

Modélisation 3D au service de l'inspection des ouvrages

FLAWINNE SEBASTIEN

Ingénieur des Ponts et Chaussées

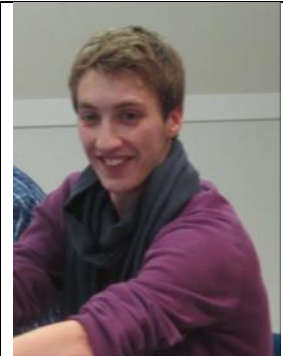
DGO1-65 - Direction de l'Expertise des Ouvrages

Rue Côte d'Or, 253 – 4000 LIEGE

Tél. : 04/231.64.43

Fax : 04/231.64.64

Email : sebastien.flawinne@spw.wallonie.be



Résumé

1. INTRODUCTION

Suite à l'évolution considérable ces dernières années des techniques de lasergrammétrie et photogrammétrie (et des capacités de calcul des ordinateurs), la mise au points de modèles 3D conséquents et de précision est devenue une possibilité accessible à tous. Les techniques de lasergrammétrie et photogrammétrie permettent désormais aux gestionnaires d'ouvrages de disposer de levés reprenant une quantité gigantesque d'informations par rapport aux autres méthodes. Un scanner 3D peut ainsi lever des millions de points en quelques minutes sur une distance de plus de 200 m avec une précision de quelques mm (< 5 mm). La photogrammétrie permet de travailler sur des distances très proches ou très éloignées (suivant qu'elle soit terrestre ou par drone), associée à une prise de mesures rapide et réalisable par chacun, pour une précision similaire.

Les deux techniques sont particulièrement adaptées à l'auscultation des ouvrages car elles permettent d'obtenir rapidement un modèle 3D d'un ouvrage à un instant donné. Elles sont également complémentaires. En effet, certains ouvrages, de par leur taille, seront plus facilement traités via scanner (car le nombre de photos en photogrammétrie risque d'être trop élevé). A contrario, certaines structures seront situées dans des endroits inaccessibles avec le scanner. De plus, le scanner nécessite des personnes spécifiquement formées à l'instrument.

Suite à la création des modèles 3D, plusieurs traitements permettent d'obtenir des informations particulièrement valorisables dans le domaine de l'auscultation des ouvrages :

- En l'absence de plans, ces techniques permettent de mener un relevé dimensionnel pour remplacer ceux-ci.
- L'état visuel d'une structure pourra être aisément consultable sur le modèle 3D ainsi que le calcul des surfaces ou volumes des défauts apparents.
- La création d'orthophotos permet de refléter sur une seule scène l'état réel d'une structure ou d'une partie de celle-ci.
- L'étude des déformations se trouve grandement facilitée et devient bien plus exhaustive. Ces déformations pourront être évaluées en tout point de l'ouvrage à un instant t.
- L'évolution des déformations dans le temps d'une structure pourra être estimée facilement en comparant deux nuages de points de la même structure levés à deux instants t distincts.

Les cas concrets abordés dans la suite témoignent de différents traitements possibles via photogrammétrie ou lasergrammétrie dans le cadre d'inspection d'ouvrages.

2. ETAT VISUEL ET CARTOGRAPHIE DES DEFAUTS

Un des intérêts majeurs des applications de relevés d'ouvrages via nuages de points 3D, notamment les structures en béton, réside dans le cas de cartographies de défauts sur des structures de tailles importantes. Les faces inférieures de tablier sont particulièrement soumises à ces apparitions de défauts (telles que des taches d'humidité, épaufrures...) suite à des déficiences de l'étanchéité de l'ouvrage et des systèmes d'évacuation des eaux.

Pour avoir une idée assez précise de la situation à un instant t donné, il est nécessaire de pouvoir visualiser la situation de l'ouvrage dans son ensemble. Vu le recul généralement limité entre la face inférieure et le sol, les photos prises ne concernent chacune qu'une portion très limitée de la surface étudiée et il est quasiment impossible de pouvoir faire une estimation générale de la situation à partir de photos individuelles. De plus, les logiciels "classiques" de traitement d'images sont vite limités dans le recollement des photos, de par le nombre et l'angle de prise de vue. Dès lors, jusqu'il y a peu, nous représentions schématiquement les faces inférieures, les défauts étant dessinés manuellement.



Figure 1. - Travée 7-1 du pont d'Embourg : schéma de l'état de la face inférieure du tablier

La cartographie d'une telle travée de manière manuelle nécessite un temps de travail très important, pour un résultat qui ne donne qu'une estimation assez imprécise de la situation (étant donné que les défauts et leur taille sont estimés par le dessinateur). Dès lors, l'étude de l'évolution des défauts dans le temps reste compliquée à quantifier. Cette méthode a donc des limites clairement définies, qui deviennent trop importantes pour des ouvrages de grandes dimensions, à multiples travées.

A partir des photographies de la dalle, le logiciel de photogrammétrie étudie les points (pixels) communs entre les différentes photos (un recouvrement, de minimum 50 %, est donc nécessaire) et calcule la position dans l'espace de chacun des points (pixels) présents sur minimum deux photographies. Un modèle 3D de la structure photographiée est ainsi créé sous forme d'un nuage de points, par la suite maillé.

Cette méthode permet un gain de temps considérable pour la cartographie des faces inférieures de dalle et assure une représentation fidèle de celle-ci et de la taille de ses défauts. Le modèle de la figure 2 a nécessité une prise de 70 photos, réalisées en trente minutes. L'élaboration du modèle, réalisée de manière automatique par le logiciel a pris trois - quatre heures pour un nuage final de 26.000.000 de points.

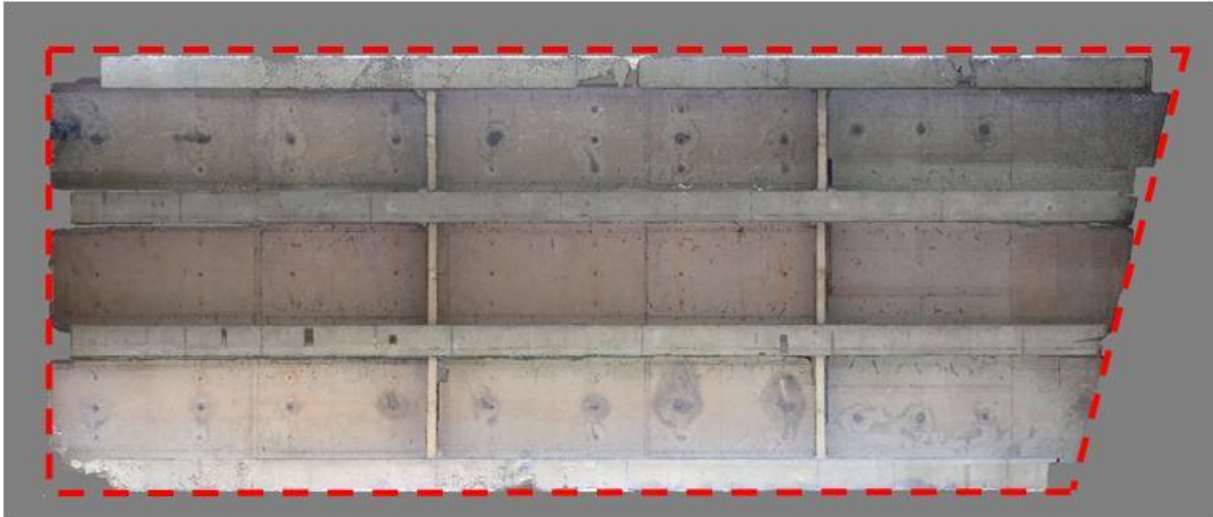


Figure 2. - Travée 8-1 du pont d'Embourg : modèle photogrammétrique de la face inférieure du tablier

Une fois le modèle maillé et mis à l'échelle, la taille des défauts peut être mesurée de manière très simple, ce qui permet une étude de l'évolution de l'état de la dalle dans le temps beaucoup plus objective et précise que de manière schématique.

3. ETUDE DES DEFORMATIONS D'UN OUVRAGE

Outre le fait de pouvoir représenter fidèlement l'état visuel d'une structure, les méthodes de modélisation 3D sont également très utiles pour quantifier les déformations de ces structures. L'étude des déformations se différencie autour de deux cas principaux:

- étude des déformations d'une structure à un instant t unique: il n'y a pas de modèle précédent de l'ouvrage et les déformations doivent être mesurées par rapport à une situation de référence jugée valeur étalon (plan vertical pour un mur, coupe de référence dans une zone supposée sans déformations...);
- étude des déformations d'une structure dans le temps: des levés de l'ouvrage sont menés périodiquement et sont comparés entre eux pour juger de l'évolution des déformations de la structure.

3.1 Cas d'une voûte en maçonnerie : pont de Lobbes

Le pont de Lobbes, en Belgique, est un ouvrage voûte en maçonnerie qui présente de nombreux décollements de briques. L'étroitesse et la difficulté d'accès empêchent d'avoir une vue globale de la voûte et de quantifier aisément la surface concernée. Un modèle 3D de la voûte a été réalisé par photogrammétrie (le scanner ne pouvant y accéder) afin de pouvoir aisément illustrer l'état de la situation au maître d'ouvrage ainsi que de calculer les surfaces et volumes concernés.



Figure 3. - Pont de Lobbes : vue de l'intrados de la voûte

A partir d'une soixantaine de photos (le recul étant très faible), un modèle 3D de la voûte a pu être réalisé. Une fois ce modèle créé, une section de référence a été choisie (dans une zone jugée sans défaut et sans déformation). Cette coupe a ensuite été extrudée le long de la longueur de l'ouvrage afin de créer une surface de comparaison avec le modèle photogrammétrique.

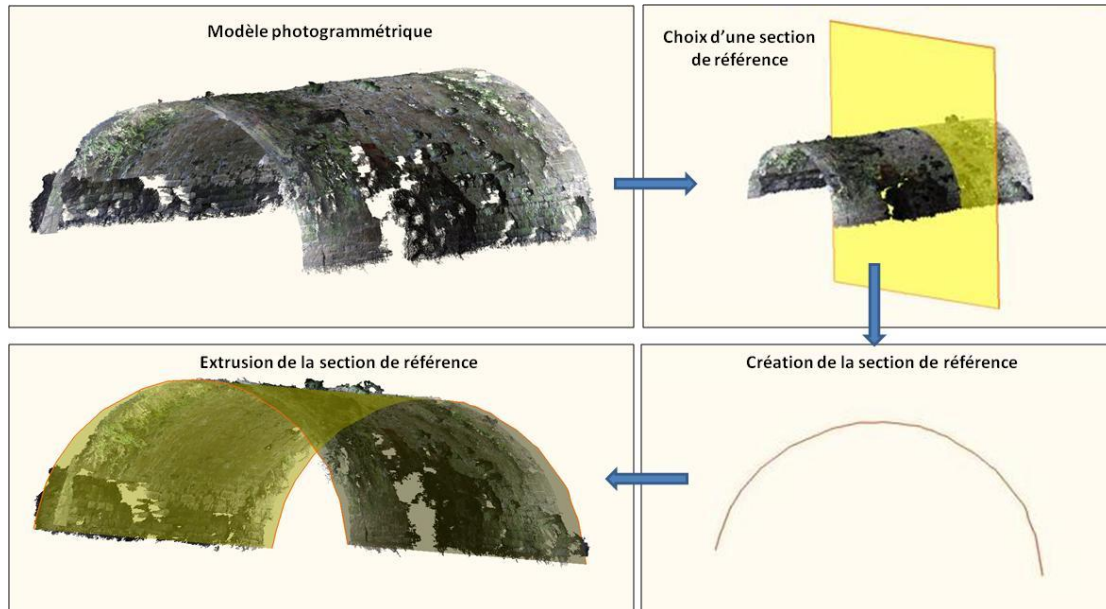


Figure 4. - Pont de Lobbes - comparaison d'une surface de référence au modèle photogrammétrique

Une fois cette surface de référence créée, il est alors possible de calculer et cartographier les écarts entre cette surface et le modèle 3D de l'ouvrage. Cette cartographie peut, à son tour, être traitée pour sélectionner les zones correspondant à certains critères. Si nous décidons, dans le cas du pont de Lobbes, de ne tenir compte que des zones pour lesquelles les écarts sont supérieurs à 6 cm (soit les zones où au minimum une rangée de briques est manquante), nous connaissons alors directement la surface à réparer et le volume de briques à remaçonner (renseignés par le programme de traitement du nuage de points).

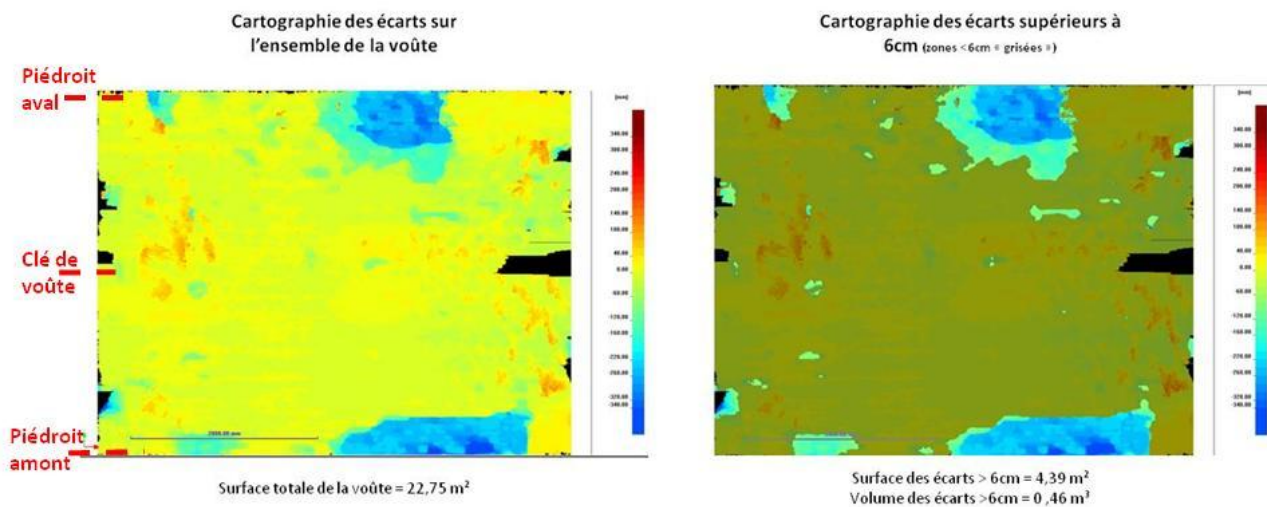


Figure 5. - Pont de Lobbes : cartographie des écarts entre la surface de référence et le modèle 3D

3.2 Mur de soutènement en maçonnerie, mur de Lustin

Le mur en maçonnerie de Lustin, en Belgique est un ouvrage de soutènement qui longe la N931 sur plusieurs dizaines de mètres et délimite les abords d'une propriété privée surplombant la nationale. Le gestionnaire de l'ouvrage a alerté notre Direction suite à la présence suspectée d'une inclinaison récente du mur. Vu la taille de l'ouvrage, il a été décidé d'utiliser le scanner pour étudier les probables mouvements.



Figure 6. - Mur de Lustin : nuage de points obtenu par scanner 3D

Tout comme pour le pont de Lobbes, une cartographie des écarts entre une surface de référence et le nuage de points a été réalisée. La surface de référence a été créée en extrudant de manière verticale la ligne du pied du mur (intersection entre le mur et la voirie). Ainsi, il a été possible de mesurer les hors-plombs du mur par rapport à la référence qu'est le pied du mur.

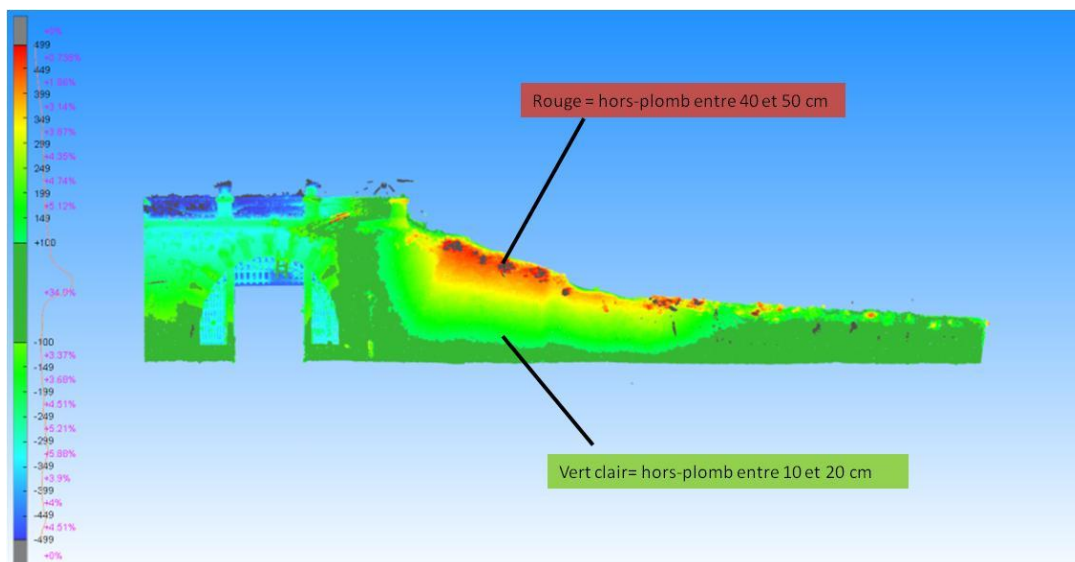


Figure 7. - Mur de Lustin : cartographie des écarts entre le plan vertical et le nuage de points

Les résultats obtenus par scan montrent des hors-plombs importants et généralisés de l'ouvrage. Ces résultats plus critiques qu'attendus nous ont convaincus d'instrumenter l'ouvrage par des inclinomètres reliés à un système d'alarme nous prévenant en direct en cas de dépassement de seuils.

3.3 Buses métalliques

Les buses métalliques sont des ouvrages constitués d'une tôle ondulée d'épaisseur très faible (3-5 mm) prévus pour se déformer sous le poids des terres qu'ils supportent jusqu'à atteinte d'un équilibre. Ce sont des ouvrages de faible hauteur (souvent entre 1,5 et 2 m) et de longueur parfois importante (entre 100 et 200 m). Vu la faible épaisseur des tôles, des défauts (corrosion, déformations trop importantes même localisées...) peuvent avoir des conséquences fortes sur la stabilité de l'ouvrage.



Figure 8. - Buse métallique (1,5 m de hauteur)

De nombreuses difficultés se posent pour observer et quantifier les déformations sur l'ensemble d'une buse (faible diamètre peu confortable pour une inspection assidue, longueur importante, très faible luminosité...). Le scanner 3D de par son relevé rapide (relevé d'une buse de 100 m de longueur en trois heures) et exhaustif apporte une réponse à cette problématique.

Cependant, la typologie particulière des buses amène certaines complications :

- les tôles étant ondulées, les sections sont différentes entre elles. Ainsi, traiter des sections qui varient suivant leur position au niveau de l'onde ne permet pas un traitement représentatif;
- les buses sont des ouvrages flexibles dont les axes de symétrie peuvent varier. Or, les programmes de comparaison de section travaillent généralement le long d'un axe unique.

Pour solutionner ces problèmes, un programme a été créé. Celui-ci, à partir de coupes de la buse d'une épaisseur égale à une longueur d'une onde, traite le nuage de points pour ne garder que les points inférieurs des ondes sur toutes les coupes créées. De plus, le programme repositionne chaque coupe au mieux de manière à s'affranchir du problème d'axes de symétries variables. Un indice de déformation est calculé pour chaque coupe, renseignant ainsi directement les coupes les plus déformées.

La méthodologie pour l'inspection des buses se fait alors en deux étapes distinctes :

- première visite sur l'ouvrage : détection automatique des sections les plus déformées via le scan réalisé et le programme, ce qui permet de quantifier la criticité de l'état de l'ouvrage;
- visites ultérieures : comparaison des écarts des nuages de points entre deux visites successives, ce qui permet de visualiser directement l'évolution des déformations de la buse.

Journée d'information sur la gestion des ouvrages d'art

Pour tester cette méthodologie, des défauts factices ont été installés sur une buse de 60 m de longueur. Cette buse a ensuite été scannée deux fois (avec défauts et sans défauts).



Figure 9. - Buse métallique de Chatelet : modèle de la buse réalisé par scan

Les coupes obtenues ont été traitées avec le programme. Pour chaque coupe, l'indice de déformation est calculé automatiquement par rapport à une section de référence jugée non déformée. Il en est ressorti que les quatre indices de déformation les plus importants ont été obtenus sur les quatre sections avec défauts installés. De manière générale, pour le traitement d'une buse, le tableau des indices renseignera directement les sections sur lesquelles une attention particulière devra se porter.

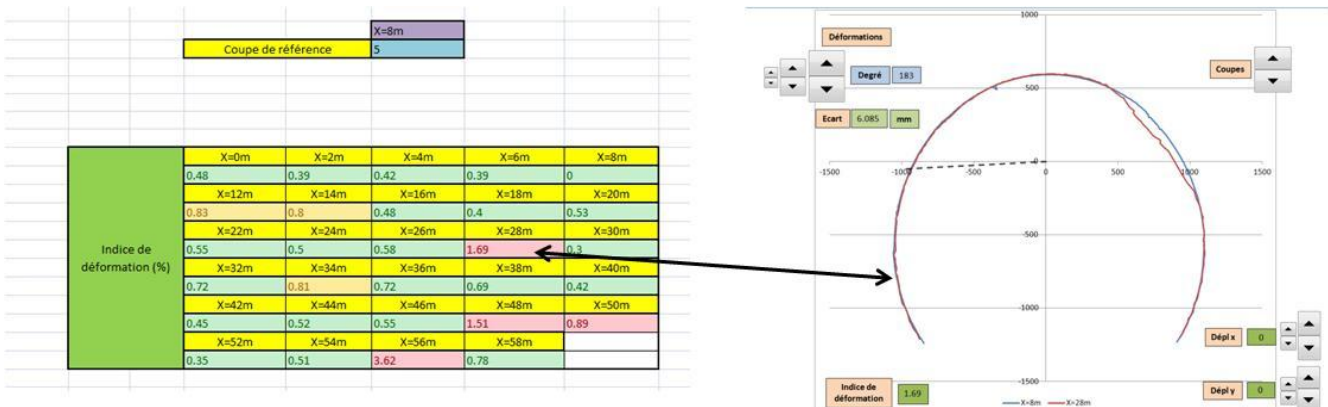


Figure 10. - Illustration du programme de traitement des buses

Pour juger de la faisabilité de la deuxième étape (comparaison des nuages de points entre deux scans de visites successives), le nuage relevé avec défauts a été comparé à celui sans défauts.

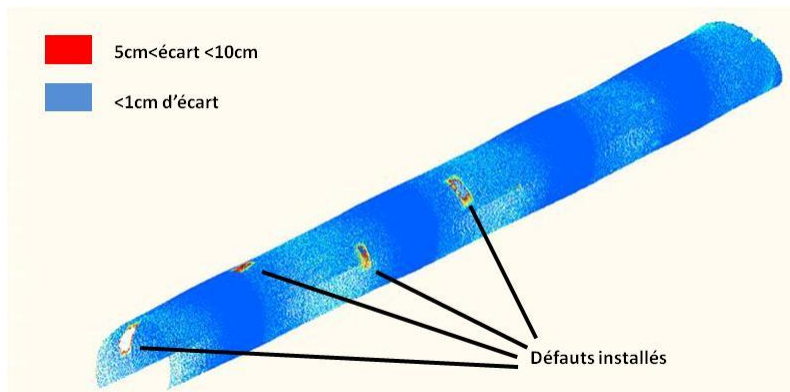


Figure 11. - Comparaison des écarts entre les deux nuages de points levés

Journée d'information sur la gestion des ouvrages d'art

Il s'ensuit que les quatre défauts installés sont directement repérés par la comparaison entre nuages. Excepté les défauts, l'ensemble des écarts reste inférieur à 6 mm. Or, l'objectif de la méthodologie est de pouvoir repérer des évolutions supérieures à 2 cm. L'erreur nuage à nuage constatée ici semble donc suffisamment faible que pour pouvoir utiliser cette méthode de manière systématique pour l'ensemble des buses. D'autres essais continueront à être menés pour confirmer cette méthodologie.

4. CONCLUSIONS

Les cas d'étude et essais menés ces derniers mois sur différents types d'ouvrages via l'utilisation de la photogrammétrie ou la lasergrammétrie nous ont démontré que ces deux techniques possédaient des arguments très intéressants pour l'auscultation d'ouvrages. De par leur complémentarité, elles permettent une application dans la majorité des cas rencontrés et apportent des informations pertinentes pour des types de structures très différentes.

Bien sûr, les diagnostics d'ouvrages menés à partir de levés 3D nécessitent une maîtrise de l'ensemble de la chaîne d'acquisition et de traitement ainsi qu'une validation de la méthodologie employée. Mais, une fois cette étape réalisée, la densité d'informations recueillie amène une réelle plus-value pour l'auscultation des structures étudiées avec un temps de traitement relativement court.