que construite » qui sera utilisée. La création de ce modèle nécessite une **numérisation 3D** du bâtiment en amont car bien souvent la documentation n'est pas à jour ou inexistante.

Pour cette mission, il est nécessaire de réaliser un levé, de traiter les données, de contrôler les résultats, puis de délivrer les éléments nécessaires à la construction de la maquette numérique. L'acquisition de ces données est rendue possible grâce aux technologies de **lasergrammétrie** et de **photogrammétrie** qui permettent d'obtenir un **nuage de points** représentant la géométrie de la scène.

Conçu comme un guide pratique, cet ouvrage détaille les concepts théoriques et le fonctionnement des instruments de mesure permettant de capturer la réalité en 3D, les réglages et les contrôles permettant d'obtenir un nuage de points de qualité, puis l'ensemble des étapes de création des **livrables 2D et 3D** qui en découlent (consolidation, nettoyage, segmentation, classification, boîtes d'extraction…). Même si les instruments et les logiciels de traitement ne cessent d'évoluer et facilitent certaines étapes, le **contrôle** et la **qualification de la précision** restent indispensables. Seules de bonnes connaissances théoriques, une connaissance appropriée de l'environnement ainsi qu'une maîtrise fine des réglages permettront d'obtenir un rendu de qualité adapté au **cahier des charges**.

Ce livre s'adresse à tous les intervenants de la construction soucieux de comprendre les missions proposées par les professionnels de la **rétroconception** *(reverse engineering)*, mais aussi à tous les maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre qui doivent deviser, appréhender et analyser les méthodes d'acquisition et de traitement de leurs partenaires. Il intéressera également les étudiants et non-spécialistes qui souhaitent découvrir ces technologies de mesure 3D, en comprendre les principes, les avantages mais aussi les limites d'utilisation.

Découvrir le rendu 3D de la tour Heinrich

https://www.youtube.com/watch?v=7tRatlNzrI4&t=2s



Christophe Bagieu est enseignant au lycée Cantau d'Anglet en sections professionnelles et techniques de la filière Géomètre-topographe. Il a également participé à la création de la licence professionnelle GEO 3D qu'il co-encadre désormais.

Hélène Macher est enseignante-chercheuse à l'INSA Strasbourg au sein du département Génie civil et topographie (GCT) et membre du laboratoire ICube (équipe TRIO, groupe PAGE – Photogrammétrie architecturale et géomatique).

Au sommaire

1. Le nuage de points
2. La photogrammétrie
3. La lasergrammétrie
4. Du nuage de points aux livrables 2D et 3D
5. Définir le besoin et établir le cahier des charges

EDITIONS LE MONITEUR