

# Photogrammétrie architecturale sur l'église Saint-Claude de Sigonce (Alpes-de-Haute-Provence)



## **Remerciements**

Nous tenons à remercier l'équipe municipale de la ville de Sigonce pour nous avoir permis de travailler sur l'église Saint-Claude ainsi que pour son accueil chaleureux.

Nous adressons également nos remerciements à M. André Del et à l'école d'architecture Paris Val de Seine, sans qui la prise de vue aérienne par drone n'aurait pu être réalisée.

# Sommaire

<b>REMERCIEMENTS</b> .....	<b>2</b>
<b>PROBLEMATIQUE</b> .....	<b>4</b>
<b>DEMARCHE GENERALE</b> .....	<b>4</b>
<b>TOPOMETRIE</b> .....	<b>5</b>
BUT .....	5
NUMEROTATION DES POINTS .....	6
MESURES SUR LE TERRAIN .....	6
DEROULEMENT DES CALCULS.....	7
RESULTATS .....	7
<b>PHOTOGRAMMETRIE</b> .....	<b>7</b>
CALIBRATION DES APPAREILS PHOTO .....	7
REDRESSEMENT .....	8
CORRELATION DENSE .....	8
PRISE DE VUE AERIENNE .....	9
VISITE VIRTUELLE .....	9
<b>SCANNER-LASER</b> .....	<b>9</b>
<b>CONCLUSION</b> .....	<b>10</b>

## Problématique

Dans le cadre du stage de photogrammétrie de 2<sup>e</sup> année du cycle Géomètre de l'ENSG, un levé photogrammétrique complet (redressement, orthorectification, corrélation dense, levé laser) a été effectué sur l'église Saint-Claude de Sigonce (Figure 1).

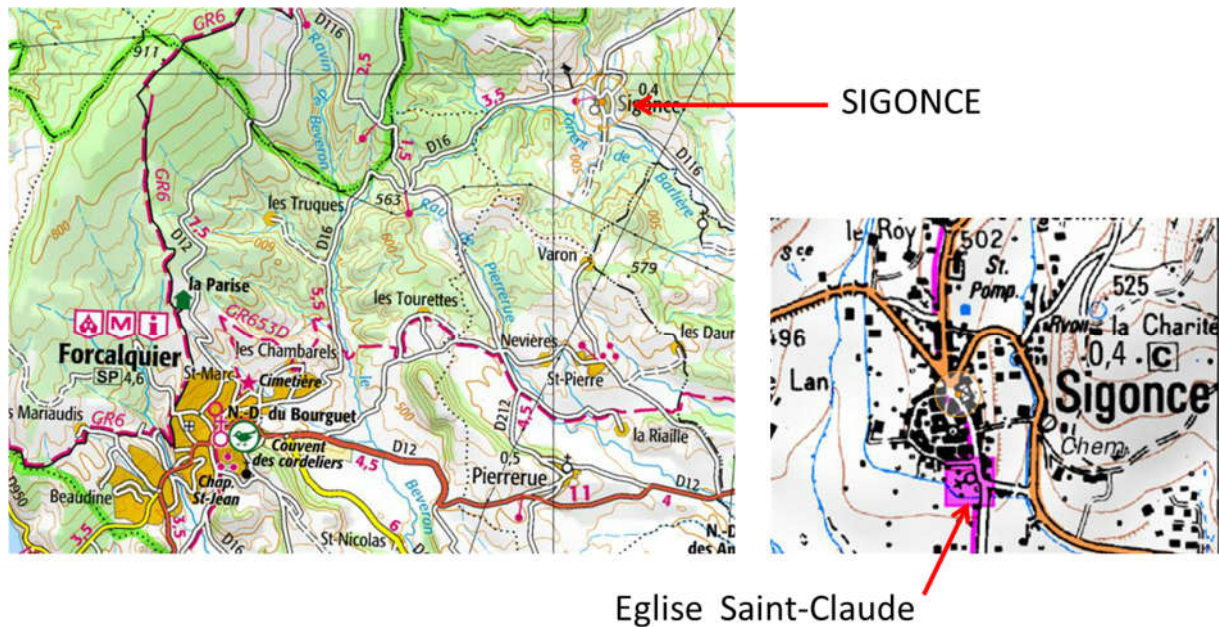


Figure 1 : Plan de situation du chantier.

Celle-ci est située en bordure sud du village de Sigonce, sur une placette ombragée. Massive, flanquée d'imposants contreforts et couverte d'une toiture en lauzes, elle s'apparente à un prieuré de campagne. Construite à la fin du XIV<sup>e</sup> siècle et remaniée au début du XVI<sup>e</sup> siècle, elle se veut de style gothique, sans pour autant renier un fort ascendant roman.

L'intérieur est résolument gothique : la nef, qui comprend trois travées, est voûtée sur croisée d'ogives, bordée d'un seul bas-côté. Elle donne, par un arc triomphant appuyé sur deux piles polygonales, sur le chœur de même facture architecturale. La grande originalité de cette église, inscrite à l'Inventaire supplémentaire des Monuments historiques depuis le 29 mars 1967, réside en sa toiture de lauzes, dont la pente est contrariée par l'éminence des trois travées – chapelles – et du chœur. Cette extraordinaire toiture polylobée, unique en son genre, forme ainsi « une ondulation de pierres déployée sur l'ensemble du bâtiment ».

## Démarche générale

Afin de géoréférencer notre chantier, nous avons d'abord procédé à l'implantation d'un canevas autour de l'église, par topométrie et GNSS. C'est à partir de ce canevas que les coordonnées des points d'appui nécessaires aux techniques photogrammétriques furent déterminées.

De nombreuses techniques de photogrammétrie architecturale ont été mises en œuvre :

- prises de vues terrestres
- redressements
- orthorectification par corrélation dense

- corrélation dense (modélisation 3D d'éléments remarquables)
- acquisitions par Scanner Laser
- une prise de vue aérienne par drone (réalisée en collaboration avec M André Del de l'école d'architecture de Paris Val de Seine)
- une prise de vue via le dispositif RODEON produisant une scène panoramique autorisant une visite virtuelle

La Figure 2 résume les relations existantes entre les différentes techniques utilisées lors de ce chantier.

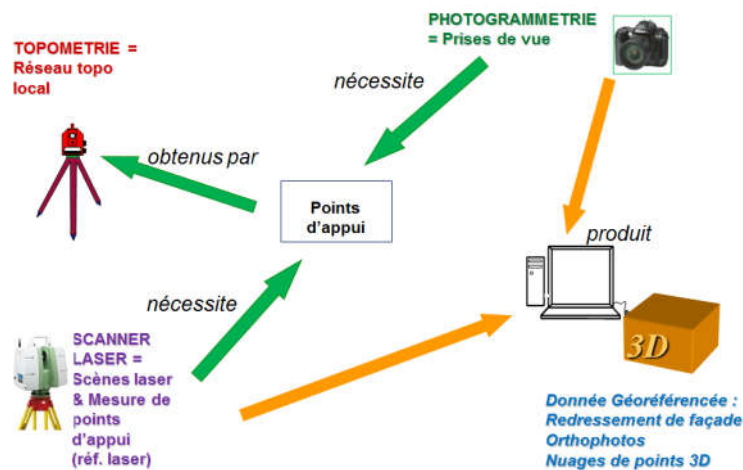


Figure 2 : Relations entre les différentes techniques utilisées lors du chantier.

## Topométrie

### But

L'objectif de la topométrie sur ce chantier était d'établir un canevas de points de coordonnées connues permettant de déterminer les points d'appui nécessaires au géoréférencement des images et des nuages de points 3D (Laser et MicMac).

Dans un premier temps, un repère local centré sur la croisée des transepts et orienté suivant les axes de l'église a été utilisé. L'origine de celui-ci a été arbitrairement fixé à (1000,1000,1000) afin d'éviter des coordonnées négatives (Figure 3). Ce type de repère, dont les axes sont alignés sur ceux de l'église, est particulièrement apprécié des architectes car il leur donne une vision immédiate de la localisation des points.

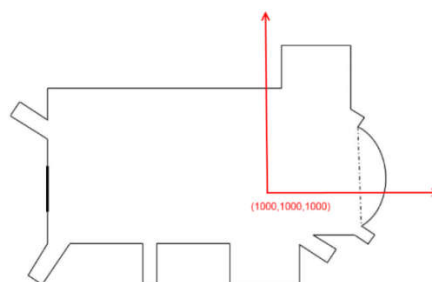


Figure 3 : Plan de l'église et orientation du repère local.

Par la suite, les coordonnées de chaque point du chantier ont été calculées dans un second repère local, en conservant les coordonnées planimétriques du premier repère et en modifiant les altitudes en se basant sur le repère de nivellement présent sur l'église (fiche descriptive en annexe).

Dans un troisième temps, les coordonnées ont été ramenées en RGF93 (projection Lambert93) par une transformation de Helmert.

## Numérotation des points

La numérotation des points du chantier a suivi une nomenclature précise résumée dans le Tableau 1.

**Tableau 1 : Récapitulatif de la nomenclature de numérotation des points sur le chantier.**

Snnn	Station volante (topométrie)	<b>nnn</b> : numéro de station
Lnnn	Station Laser	<b>nnn</b> : numéro de station
Mnnn	Point matérialisé	<b>nnn</b> : numéro de point
Bnnn	Boule non repositionnable	<b>nnn</b> : numéro de boule
Hnnn	Cible HDS non repositionnable	<b>nnn</b> : numéro de cible
Wnnn	Cible Black&White non repositionnable	<b>nnn</b> : numéro de cible
1FFLnn	Point naturel d'une façade	<b>FF</b> : numéro de façade <b>L</b> : niveau [1 bas,..., 5 haut] <b>nn</b> : numéro du point
2FFLnn	Ciblette équipant une façade	
169nn	Point naturel clocher ou hors église	<b>nn</b> : numéro du point
400nnn	Ciblette de prébalisage (prise de vue aérienne)	<b>nnn</b> : numéro de cible
Tnn	Angle de toiture	<b>nn</b> : numéro de point
3FFnnn	Point sur vitrail	<b>FF</b> : numéro de façade <b>nnn</b> : numéro du point
1599nn	Point naturel sur la nef	<b>nn</b> : numéro du point
C5nn	Points intérieurs de l'église	<b>C</b> : Code du type de point (L,M, B, W, etc.) <b>Nn</b> : Numéro de point

L'ensemble des points mesurés en topométrie sont placés sur un plan disponible en annexe.

## Mesures sur le terrain

Les points du canevas implantés pour le chantier ont été matérialisés au moyen de clous d'arpentage. Les mesures topométriques ont été réalisées avec des tachéomètres Leica (TCR803 et TS30) sur des prismes circulaires ou des mini-prismes Leica lorsque cela était possible.

Les points M001, M004 et M006 (cf. plan du chantier en annexe) ont été stationnés au moyen d'antennes Trimble R8.

L'ensemble des points de prébalisage ont été stationnés en GNSS (Trimble R8) en mode static simultanément à une station pivot positionnée sur le point M004.

## **Déroulement des calculs**

Un premier levé topométrique a été réalisé sur les 4 points M001 à M004, ce qui a donné un premier calcul de coordonnées exprimées dans le repère local. Par la suite, les stations observées ont été intégrées à ce calcul par compensations successives.

Le stationnement GNSS des points M001, M004 et M006 a permis d'obtenir les coordonnées de ces points en RGF93 (Lambert 93).

Enfin, l'ensemble des coordonnées obtenues a été ramené en Lambert93 via une transformation de Helmert s'appuyant sur les points M001, M004 et M006 connus en Lambert93.

## **Résultats**

Les coordonnées de tous les points du chantier calculées dans les 3 repères successifs (repère local, repère local avec les altitudes normales IGN69 et Lambert 93) sont disponibles en annexe.

Une documentation HTML a été réalisée pour documenter l'ensemble des points. Ces fiches contiennent une description des points mais pas leurs coordonnées (faute de temps pour les mettre à jour).

La majorité des points mesurés sont ont des ellipsoïdes de confiance acceptables. Cependant, certains points naturels sont hors spécifications. Des reprises de terrain sont souhaitables avant de les utiliser pour tout travail complémentaire sur ce chantier.

## **Photogrammétrie**

Les produits photogrammétriques sont issus de prises de vue (terrestre ou aériennes) ou de nuages de points 3D (scanner-laser). Plusieurs types de traitements à partir d'images sont possibles mais nécessitent des prises de vues spécifiques et la détermination de points d'appuis pour le géoréférencement.

## **Calibration des appareils photo**

Nous disposons des appareils suivants : deux Canon EOS 1000D, un EOS 5D, un EOS 70D, un Nikon D70 et un Sony  $\alpha$ 850.

La calibration des divers appareils photos était une étape nécessaire avant de procéder aux prises de vue.

Un polygone d'étalonnage, constitué de deux plans sécants équipés de cibles connues en coordonnées, était disponible au centre de Forcalquier (Figure 4).





**Figure 4 : Polygone de calibration des appareils photo.**

La calibration consiste à mesurer la distorsion de chaque couple appareil-objectif grâce à un protocole de prise de vue spécifique : prendre de multiples photos en veillant à placer un maximum de cibles sur les bords des images.

On obtient un fichier « .cam » grâce au logiciel ETA, décrivant les paramètres de la caméra : position du PPA, focale, position du PPS et coefficients du polynôme de distorsion.

### **Redressement**

Un redressement est une image corrigée des déformations dues à l'inclinaison de l'axe de prise de vue et de la distorsion optique. Il est calculé en projetant la (ou les) image(s) sur le plan de la façade. Le produit final est une image métrique<sup>1</sup> sur laquelle des mesures peuvent être réalisées (tant que l'hypothèse de planéité est vérifiée). L'ensemble des éléments situés en dehors du plan ne peuvent faire l'objet de mesures.

La prise de vue nécessite un recouvrement de 60% en intra-bande et de 20% en inter-bande. Le traitement se fait sur le logiciel Redresseur qui permet la saisie manuelle ou automatique de points de liaisons (5 à 10 points par nadir, identifiables sur au moins trois photographies), qui permettent le calage des images entre elles, ainsi que celle, obligatoirement manuelle, des points d'appuis (points artificiels ou naturels identifiables et de coordonnées connues) qui servent au calage ainsi qu'au géoréférencement des images.

Les façades 01, 05, 09, 10, 11, 23, 26 ont été traitées en redressement (plan des façades et produits fournis en annexe).

### **Corrélation dense**

Le logiciel MicMac permet la création de nuages de points 3D par corrélation dense lors de traitements de prise de vue à fort recouvrement (80%). Il cherche, pour chaque pixel d'une image, des pixels homologues dans les autres photographies et, par intersection de faisceaux, reconstitue une carte de profondeur lui apportant l'information en Z par rapport au plan de corrélation défini

---

<sup>1</sup> Mosaique de photographies rectifiées par photogrammétrie. Cette mosaique est superposable à un plan (à l'exception des parties encastrées), elle comprend, de plus, une référence altimétrique.



préalablement. Ce procédé permet d'obtenir un nuage de points 3D correctement texturé grâce à la résolution des images et présente l'avantage d'accéder à des endroits inaccessibles au laser. Un certain nombre de détails remarquables de l'église et de ses environs ont été traités de cette façon. Les résultats ont été inclus à la visite virtuelle réalisée au moyen du RODEON.

Micmac permet également la création d'orthoimages<sup>2</sup> à haute résolution en effectuant deux prises de vues : une à fort recouvrement et focale courte afin d'obtenir les détails du relief par corrélation dense, l'autre, sans recouvrement et avec une focale longue, pour texturer l'orthoimage avec une résolution importante.

Les façades 01, 09 ont été traitées en orthorectification (plan des façades et produits fournis en annexe).

### **Prise de vue aérienne**

M André Del, de l'école d'architecture de Paris Val de Seine, nous a fait l'honneur de sa présence et de son savoir-faire pour effectuer une prise de vue aérienne avec un drone sur lequel une caméra étalonnée a été fixée et programmée à une cadence de prise de vue toutes les deux secondes. Les images ont permis d'obtenir par corrélation dense le nuage de points du toit de l'église qui ne pouvait être pris avec le scanner-laser.

### **Visite virtuelle**

Une visite virtuelle du monument a été produite à l'aide du système de prise de vue RODEON. Ce système comprend une tête rotative qui permet de réaliser une prise de vue à 360° avec différents temps de pose pour chaque position de l'appareil, permettant ainsi d'obtenir une radiométrie uniforme sur l'ensemble de l'image.

### **Scanner-laser**

L'appareil utilisé pour réaliser les levés laser est un Leica C10 (Figure 5).



**Figure 5 : Scanner Laser Leica C10.**

Dans un premier temps, le chantier fut équipé d'un ensemble de cibles HDS et de boules « Mensi ». Elles permettent de lier les différentes stations laser mais permettent aussi de lier les stations laser au système de référence, puisqu'elles sont déterminées en topométrie.

---

<sup>2</sup> image corrigée des déformations dues au relief, à l'inclinaison de l'axe de prise de vue et de la distorsion optique.

Ce chantier était constitué des parties intérieure et extérieure de l'église, réalisé en 25 stations laser.

Le processus a été de réaliser pour chaque station un scan panoramique en résolution moyenne, avant de faire des reprises en haute résolution sur les détails (cibles HDS, boules, points naturels) à pointer lors des post traitements pour l'assemblage des stations.

Ce traitement des nuages de points a été réalisé avec le logiciel Cyclone (Leica).

Le contrôle des résidus sur les nœuds d'assemblage (en s'assurant d'un résultat sub-centimétrique) a permis de valider l'assemblage de l'ensemble des 25 stations.

Le traitement de ces nuages avec le logiciel Cumulus (afin d'obtenir des coupes et des orthoimages) n'a pas pu être réalisé faute de temps.

Les points constituant le canevas du laser ont été intégrés dans le calcul de compensation topométrique.

## **Conclusion**

Le chantier de l'église de Sigonce a permis d'utiliser un grand nombre de techniques topométriques et photogrammétriques complémentaires permettant de visualiser et de mesurer la quasi-totalité du bâtiment. Ces produits et documents peuvent révéler leur utilité en amont de travaux de restauration ou comme outils de communication. Ces données seront transmises à la mairie dans le but de mieux connaître leur patrimoine.