
**Modélisation des phases de constructions de l'oratoire de Germigny-des-Prés.
Exploitation d'un modèle 3D sur base de Micro Station 3D. Question sur la
pertinence du modèle 3D dans le cadre de l'archéologie**

Auteur : Lambrigts, Robin

Promoteur(s) : Van Wersch, Line

Faculté : Faculté de Philosophie et Lettres

Diplôme : Master en histoire de l'art et archéologie, orientation archéométrie, à finalité approfondie

Année académique : 2019-2020

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/10181>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

Année Académique 2019-2020

Faculté de Philosophie et Lettres



Travail de fin d'études :

Modélisation des phases de constructions de l'oratoire de Germigny-des-Prés. Exploitation d'un modèle 3D sur base de Microstation 3D. Question sur la pertinence du modèle 3D dans le cadre de l'archéologie.

Réalisé par Lambrigts Robin,

Master en Histoire de l'Art et Archéologie, à Finalité, Archéométrie.

Dans le cadre du Travail de fin d'études.

Année académique 2019-2020.

Sous la direction de Mme Van Wersch.

1) Introduction :

Dans le cadre de mon travail de fin d'études en archéométrie, j'étais désireux d'expérimenter un pan de la recherche nouveau. Etant intéressé par l'étude du bâti et les techniques qui l'entourent, j'ai décidé de me pencher sur une thématique particulière : la modélisation 3D.

La 3D existe depuis plusieurs années dans différents domaines. Cependant, son utilisation est assez récente en archéologie. Les premiers proto-exemples de nouvelles représentations prennent leurs origines au 19^e siècle avec les premières expériences sur la photogrammétrie¹. Cette méthode évoluera ensuite au 20^e et au 21^e siècles vers des représentations tridimensionnelles sur base de photographies que l'on peut observer actuellement. Parallèlement, dans les années 1960, une seconde méthode, nommée lasergrammétrie, sera mise au point par Théodore Maiman. Cette technique se base sur le calcul de distance entre un appareil et une surface grâce à un laser. Au début utilisé par les géomètres et les topographes, elle finira par être utilisée en archéologie². Cette méthode fournit un nuage de points géoréférencés permettant ensuite une modélisation sur base de ce relevé.

La représentation 3D en archéologie trouve des applications diverses. Elle propose des emplois dans le domaine de la communication, de la conservation et de l'étude des matériaux. Elle est souvent utilisée pour représenter un site entier, mais peut également servir à collecter des informations liées à la colorimétrie des artefacts ou aux dégradations de certains édifices. Par la collecte de ces données, la 3D a permis dans certains sites d'identifier des zones menacées et d'en planifier la restauration³. Elle offre des possibilités de mieux comprendre l'organisation d'un site ou d'un bâtiment. Dans certains cas, elle permet même de fournir des relevés pour des zones inaccessibles⁴. Pourtant, les méthodes traditionnelles de représentation comme le dessin

¹ HÉNO, R. et CHANDELIER, L., 2014, *Numérisation 3D de bâtiments. Cas des édifices remarquables*, « Collection SIG et intelligence territoriale », Londres, p. 17-19.

² *Ibid.*, p. 82.

³ ADAMOPOULOS, E. et RINAUDO, F., 2019, *3D interpretation and fusion of multidisciplinary data for heritage science. A review*, actes du colloque *International Committee of Architectural Photogrammetry*, XLII-2/W15, Avila, p. 17.

⁴ TEMIZER, T., NEMLI, G., EKIZCE, E., DEMIR, S., BAYRAM, B., ASKIN, F.-H., COBANOGLU, A.-V. ET YILMAZ, H.-F., 2013, *3D Documentation of a historical monument using terrestrial laser scanning case study. Byzantine Water Cistern, Istanbul*, Actes du colloque *International Committee of Architectural Photogrammetry*, Volume XL-5/W, Strasbourg, p. 623-628.

ou la photographie restent omniprésentes durant les recherches⁵. Dès lors, il est intéressant de se pencher sur les raisons pour lesquels la modélisation 3D n'est pas plus présente dans le patrimoine.

Pour aborder la technique le plus objectivement possible, il semble nécessaire de l'appréhender par le biais de l'application. En 2016, M. Poux et Mme Luczfalvy-Jancso effectuaient la capture laser d'un édifice français, l'oratoire de Germigny-des-Prés. Sur base de cette capture, cette équipe a produit un modèle 3D de la mosaïque de Germigny-des-Prés⁶. Dans ce cas, l'objectif se concentrait sur la représentation et sur l'apport de la 3D pour l'étude de cette mosaïque. Toutefois, la capture comprenait l'entièreté du bâtiment. Il était donc possible de s'intégrer à un projet en cours pour réaliser une modélisation 3D sur base d'un nuage de points récent afin d'apporter à la recherche sur Germigny un élément supplémentaire pour la compréhension du site

L'oratoire de Germigny-des-Prés est un bâtiment d'origine carolingienne qui a été redécouvert au 19^e siècle et qui a dès lors été considéré comme l'une des plus vieilles églises de France⁷. Le site se situe dans le Loiret, près d'Orléans. Il a été construit aux alentours du 9^e siècle sur la demande de l'évêque Théodulf d'Orléans. Selon les publications de 1930, l'église faisait partie d'un complexe résidentiel bien plus étendu. Cependant, pour le moment aucune trace de ces installations n'a été retrouvée⁸. Germigny est connu pour sa mosaïque carolingienne de l'Arche d'Alliance, ainsi que la complexité de son histoire architecturale. Pour ces raisons, l'oratoire de Germigny-des-Prés est, depuis plusieurs années, au cœur d'un projet de recherches mené par l'Université de Liège (Uliège), l'Université de Louvain-la-Neuve (UCL) et le centre

⁵ POUX, F., NEUVILLE, R., VAN WERSCH, L., NYS, G.-A., et BILLEN, R., 2017, *3D point clouds in archeology. Advances in acquisition, processing and knowledge integration applied to quasi-planar objects*, dans *Geosciences*, 7 (96), Orléans, p. 3.

⁶ POUX, F., NEUVILLE, R., BILLEN, R., 2017, *Point cloud classification of tesserae from terrestrial laser data combined with dense image matching for archaeological information extraction*, Actes du colloque *International Committee of Architectural Photogrammetry*, Volume IV-2/W2, Ottawa, p. 203-205.

⁷ SAPIN, CH., 2019, *Germigny-des-Prés. Un nouveau regard*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 1.

⁸ CAMERLYNCK, CH., SAPIN, CH. et VAN WERSCH, L., 2019, *Prospection géophysique sur le site de Germigny-des-Prés*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 2-3.

d'études médiévales d'Auxerre (CEM). L'ensemble est subsidié par des institutions françaises et belges telles que le Fond de la Recherche Scientifique (FNRS) et la Direction Régionale d'Affaires Culturelles Val-de-Loire (DRAC Val-de-Loire).

Le projet de recherches sur Germigny se concentrent sur plusieurs aspects du site : son implantation, sa mosaïque mais aussi sa construction. En effet, l'état actuel du bâtiment est le résultat de trois phases de construction⁹. Pour Germigny, la production de modèles 3D des trois états du bâtiment est intéressante pour la recherche ainsi que pour fournir un support pour le partage auprès des visiteurs. Ces représentations pourront également servir de support pour l'intégration de métadonnées issues des autres recherches comme par exemple les données des études sur les matériaux dont les analyses élémentaires et moléculaires des tesselles de la mosaïque. L'objectif premier de ce mémoire est donc, par l'utilisation d'un logiciel de modélisation, de fournir des modèles représentant les différentes phases de constructions de Germigny-des-Prés.

Ce mémoire offre également l'opportunité d'expérimenter un logiciel 3D. Dans le patrimoine, on utilise régulièrement les logiciels de photogrammétrie tels que Metashape (Agisoft) ou Recap (Autodesk)¹⁰. Concernant la modélisation en tant que telle, les chercheurs utilisent soit des logiciels ne permettant pas l'intégration de nuages de points comme Bentley ou Sketchup dans lesquels la modélisation se base sur d'autres éléments. Quand, un nuage de points a été réalisé, Revit (Autodesk) est régulièrement utilisé. Pourtant d'autres logiciels existent. Sur le conseil de M. Hallot, il a donc été décidé de travailler avec Microstation 3D de chez Bentley Systems. Pensé pour la modélisation en architecture, il offre la possibilité d'expérimenter la modélisation 3D dans un cadre d'archéologie du bâti avec les outils adéquats.

Par ailleurs, en archéométrie, la collaboration est primordiale pour fournir des résultats. La modélisation 3D ne déroge pas à ce constat. Les productions 3D dans le patrimoine sont régulièrement réalisées avec l'aide d'architectes ou de géomaticiens formés à cette technique.

⁹ SAPIN, CH., BÜTTNER, S. et AUMARD, S., 2019, *Germigny-des-Prés. Nouvelles observations archéologiques sur le bâti*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 13-14.

¹⁰ BACCI, G., BERTOLINI, F., e.a, 2019, *HBIM methodologies for the architectural restoration. The case of the ex-church of San Quirico all'Olivo in Lucca, Tuscany*, Actes du colloque 2nd International conférence of géomatics and restoration, Volume XLII-2/W11, Milan, p. 122.

Dans ce travail, il a été décidé d'aborder la modélisation sans l'aide direct d'un professionnel. La préparation du nuage de points ayant déjà été réalisée par M. Hallot, il est possible d'aborder seulement l'étape de modélisation sans expérience particulière dans le domaine et sans formation spécifique. L'objectif par cette approche, est de déterminer si ces productions spécifiques sont accessibles aux archéologues à moindre coût.

Ce mémoire propose donc d'expérimenter la modélisation 3D dans le cadre de la recherche sur Germigny-des-Prés à l'aide d'un logiciel peu utilisé dans le domaine du patrimoine. L'objectif est de fournir, à l'aide de Microstation 3D, des modèles 3D assez précis des trois grandes phases de l'édifice, accompagné d'un regard critique, et qui pourront être utilisés dans les recherches ultérieurs de Germigny. Par la même occasion, il sera question de s'intéresser à la méthode en général, puis de constater dans Microstation 3D, ses avantages et désavantages.

Le travail commencera par une contextualisation du site de Germigny-des-Prés, de son histoire et de son commanditaire. L'objectif sera de comprendre comme ce site a été implanté mais également de percevoir les éléments qui ont influencé l'architecture au cours de son histoire.

Dans l'objectif de modéliser les différents états du bâtiment, il est essentiel d'identifier clairement ce qui les composent. Dans un second temps, un chapitre sera donc dédié à l'identification des différentes phases de constructions et les éléments qui la constituent.

Nous poursuivrons avec une étude des techniques de modélisation 3D, de leur historique et des dernières applications de modélisation 3D dans le patrimoine. Ce chapitre s'intéressera également aux constats sur la modélisation et à l'apport de celle-ci en archéologie.

A la suite de l'étude générale de la modélisation dans le patrimoine, nous passerons à la modélisation de Germigny. Dans ce chapitre, il sera question de développer l'utilisation du logiciel, de constater la production qui en découle mais également de discuter des avantages et désavantages constatés.

Ce mémoire se terminera par une rétrospective de cette étude. Dans la conclusion, nous reviendrons sur le déroulé du projet mais aussi sur les constats à tirer de cette expérience. Nous proposerons également des perspectives possibles à cette recherche.

2) Contexte :

a) Germigny-des-Prés : Contexte géographique

Le village de Germigny-des-Prés occupe la rive droite de la Loire, au nord de celle-ci. Il s'agit du village central de la commune éponyme. Germigny fait partie du département français du Loiret, dans la région Centre Val de Loire. La ville la plus proche est Orléans (fig. 1). Cette proximité inscrit le village dans l'ancienne région de l'Orléanais. Il est intéressant de mentionner que le village se situe non loin de Saint-Benoit-sur-Loire, connu pour son



Fig. 1. France. Carte actuelle du territoire. (<http://www.cartesfrance.fr/Germigny-des-Prés-45110/carte-Germigny-des-Prés.html>, téléchargé le 10 août 2020.)

abbaye bénédictine¹¹(fig. 2), ainsi que de Sully-sur-Loire et de son château¹²(fig. 3). Les rives de la Loire regorgent de ressources patrimoniales liées à la royauté française. L'intérêt archéologique et historique de la région se centre, pour le grand public, principalement sur les châteaux de la Loire.



Fig. 2. Saint-Benoit-sur-Loire. Abbaye bénédictine de Fleury. Vue extérieure de la tour-porche depuis l'ouest. 11^{ème} siècle. (LAMBRIGTS, R., 2019)

¹¹ Abbaye de Fleury, première construction datant du 7^e siècle.

¹² Château d'aspect renaissance tirant ses origines au 12^e siècle.



Fig. 3. Sully-sur-Loire. Château de Sully-sur-Loire. Vue de la cour intérieure depuis l'ouest. 12^{ème} siècle. (LAMBRIGTS, R., 2019.)

Néanmoins, les bords de Loire regorgent d'autres sites plus méconnus tels que le site de Bonnée ou Arcy-sur-Cure ... ainsi que Germigny-des-Prés qui est l'objet de ce travail.

La Loire est connue pour ses crues parfois dévastatrices. Elle fait partie intégrante de la vie et de l'histoire de Germigny-des-Prés. L'entièreté du

territoire de la commune se trouve sur la zone d'inondations majeures de la Loire. Néanmoins, depuis le 19^e siècle un système de levée de terre a été mis au point pour diminuer les effets négatifs de ces montées d'eau. La dernière crue dévastatrice daterait de 1907. Depuis, les écoulements seraient plus maîtrisés malgré des inondations impressionnantes en 2016. Par ailleurs, le site même de l'oratoire se situe sur une montille, un monticule naturel formé par des sédiments alluviaux¹³. Nous reviendrons sur cet aspect du fait qu'il est peut-être à l'origine du choix de l'emplacement de l'édifice.

Au-delà de l'aspect destructeur de la Loire, celle-ci joue également un rôle bénéfique dans l'apport d'alluvions fertiles sur ses bords. Cette fertilité permet à la commune d'avoir une activité agricole importante. Germigny fait d'ailleurs partie du Beauce¹⁴, région naturelle connue pour la fertilité de ses sols. Encore aujourd'hui, une grande partie de l'économie de la commune repose sur l'activité agricole. D'ailleurs, la faune de la région est assez riche, offrant une zone de diversité impressionnante. Au vu de cette richesse naturelle, la commune fait partie des sites protégés.

D'un point de vue géologique, la commune de Germigny s'inscrit dans le Bassin parisien. Etant dans le lit majeur de la Loire, sa géologie est assez jeune. En 2019, les carottages effectués confirment que le site de Germigny se situe sur « ...la bordure nord de la grande plaine

¹³ POULAIN, G., dir., 2019, *Rapport de forages géo-archéologique. Site : Oratoire carolingien...*, p. 2, dans VAN WERSCH, L., HENRION, F., POULAIN, G., HOCQUET, F.-P. et SAPIN, CH., 2019, *Germigny-des-Prés (45-Loiret). Oratoire. Rapport d'intervention*, s.l..

¹⁴ Région naturelle s'étalant sur l'Île-de-France et le Centre Val de Loire.

alluviale, au droit de la plaine alluviale de la Loire... »¹⁵. Les géologues identifient les alluvions du site comme étant « modernes » ou « holocènes ». Ces derniers formant la montille sur laquelle s'installe l'oratoire de Théodulf. La région est essentiellement composée de dépôts sédimentaires datant du Miocène ou d'un mélange de dépôts récents du quaternaire et de sédiments miocènes¹⁶.

D'un point de vue patrimoniale, mis à part l'oratoire de Théodulf (fig. 4) et quelques bâtiments plus récents, la commune ne recense aucun site majeur. Les écrits se concentrent sur le site de l'oratoire et les problématiques qui lui sont liées. Les réflexions se penchent sur l'église proprement dite mais également sur l'existence possible d'un complexe résidentiel voire, pour certain, d'une villa gallo-romaine. A ce jour, aucune trace de complexe ou de villa n'a pu être trouvée¹⁷.



Fig. 4. Germigny-des-Prés. Oratoire de Théodulf. Vue extérieure depuis le sud-ouest. Fin 8^e-début 9^e siècles. (LAMBRIGTS, R., 2019.)

¹⁵ POULAIN, G., dir., 2019, *Rapport de forages géo-archéologique. Site : Oratoire carolingien...*, p. 2, dans VAN WERSCH, L., HENRION, F., POULAIN, G., HOCQUET, F.-P. et SAPIN, CH., 2019, *Germigny-des-Prés (45-Loiret). Oratoire. Rapport d'intervention*, s.l.

¹⁶ *Ibid.*, p. 2-3.

¹⁷ CAMERLYNCK, CH., SAPIN, CH. et VAN WERSCH, L., 2019, *Prospection géophysique sur le site de Germigny-des-Prés*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 2.

b) Contexte historique du site :

L'histoire du village et de sa région est vaste et complexe. Il semble que l'Orléanais fût occupé quasiment dès le début de son histoire. Il sera donc question de développer de manière non-exhaustive les différentes informations quant à l'historique de la région. En effet, il paraît pertinent, au vu du nombre de sites de la région, de revoir l'occupation dans sa globalité tout en la mettant en parallèle avec le village de Germigny. Cependant, les mentions du village sont peu nombreuses même après l'implantation de l'Oratoire de Théodulf¹⁸. Cela s'explique sûrement par l'existence de sites plus importants à l'époque (comme l'abbaye de Fleury).

L'Orléanais est occupé dès la Préhistoire. Les exemples d'occupation ne manquent pas. Une occupation paléolithique est confirmée sur le site de la grotte de Foulon à Châteaudun (fig. 5) (à moins de 100km de Germigny-des-Prés). La région est donc fréquentée par des groupes nomades de chasseur-cueilleurs, depuis au moins 300 000 ans¹⁹. Par ailleurs, une occupation néolithique est aussi certaine. L'Orléanais offre un cadre parfait pour l'implantation des peuples néolithiques durant le 6^e-5^e millénaire. Le site d'Arcy-sur-Cure démontre bien une occupation longue depuis le Paléolithique jusqu'au Néolithique²⁰(fig. 6). Concernant Germigny, jusqu'aujourd'hui, aucune découverte ne prouve une occupation durant ces périodes. Néanmoins, il est possible que le site ait accueilli une implantation préhistorique ou protohistorique.

¹⁸ CROUTELLE, J., 2019, *Regard sur une construction fameuse. L'église de Germigny-des-Prés à l'épreuve des sources*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 2.

¹⁹ <http://www.grottesdufoulon.sitew.com>, consulté le 27 juillet 2019.

²⁰ La zone autour d'Arcy-sur-Cure regroupe d'autres sites néolithiques comme les grottes de Saint-Moré ou de Merry-sur-Yonne.

LIGER J.-C., 1995, *Concrétionnement et archéologie aux grottes d'Arcy-sur-Cure (Yonne)*, dans *Bulletin de la Société préhistorique française*, tome 92, n°4, p. 449.

LEROI-GOURHAN, A., 2002, *Le temps de l'Aurignacien à Arcy-sur-Cure*, dans *Gallia préhistoire. Suppléments*, supplément 34, p. 45.

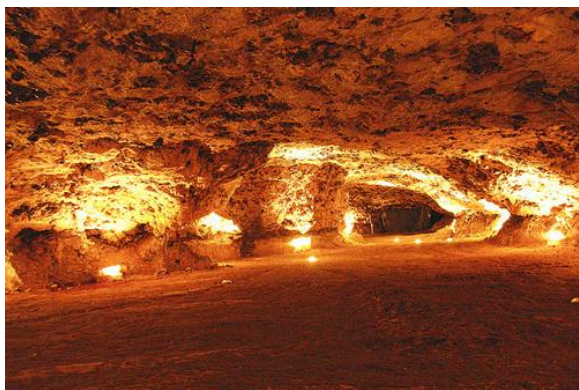


Fig. 5. Châteaudrun. Grotte de Foulon, Vue intérieure. (<http://www.grottesdufoulon.sitew.com>, téléchargé le 28 juillet 2020.)



Fig. 6. Arcy-sur-Sure. Grotte du sanctuaire. Vue intérieure du sud-est. (BUTAËYE, D., <https://www.bourgogne-tourisme.com/a-voir-a-faire/nature/sites-naturels/PCUBOU0890000169/detail/arcy-sur-cure/grottes-d-arcy-sur-cure>, téléchargé le 27 juillet 2020.)

L'implantation dans la région est assurée pour la période gallo-romaine. Les exemples ne manquent pas, on peut citer le site de Pithiviers-le-Vieil qui accueillait des vestiges datant d'entre le 2^e siècle ACN et le 4^e siècle PCN²¹(fig. 7). Plus proche de Germigny, il existait également le site de Bonnée. Ce site qui accueillait les vestiges d'un théâtre a malheureusement été détruit au 19^e siècle²². Suites aux conquêtes romaines, le Loiret prend de l'importance. La commune de Germigny semble acquérir un certain intérêt en raison d'un gué sur le fleuve et de sa position intermédiaire entre Orléans et Autun (toutes deux des agglomérations importantes durant la période)²³. Néanmoins, on connaît très mal les conditions d'implantation de cette période. La seule information qui peut être confirmée est la suivante : la région est occupée. La découverte de TCA et d'autres vestiges antiques confirme une occupation non loin de Germigny, notamment par l'exemple de Bonnée. Le site de l'Oratoire accueille des restes de céramiques gallo-romaines mais jusqu'à maintenant, aucune structure en pierre gallo-romaine n'a été trouvée²⁴.

²¹ CRIBELLIER, CH. 1999, *Pithiviers-le-Vieil*, dans *Agglomérations secondaires antiques en Région Centre*, Volume 1, Tours : Fédération pour l'édition de la Revue archéologique du Centre de la France, p. 209-210.

²² ID., 1999, *Bonnée*, dans *Agglomérations secondaires antiques en Région Centre*, Volume 1, Tours : Fédération pour l'édition de la Revue archéologique du Centre de la France, p. 197.

²³ CROUTELLE, J., 2019, *Quelle origine pour Germigny ?*, dans SAPIN, CH. (dir.), 2019, *Germigny-des-Prés (Loiret). L'oratoire carolingien*, Auxerre, p. 15.

²⁴ Malgré les témoignages de l'abbé Prévost en 1899 et de Jean Hubert en 1930, l'existence de vestiges gallo-romains à Germigny exige encore des recherches supplémentaires.



Fig. 7. Pithiviers-la-Vieille. Thermes. Vue extérieure. (FONTAINE, A., <https://www.inrap.fr/se-baigner-travailler-prier-pithiviers-le-vieil-4290>, téléchargé le 8 août 2020.)

Après la conquête romaine, une brume archéologique enveloppe la région. Elle reste, a priori, occupée. Avec l'implantation de Saint-Benoit-Sur-Loire au 7^e siècle, la production écrite de l'abbaye permet de nous confirmer un nouvel essor pour la région. Les grandes abbayes d'Orléans et de Fleury fournissent de précieux documents écrits. Néanmoins, ces grandes institutions ne nous livrent aucune information avant le 9^e siècle concernant le site de Germigny²⁵. D'après des écrits plus tardifs, Germigny aurait accueilli les restes d'une villa gallo-romaine mais, comme il sera expliqué plus loin dans le texte, cette affirmation est sujette à débat.

Le site de Germigny est mentionné dans les sources écrites à partir du 8^e-9^e siècles. La première mention du site remonterait à 843 dans un acte épiscopal du monastère de Moutiers-Saint-Laumer, faisant partie du diocèse de Chartres. Elle relate la tenue d'un synode dans la région de Germigny-des-Prés en 843. Néanmoins, il ne concerne pas directement Germigny et serait, selon Janet Nelson, simplement politique. Cette première citation n'aurait donc aucun lien avec l'Oratoire.²⁶

CAMERLYNCK, CH., SAPIN, CH. et VAN WERSCH, L., 2019, *Prospection géophysique ...*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 2.

²⁵ CROUTELLE, J., 2019, *Quelle origine pour Germigny ?*, dans SAPIN, CH. (dir.), 2019, *Germigny-des-Prés (Loiret). L'oratoire carolingien*, Auxerre, p. 15.

²⁶ ID., 2019, *Regard sur une construction fameuse. L'église de Germigny-des-Prés à l'épreuve des sources*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 3-4.

Sur base d'une inscription épigraphique présente dans l'église²⁷ (fig. 8), on retient communément la date de 806 pour la consécration de l'édifice²⁸. Toutefois, cette datation précise est maintenant abandonnée par les historiens de l'art au vu de son incertitude. Il est préférable de ne pas figer une date et de mentionner la période du « début du 9^e siècle ».



Fig. 8. Germigny-des-Prés. Chapiteau nord à l'entrée du chœur. Vue du sol depuis le nord-ouest. s.d. (TREFFORT, C., 2019, p. 2.)

En considérant les différents écrits concernant la présence de Théodulf dans la région, nous pouvons supposer que l'évêque est présent dans le Loiret entre 798 et 818. En effet, sur base du *catalogue des abbés de Fleury*, Théodulf est abbé de Fleury au moins de 798 à 818. Cependant, il semble plausible que Théodulf arrive dans la région dès 796 pour affirmer le pouvoir carolingien²⁹. Sur base de ces documents, il paraît possible de considérer que l'ordre de construction de l'oratoire ait été donné aux alentours de cette période.

²⁷ Cette inscription est, à la suite des recherches de Cécile Treffort et les observations de J. Soyer, considérée comme fautive. Néanmoins, l'authenticité de son message est encore discutée. Selon certains chercheurs, comme Jean Hubert, proposent que la gravure soit basée sur un graffiti ancien. Les recherches continuent donc sur le sujet.

²⁸ TREFFORT, C., 2019, *Les inscriptions de Germigny et la production épigraphique de Théodulf d'Orléans*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 4-6.

²⁹ TIGNOLET, C., 2019, *Théodulf et Orléans*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 2-3.

La raison de l'installation de Théodulf sur le site de Germigny est soumise à des inconnues. Le passé de la commune étant, comme développé plus haut, peu documenté, il n'est pas possible d'affirmer avec certitude les raisons de l'arrivée de l'évêque. Il est courant de lire dans les travaux concernant le site que l'installation de Théodulf est motivée par la présence d'une hypothétique villa. Aucune fouille n'a permis pour le moment de prouver la présence de cette villa sur le site³⁰. Néanmoins, dans les textes médiévaux, le terme *Villa* est utilisé pour parler de l'implantation de Théodulf. L'utilisation de ce terme insinue donc la présence d'au moins un bâtiment résidentiel. Il semble en effet possible que l'oratoire soit compris dans un complexe plus vaste comprenant notamment des bâtiments résidentiels. Malgré les prospections radars de 2016, on ne sait que peu de choses de ce complexe. Aucune structure en pierre n'a été découverte jusqu'à aujourd'hui dans la zone proche de l'oratoire. Une supposition serait que les bâtiments résidentiels accompagnant l'oratoire aient été réalisés en bois.

Les carottages de 2019 réalisés autour du bâtiment semblent confirmer les résultats des prospections radars antérieures³¹. Des fouilles plus importantes pourraient fournir des réponses. L'hypothèse de l'existence d'un complexe accompagnant l'oratoire est donc à vérifier dans le futur sur le site.

En outre, d'un point de vue linguistique, le terme *villa* est sujet à débat. En effet, en latin, ce terme peut se traduire de différentes manières. *Villa* peut désigner à la fois un complexe de bâtiment, une « villa » (dans le sens de bâtiment unique) ou simplement un domaine (sans nécessairement des bâtiments). L'ambiguïté du mot latin ne permet donc pas d'éclaircir la situation. Il pourrait dans ce cas-ci signifier « le domaine de Germigny-des-Prés »³².

Par ailleurs, on trouve dans deux diplômes de Charles le Chauve, la mention d'« un palais royal » à Germigny. Ce terme désigne peut-être une résidence royale qui correspondrait à la *villa* présentée dans les textes antérieurs. Ici encore, le terme latin pose un problème. En effet, pour désigner Germigny, l'auteur a utilisé le terme *Germiniacum*. Selon Ferdinand Lot, le terme peut désigner aussi bien Germigny-des-Prés que Germigny-l'Exempt (près de Bourges).

³⁰CAMERLYNCK, CH., SAPIN, CH. et VAN WERSCH, L., 2019, *Prospection géophysique...*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 2-3.

³¹ POULAIN, G., dir., 2019, *Rapport de forages géo-archéologique...*, p. 5, dans VAN WERSCH, L., HENRION F., POULAIN G., HOCQUET F.-P. et SAPIN, CH., 2019, *Germigny-des-Prés (45-Loiret). Oratoire. Rapport d'intervention*, s.l..

³² CROUTELLE, J., 2019, *Regard sur une construction fameuse...*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 7.

L'existence et l'emplacement de ce *Palatium* n'ont donc pas encore pu être déterminés. Il semble, par rapport aux recherches actuelles, que la raison de l'implantation de Théodulf à Germigny et l'ampleur de son implantation ne peuvent pas être déterminées avec certitude en l'état³³.

La seule justification tangible de l'implantation de Théodulf à Germigny semble être l'appartenance du site au domaine de l'abbaye de Fleury (fig. 2). Ce domaine passe sous la tutelle de Théodulf dans les environs de 796-798 (Cfr partie *Théodulf: un personnage emblématique*). La raison est peut-être simplement d'ordre technique : un lieu proche d'Orléans, de Micy et de Fleury offrant un cadre assez large pour construire un complexe privé et étant protégé des crues de la Loire³⁴.

c) L'oratoire : de sa construction à aujourd'hui

L'histoire de la construction de l'oratoire est encore remplie d'inconnues. Comme le prouve Justine Croutelle dans ses recherches, les mentions écrites du bâtiment sont rares et il faut attendre le 11^e siècle pour que l'église semble regagner de l'intérêt. Cependant, en observant les traces laissées dans le bâti et en analysant l'évolution du bâtiment, il est clair que l'histoire architecturale de l'oratoire a éprouvé de nombreuses modifications. Les différentes phases et les différents remaniements ne sont pas toujours lisibles en raison des restaurations et des enduits qui recouvrent les potentielles traces.

Il est communément admis que l'oratoire est construit au début du 9^e siècle par Théodulf d'Orléans. Comme le montre la recherche de Mme Croutelle, les mentions de la construction de l'église sont plus tardives que cette période. En effet, le site de Germigny est mentionné dans le cadre d'un synode en 843 mais la première mention de l'église remonte à 985³⁵. Pourtant, aucun scientifique ne remet en cause la datation du début 9^e siècle. Jusqu'à maintenant, la date de 806 était retenue à la suite du millésime précédemment cité (fig. 8). Les recherches de Mme

³³ CROUTELLE, J., 2019, *Regard sur une construction fameuse...*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 7.

³⁴ Comme citez précédemment, l'existence de ce complexe est encore à prouver.

³⁵ ID., 2019, *Quelle origine pour Germigny ?*, dans SAPIN, CH. (dir.), 2019, *Germigny-des-Prés (Loiret). L'oratoire carolingien*, Auxerre, p. 15- 17.

Treffort et M. Soyer ont démontré que cette épigraphie était un faux³⁶. La date est pourtant restée dans le conscient collectif. L'utilisation de cette datation persiste peut-être en raison du statut exceptionnel que l'église a acquis lors de sa redécouverte au 19^e siècle ? Elle est alors considérée comme l'église la plus vieille de France et l'un des vestiges les mieux conservés de la période du règne de Charlemagne³⁷. Ce dernier a toujours été le roi des Français par excellence. En réalité, l'église a été décryptée pendant longtemps sous le couvert d'emblème national³⁸. La datation n'en est pas moins plausible et vérifiable. Lors des fouilles de 2019 menées par les chercheurs de l'Université Catholique de Louvain-la-Neuve (UCL), de l'Université de Liège (Uliège) et du Centre d'Etudes Médiévales d'Auxerre (CEM), des découvertes de structures d'une deuxième phase du premier état du bâtiment (nous y reviendrons) ont permis un prélèvement de charbon pour une datation au Carbone 14. Ce prélèvement a permis de situer ces structures à la fin du 8^e siècle³⁹. Lors de cette campagne, un modillon en terre cuite a également été découvert (fig. 9). Celui-ci est réalisé dans une terre argile typique du 7^e-8^e siècles⁴⁰. La datation du début du 9^e siècle semble donc correspondre.

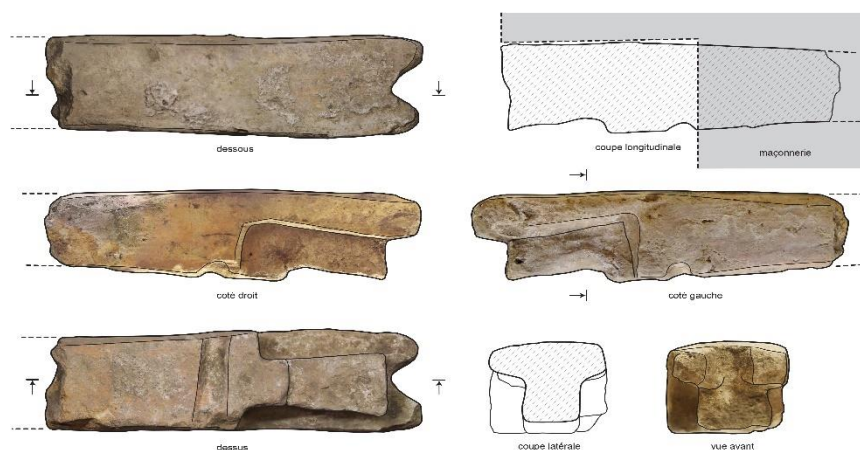


Fig. 9. Germigny-des-Prés. Relevé d'un modillon du Haut-Moyen-Age. Fin 8^e- début 9^e siècles. (Réalisé par le CEM d'Auxerre) (VAN WERSCH, L. et al., 2019, p. 66)

³⁶ TREFFORT, C., 2019, *Les inscriptions de Germigny ...*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 4-6.

³⁷ SAPIN, CH., 2019, *Germigny-des-Prés. Un nouveau regard*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 1.

³⁸ CROUTELLE, J., 2019, *Regard sur une construction fameuse ...*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 6.

³⁹ VAN WERSCH, L., HENRION F., POULAIN G., HOCQUET F.-P. et SAPIN, CH., 2019, *Germigny-des-Prés (45-Loiret). Oratoire. Rapport d'intervention*, s.l., p. 68-70.

⁴⁰ *Ibid.*, p.66.

L'installation du bâtiment s'ancre donc au 9^e siècle. Entre cette période et le 21^e siècle, le bâtiment a-t-il conservé son état d'origine ? Dès le 19^e siècle, les chercheurs ont émis des doutes quant à la conservation de la structure initiale de l'oratoire. Déjà à cette période, les intellectuels s'interrogeaient quant à la véracité de son histoire architecturale. Les observations archéologiques ainsi que les témoignages écrits du 11^e siècle viennent soutenir les doutes présents dès le 19^e siècle. Déjà dans le *catalogue des abbés de Fleury* et le *Liber Miraculorum* de Létald, l'édifice est comparé avec la chapelle palatine d'Aix-la-Chapelle (fig. 10)⁴¹. Cette comparaison fait le lien avec le premier aspect de l'édifice mais pas du tout avec l'aspect actuel. Sur base uniquement de ces témoignages écrits, il semble logique de mettre en doute l'authenticité du bâtiment actuel.



Fig. 10. Aix-la-Chapelle. Chapelle palatine. Vue extérieure depuis le nord, Fin 8^e-début 9^e siècles. (SHRÖDER, B., <https://www.aachen-tourismus.de/fr/decouvrir/sites-incontournables/la-cathedrale-daix-la-chapelle/>, téléchargé le 8 août 2020.)

⁴¹ CROUTELLE, J., 2019, *Regard sur une construction fameuse...*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 4.

La communauté scientifique admet, au vu des différents écrits et des différentes études, que l'oratoire a vécu de nombreuses modifications. Elles ne sont évidemment pas toutes de la même importance. Dans le cas de ce travail, nous avons décidé, comme dans la plupart des recherches antérieures, de nous concentrer sur les trois étapes qui ont le plus modifié le bâtiment entre le 9^e et le 21^e siècles. Dans cette partie nous nous pencherons sur les raisons des modifications et de l'évolution du bâtiment. L'histoire architecturale et les étapes qui la composent seront détaillées dans la partie dédiée aux phases de construction (Cfr partie *Identification des différentes phases de construction*).

Au vu des recherches archéologiques et des écrits, il semble que le premier état de l'oratoire prend la forme d'une église de plan centré accompagné d'absides aux quatre points cardinaux (un plan centré en carré tétraconque) (fig. 11)⁴². Différentes campagnes de recherches et de fouilles se sont penchées sur l'identification des différentes parties d'origine du bâtiment.

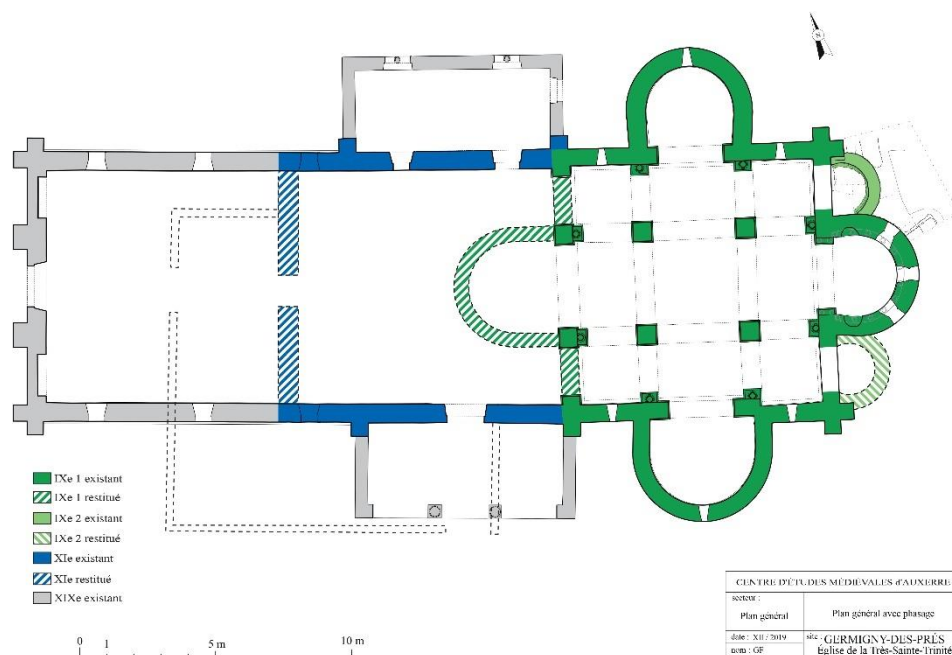


Fig. 11. Germigny-des-Prés. Relevé d'un modillon du Haut-Moyen-Age. Fin 8^e - début 9^e siècles. (Réalisé par le CEM d'Auxerre) (VAN WERSCH, L. et al., 2019, p. 90)

⁴² CHEVALIER, P., 2019, *Une architecture originale ?*, dans SAPIN, CH., (dir.), 2019, *Germigny-des-Prés (Loiret). L'oratoire carolingien*, Auxerre, p. 22.

Le plan d'origine en tétraconque est confirmé à la fois par des relevés radars en 2016 (fig. 12), mais également par des fouilles datant de 1930⁴³ (fig. 13). On considère donc que le plan de l'église s'inscrivait dans un carré dont les côtés accueillait des absides semi-circulaires outrepassées. Le bâtiment primaire correspond au chœur actuel. Selon les interprétations du 19^e siècle, l'église était également surmontée d'une tour lanterne. L'existence d'une tour surmontant le centre de l'édifice au 9^e siècle est plausible. La tour lanterne étant considérée comme un élément léger, il est possible que l'utilisation de moellons et de moyens appareils ait suffi à supporter l'élévation de cet élément. Néanmoins, l'existence d'une coupole est une pure interprétation du 19^e siècle⁴⁴. Cette interprétation est due à l'attribution du style byzantin à la même époque. Les inspirations qui sont à l'origine de Germigny font encore débat aujourd'hui.

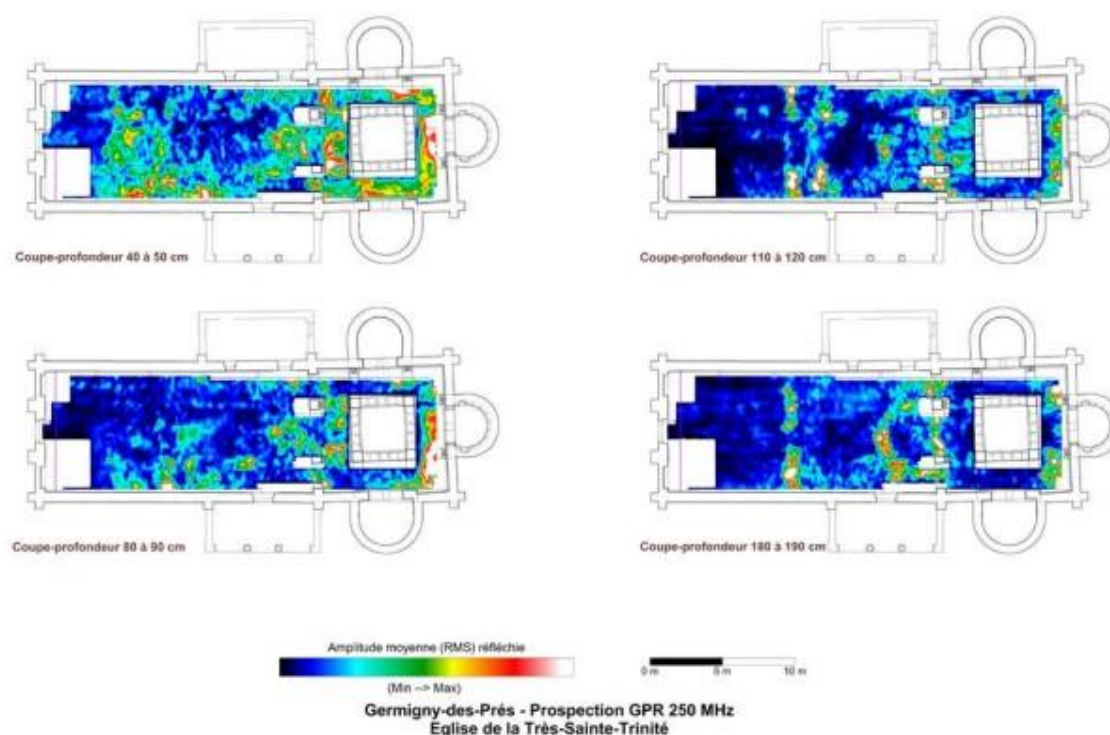


Fig. 12. Germigny-des-Prés. Résultats des prospections radars de l'église. (CAMERLYNCK, CH., SAPIN, CH. et VAN WERSCH, L., 2019, p. 25.)

⁴³ CAMERLYNCK, CH., SAPIN, CH. et VAN WERSCH, L., 2019, *Prospection géophysique...*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 7-13.

⁴⁴ CHEVALIER, P., 2019, *Une architecture originale ?*, dans SAPIN, CH., (dir.), 2019, *Germigny-des-Prés (Loiret). L'oratoire carolingien*, Auxerre, p. 22.

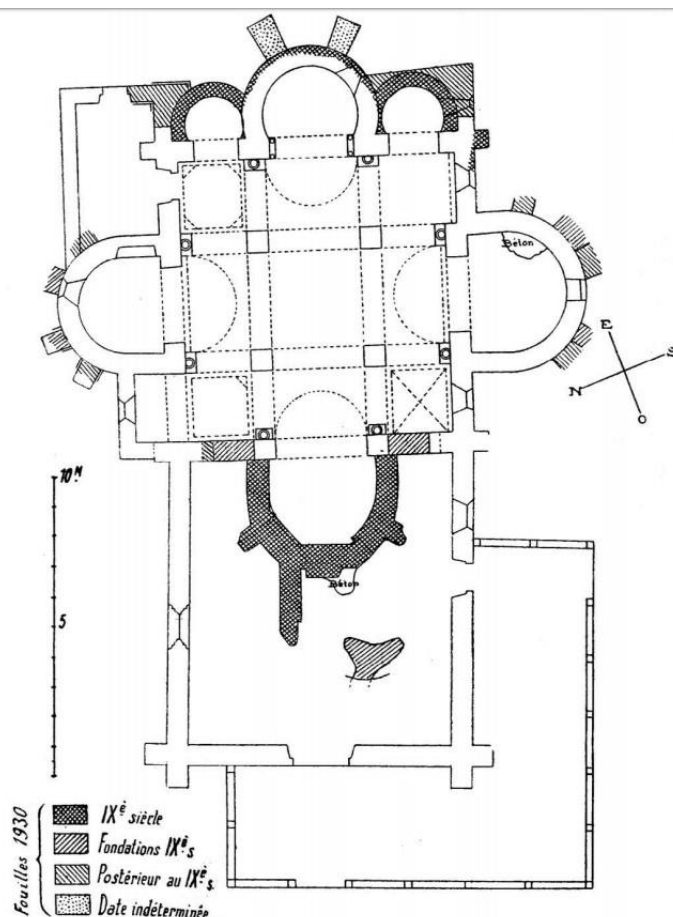


Fig. 13. Germigny-des-Prés. Plan de l'église de Germigny-des-Prés de 1930 d'après Jean Hubert. Congrès archéologique de France de 1930. Fin 8^e-début 9^e siècles. (CHEVALIER, P., 2019, p. 24.)

Le premier état de l'édifice de Théodulf est souvent comparé à la chapelle Palatine d'Aix-la-Chapelle (fig. 10)⁴⁵. Cette affirmation se comprend par le parallèle qui peut être fait entre le plan des deux édifices mais également par le parallèle entre les mosaïques de l'une et l'autre. La comparaison entre les deux bâtiments est, aujourd'hui encore, sujet à débat. Il est difficile d'affirmer si Germigny est véritablement inspiré d'Aix. Pourtant, ils semblent liés. Ce lien est-il dû à leur commanditaire ? Théodulf était un proche conseiller de Charlemagne, il est donc possible que cette construction soit un hommage à l'Empereur. Mais s'il s'agit d'un hommage, pourquoi réaliser ce bâtiment en campagne loin des agglomérations ? Nous ne savons pas si Charlemagne s'est rendu à Germigny. Le souverain se rend bien à Orléans au printemps 800 durant un tour des sanctuaires et des côtes de la Francie occidentale mais aucune

⁴⁵ CROUTELLE, J., 2019, *Regard sur une construction fameuse...*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 4.

mention n'est faite de Germigny⁴⁶. Néanmoins, si l'intention de Théodulf avait été de saluer son souverain, il aurait logiquement réalisé son bâtiment dans une ville, là où l'empereur avait plus de chance de le voir. Il est évident que nous ne pouvons interpréter les intentions d'un homme avec facilité près de 1200 années après son œuvre. La discussion quant à la volonté d'hommage de Théodulf reste donc encore à débattre.

Si l'on s'attarde avec plus d'attention sur la forme des deux bâtiments, là encore les liens qui semblaient irréfutables perdent de leur pertinence. Mis à part le plan centré et la coupole centrale, les deux bâtiments sont très différents. Aix prend la forme d'un polygone centré avec un déambulatoire tandis que Germigny a un plan carré accompagné de quatre absides (fig. 14 et 11). Certes, elles ont toutes les deux un même type de plan, mais considérer cette ressemblance comme une preuve indiscutable reviendrait à lier toutes les églises à plan basilical entre-elles. Le lien semble séduisant, mais sans réel fondement.

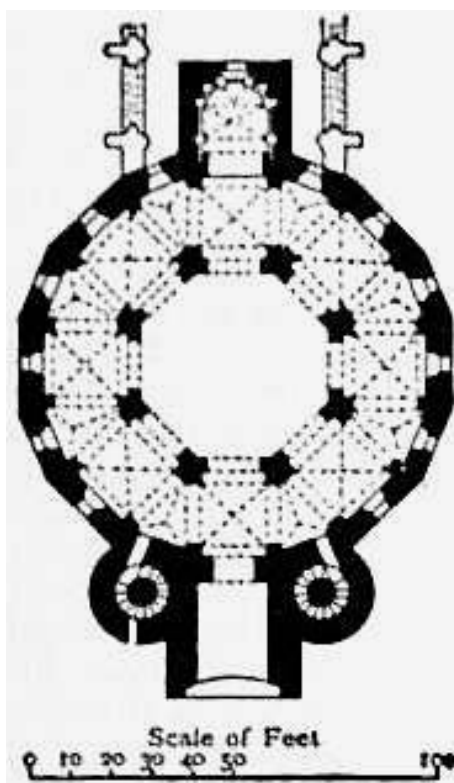


Fig. 14. Aix-la-Chapelle. Plan de la chapelle palatine d'Aix-la-Chapelle. Début 8^e-fin 9^e siècles. (Encyclopaedia Britannica, 1911, p. 405.)

⁴⁶ TIGNOLET, C., 2019, *Théodulf et Orléans*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 5.

Il est d'ailleurs fort probable que l'oratoire ne soit pas terminé lors de sa visite.

Un autre élément qui pourrait lier les deux sites serait l'architecte. Durant la période carolingienne, il est difficile de connaître celui-ci. Néanmoins, Eudes de Metz est souvent considéré comme l'architecte de la chapelle d'Aix. Dès lors, vu le statut de Théodulf, ne sommes-nous pas en droit de nous demander si l'évêque d'Orléans n'a pas tout simplement décidé de prendre le même architecte que Charlemagne ? Par ailleurs, un parallèle peut être établi entre Germigny et plusieurs églises arméniennes. Les ressemblances sont telles que certains chercheurs en ont conclu que l'architecte de Germigny ne pouvait être que d'origine arménienne, comme l'était Eudes de Metz⁴⁷. Dans ce cas, il semble logique de considérer la possibilité qu'Eudes de Metz soit bien l'architecte de Germigny. Ce constat aurait pu être plausible jusqu'il y a peu. En effet, l'affiliation avec l'architecture arménienne a été remise en question en 1998 par Christina Maranci : il est difficile à entendre une telle inspiration durant la dynastie carolingienne au vu de la distance géographique entre ces lieux mais également culturelle. Pascale Chevalier approuve les propos de Christina Maranci en ajoutant que les édifices arméniens pris en exemple tels que l'église Saint-Jean de Baragan (fig. 15) ou la cathédrale Sainte-Etchmiadzine de Vagarchapat (fig. 16), rassemblent trop de différences architecturales pour correspondre à une réelle inspiration. Ces églises sont certes de plan carré avec des absides, mais elles ne comptent pas d'absidioles. Elles sont également bâties en moyens et grands appareils à joints vifs, ce qui n'est pas le cas de Germigny. La différence la plus frappante étant que ces églises arméniennes sont construites pour soutenir leur coupole et l'entièreté du bâtiment est pensée pour accueillir cet élément. A Germigny, la présence d'une

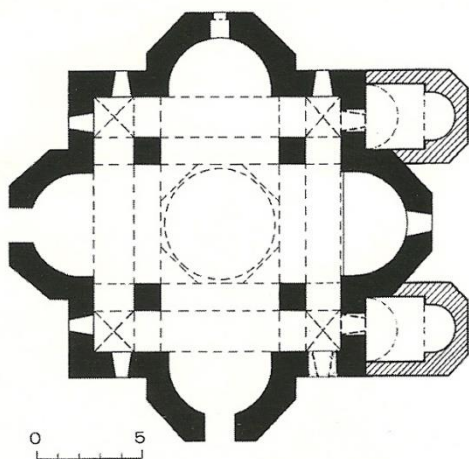


Fig. 15. Baragan. Plan de l'église Saint-Jean. 7^e siècle. (CHEVALIER, P., 2019, p.8)

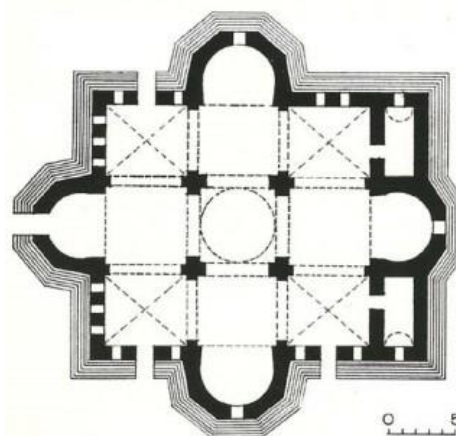


Fig. 16. Vagarchapat. Plan de la cathédrale Sainte-Etchmiadzine. 5^e siècle. (CHEVALIER, P., 2019, p. 22.)

⁴⁷ CHEVALIER, P., 2019, *Germigny, une architecture originale ?*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 2.

coupole avant le 19^e siècle est peu probable. Il semble que l'ajout de celle-ci dans l'oratoire soit une interprétation erronée de cette époque⁴⁸.

Une autre inspiration régulièrement avancée serait que, par ses origines wisigothiques, Théodulf ait été inspiré par des bâtiments de sa région d'origine. On mentionne souvent des édifices comme la Quintanilla de las Vinas (fig. 17) ou San Pedro de la Nave (fig. 18) comme étant des bâtiments qui se rapprochent par le style de Germigny. Ce sont certes des églises en moyens appareils accompagnés d'absidioles à l'est et surmontés d'une petite tour lanterne comme à Germigny, mais leur plan en croix latine les écarte grandement, selon Pascale Chevalier, du plan de l'église carolingienne⁴⁹. Il n'est cependant pas impossible que la connaissance de ces bâtiments ait influencé la vision de l'évêque lors de l'érection de son complexe.

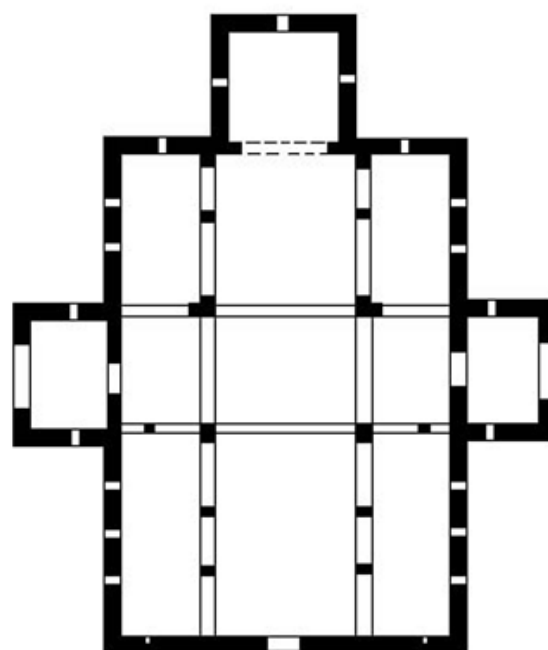
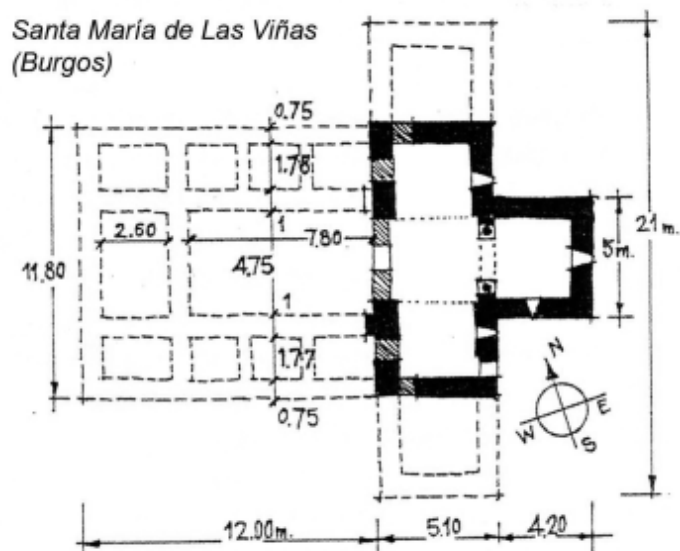


Fig. 17. Mambrillas de Lara. Plan de l'église Sainte-Marie de Quintanilla de Las Vinas. 8^e siècle.
(<https://www.wga.hu/support/plans/zzzarchi/08c/5/vinas.html>, téléchargé le 7 août 2020.)

Fig. 18. El Campillo. Plan de l'église de San Pedro la Nave. 8^e siècle.
(<https://www.wga.hu/support/plans/zzzarchi/08c/5/campillo.html>, téléchargé le 7 août 2020.)

⁴⁸ CHEVALIER, P., 2019, *Germigny, une architecture originale ?*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 8.

ID., 2019, *Une architecture originale ?*, dans SAPIN, CH., (dir.), 2019, *Germigny-des-Prés (Loiret). L'oratoire carolingien*, Auxerre, p. 22-23.

⁴⁹ *Ibid.*, p. 22.

Le plan de Germigny semble tirer son inspiration d'une tout autre culture : la culture antique. En effet, Pascale Chevalier aime voir dans Germigny une référence à l'architecture antique ou tardo-antique. Les exemples de bâtiments tétraconques proches de l'aspect de Germigny sont nombreux. Mme Chevalier voit dans Germigny des ressemblances avec des architectures tardo-antiques telles que l'Hosios David de Thessalonique (fig. 19) ou encore Sant-Miguel de Terrassa (fig. 20). Cette dernière propose en plus un lien intéressant avec les origines hispaniques de Théodulf. De manière plus générale, il semble que ce plan soit inspiré des *Tholos* gréco-romains, mais encore plus des *Fanum* gaulois antiques. Probablement que le lien avec les éléments antiques et tardo-antiques est plus pertinent. Cette volonté de rattacher l'oratoire à une architecture plus prestigieuse ou à un style académique n'a peut-être pas lieu d'être. La combinaison des différents éléments est unique, novatrice. Selon Pascale Chevalier, ne serait-il pas possible de considérer Germigny comme un cas unique, une architecture originale ?⁵⁰

Dans ce cas, étant lié directement à Théodulf, on peut se demander l'influence que celui-ci a eu sur le plan. Ce bâtiment pourrait être beaucoup plus personnel qu'on ne le pense. Evidemment, il est impossible d'affirmer si ce format original de Germigny était une volonté de Théodulf ou simplement une coïncidence due à des intervenants d'horizons différents (locaux et impériaux).

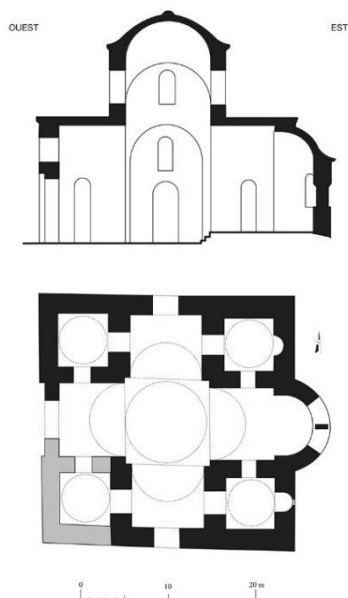


Fig. 19. Thessalonique. Plan de l'Hosios de David. 6^e siècle. (CHEVALIER, P., 2019, , p.10.)

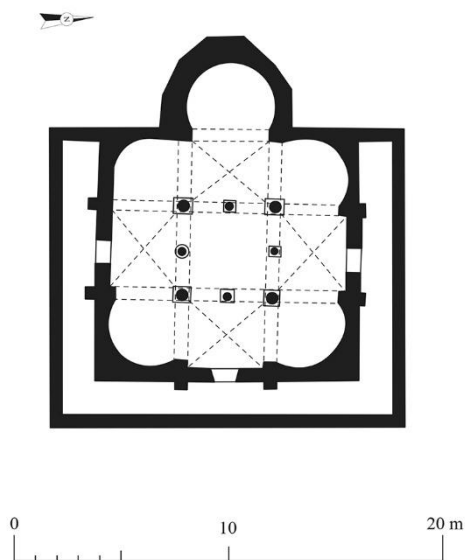


Fig. 20. Terrassa. Plan de l'église Sant-Miguel. 9^e siècle. (CHEVALIER, P., 2019, p.12.)

⁵⁰ CHEVALIER, P., 2019, *Une architecture originale ?*, dans SAPIN, CH., (dir.), 2019, *Germigny-des-Prés (Loiret). L'oratoire carolingien*, Auxerre p. 23.

Vu le manque de données écrites entre le moment de la construction du bâtiment et le 11^e siècle, les modifications et leur enchaînement ne sont pas certains. À la suite d'études récentes, il semble que l'église ait été modifiée entre le 9^e et le 13^e siècle. Cet écart de plusieurs siècles est justifié par l'hypothèse selon laquelle très vite le bâtiment est modifié. Dans les écrits de 1930, on mentionne un incendie qui aurait lieu en 853, selon le *catalogue des abbés de Fleury*, et qui serait peut-être à l'origine de travaux⁵¹. Néanmoins, Mme Croutelle qui a récemment travaillé sur les traces écrites concernant Germigny, ne parle pas de cette mention dans le catalogue. Cette affirmation est peut-être à considérer avec prudence. Le premier texte mentionnant explicitement l'église de Germigny traite de modifications dans le bâtiment ordonnées par l'abbé de Fleury, Hugues (1037-1043). L'ampleur ou les zones touchées par ces modifications sont inconnues⁵². Les zones concernées sont peut-être à mettre en lien avec le potentiel incendie de la fin du 9^e siècle. L'écart chronologique entre l'intervention de Hughes et l'incendie est cependant important.

En 2002, plusieurs zones anciennes ont été repérées par le CEM. Ces zones, au vu de leur assemblage et leur position, pourraient correspondre à une reprise du bâtiment dans les environs de l'an mil ou à un état premier du bâtiment qui nous est inconnu ou qui a été tronqué par l'historiographie. L'enquête est toujours en cours pour comprendre précisément comment s'articulent les modifications à cette époque. Il semble certain qu'entre le 9^e siècle et le 11^e siècle (date donnée par le CEM à la suite de leurs recherches), l'oratoire reçoit sa première modification majeure⁵³. En effet, l'abbé Hughes commande des travaux dont nous ne connaissons pas l'ampleur et il introduit sur le site quatre moines bénédictins pour l'entretien du site⁵⁴. La modification du bâtiment pourrait alors être justifiée par l'augmentation de son utilisation. Néanmoins, il est plus prudent d'agrandir cet écart jusqu'au 13^e siècle. C'est en effet au début du 13^e siècle que l'église acquiert son statut de paroisse⁵⁵. Il semble donc pertinent de penser que l'édifice ait pu être modifiée avant d'accueillir plus de fidèles. Les modifications de

⁵¹ HUBERT, J., 1931, *Germigny-des-Prés*, extrait du *Congrès archéologique de France de 1930*, Paris, p. 8-9.

⁵² CROUTELLE, J., 2019, *Regard sur une construction fameuse...*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 5.

⁵³ BÜTTNER, S. et SAPIN, CH., 2019, *une construction de pierre*, dans SAPIN, CH., (dir.), 2019, *Germigny-des-Prés (Loiret). L'oratoire carolingien*, Auxerre, p. 31.

⁵⁴ CROUTELLE, J., 2019, *Op. Cit.*, p. 5.

⁵⁵ *Ibid.*, p. 6.

cette période concernent principalement un agrandissement de l'édifice. Les détails de cette modification seront traités dans la partie *Identification des différentes phases de construction*.

On a longtemps mentionné les modifications du 15^e siècle, mais au vu des recherches récentes, il semble que les modifications attribuées à cette période sont en réalité antérieures. Selon les recherches et les études hagiographiques, durant la fin du Moyen-Age et les Temps Modernes, l'église ne subit aucune modification importante. Il est mentionné que l'église est réparée en 1744 mais sans détails des interventions. Le terme de « réparations » ne sous-entend aucune modification de la structure du bâtiment⁵⁶. Au fur et à mesure l'oratoire semble tomber dans l'oubli et n'est considéré que comme une paroisse de village sans aucune particularité apparente. Le bâtiment est redécouvert au 19^e siècle. Selon les écrits et les dessins (notamment d'Albert Delton)(fig. 21), le bâtiment est proche de la ruine tout en conservant un aspect proche des interprétations faites pour la seconde phase du Moyen-Age⁵⁷.



Fig. 21. DELTON, A., Eglise de Germigny-des-Prés, 1841, Charenton-le-pont, Médiathèque de l'architecture et du patrimoine, Aquarelle, 82/45, vue générale. (CROUTELLE, J., 2019, p.12.)

⁵⁶ CROUTELLE, J., 2019, *Regard sur une construction fameuse...*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 6.

⁵⁷ ID., 2019, *Historiographies et restaurations*, dans SAPIN, CH., (dir.), 2019, *Germigny-des-Prés (Loiret). L'oratoire carolingien*, Auxerre, p. 12.

Entre le Moyen-âge et les Temps Modernes, l'église sera ponctuellement citée par des historiens mauristes traitant de l'historique du diocèse d'Orléans. L'église est présentée dans les écrits pour son lien avec son commanditaire. A partir du 19^e siècle, l'église va être redécouverte par des auteurs comme l'abbé Prevost ou Albert Delton. L'intérêt grandissant des intellectuels va entraîner l'élévation du bâtiment au statut d'emblème national et d'église la plus vieille de France. Vers 1850, l'église intéresse beaucoup d'éminents scientifiques de l'époque comme notamment Eugène Viollet-le-Duc ou Mérimée⁵⁸. Les écrits de l'époque sont élogieux et de ces nombreuses interprétations sentimentales sont restées beaucoup de fausses idées sur le bâtiment (comme le fait qu'un palais royal se cache autour du bâtiment, rien ne prouve cela dans les sondages radars)⁵⁹. Après des tentatives de restaurations entre 1850 et 1860, Juste Lisch va être envoyé sur le chantier vers 1863. Très vite, les recherches mentionnent une inspiration byzantine et orientale pour le bâtiment⁶⁰. Lisch va fortement s'inspirer de ces interprétations pour restaurer l'église. Il va essentiellement concentrer ses travaux sur l'agrandissement de la nef (sur demande des paroissiens⁶¹) ainsi que sur la tentative de reconstitution de l'état d'origine. Il détruit notamment toutes les parties qu'il considère comme récentes⁶². C'est la phase qui modifie sûrement le plus l'aspect de l'église, mais également celle qui nous est le mieux renseignée. L'entièreté des modifications de cette période ont débouché sur l'aspect actuel du bâtiment.

L'oratoire de Germigny-des-Prés a donc connu trois étapes principales :

- Une première construction en plan centré carré tetraconque avec une croix imbriquée au 9^e siècle qui est interprétée comme l'état d'origine du bâtiment.
- Dans un second temps, le bâtiment est modifié courant du Moyen-Age. Cette modification est soit due à une reprise précoce du chantier du 9^e siècle, soit motivée par l'arrivée d'une communauté de moines sur le site au 11^e siècle, soit en raison du changement de statut de l'église au 13^e siècle.

⁵⁸ CROUTELLE, J., 2019, *Regard sur une construction fameuse...*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 10.

⁵⁹ *Ibid.*, p. 7.

⁶⁰ *Ibid.*, p. 8.

⁶¹ *Ibid.*, p. 18.

⁶² *Ibid.*, p. 21.

- Les dernières modifications importantes datent du 19^e siècle lors de chantiers de restaurations et d'agrandissements. Cette dernière étape débouchera sur le bâtiment conservé aujourd'hui.

d) Théodulf : Un personnage emblématique

Théodulf est un personnage emblématique de cette période. Il est reconnu comme l'un des représentants et des acteurs de ce que les chercheurs appelleront plus tard *la Renaissance carolingienne*⁶³. Certes, moins souvent mentionné qu'Alcuin, lié dans la culture populaire au renouveau du système scolaire de Charlemagne⁶⁴, il n'en demeure pas moins une personnalité importante de la cour de Charlemagne à partir de la fin du 8^e siècle.

Les origines de Théodulf sont mal connues. Il semblerait que Théodulf naisse en 755 en Espagne du Nord. Selon les sources, il serait soit originaire de la province de Saragosse ou de la Catalogne. On peut affirmer sans trop de risques qu'il tire ses origines de la culture wisigothique. Formé dans sa région de naissance, il quitterait son pays dans les environs de 778-780 à la suite de l'occupation arabe et de la tension grandissante dans la région. Après un passage par la Septimanie, il se fait remarquer par Charlemagne et rejoint sa cour⁶⁵.

Théodulf est mentionné comme faisant partie de l'entourage de Charlemagne dans les environs de 790. A cette époque, il semble déjà jouir d'une réputation intellectuelle. Cette réputation, il la doit à ses réalisations littéraires. Il est, en effet, à l'origine de textes divers mais ce sont essentiellement ses poèmes et ses écrits réformateurs qui nous sont parvenus. Il semble que ce talent soit reconnu dans la cour de Charlemagne. Il est notamment désigné responsable rédactionnel de la position des Francs par rapport au Concile de Nicée en 791⁶⁶. Il n'est pas le

⁶³ TIGNOLET, C., 2019, *Théodulf et Orléans*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 1.

⁶⁴ Il s'agit ici d'une affirmation purement populaire. La renaissance carolingienne comprend énormément d'éléments, dont la modification de l'enseignement, et mériterait, par sa complexité un développement beaucoup plus pointilleux.

⁶⁵ *Ibid.*, p. 3.

⁶⁶ Il s'agit du deuxième concile de Nicée qui se déroula en 787. Il mit fin au conflit des iconoclastes. Il réinstaura le culte des images dans le culte chrétien. L'impulsion fut lancée par l'impératrice Irène mais l'Église romaine suivit l'avis des Byzantins confirmant l'importance des idoles, des icônes et des reliques. L'Église franque, représenté par Théodulf ou encore Alcuin, s'opposa à cette restauration du culte des idoles, confirmant une

seul à participer à ce texte, mais en serait l'un des acteurs principaux. Il s'agit d'un écrit important pour Charlemagne et pour l'Église franque⁶⁷. En aucun cas, une personnalité dont la valeur intellectuelle n'était pas reconnue n'aurait vu se voir confier une telle tâche. Etant un aspect important de la vie de Théodulf, il semble intéressant d'avoir une vision globale de ses productions et des sujets qu'il affectionne.

Voix de la cour pour certains thèmes théologiques et poète, on pense que la majorité des compositions de Théodulf nous sont parvenues. Dans ces écrits, il traite de la vie à la cour, des rivalités dans cette dernière et n'hésite pas à mettre Charlemagne en exergue. Est-ce cette proximité avec la cour et Charlemagne lui-même qui est à l'origine des différents avantages que Théodulf aura lors de sa vie ?

Sa carrière littéraire comprend également des réflexions plus régionales qui se penchent sur des situations plus courantes de la société. Il traitera notamment de la mission des prêtres au sein du diocèse d'Orléans. Ces écrits ont pour but d'appuyer sur le rôle de « professeur » et de guide des prêtres. Théodulf y insiste sur les règles et les pratiques à enseigner aux fidèles⁶⁸. Ce texte visait à l'origine un unique diocèse, mais aura un retentissement important dans le territoire franc⁶⁹. Sa portée universelle en fait un exemple important des écrits typiques de *la Renaissance carolingienne*.

Dans certains de ses poèmes, Théodulf s'efforce d'appliquer les prescriptions de la cour de Charlemagne. Il édifie, par exemple, un bâtiment dans le but d'accueillir les personnes dans le besoin, comme le conseille la cour royale⁷⁰. Selon certains chercheurs, il est possible de

position iconoclaste. Le texte produit par Théodulf exprimant cette position s'appelle *l'Opus caroli regis contra synodum*. A ce dernier s'ajoutent les écrits d'Alcuin sur le sujet, formant à deux les *Libri carolini*. Il faut attendre 843 pour que le culte des images soit réinstauré dans toutes les églises.

⁶⁷ TIGNOLET, C., 2019, *Théodulf et Orléans*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 2.

⁶⁸ ROUQUETTE, E., 2019, *Les poèmes de Théodulf. Témoins de leur époque ?*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 8-9.

⁶⁹ TIGNOLET, C., 2019, *Op. Cit.*, p. 4.

⁷⁰ Il n'a malheureusement pas encore été possible d'identifier le lieu de la construction de ce bâtiment. Il est donc possible que ce « domus » n'ait jamais vu le jour. Néanmoins, l'intention de construction reste certaine.

discerner à travers la production de Théodulf une volonté de respecter et de mettre en avant les recommandations élaborées par la cour royale⁷¹.

Il pourrait être très intéressant d'approfondir la discussion sur la production de Théodulf. Il ressort comme un grand intellectuel de sa période. Cet aspect de sa personnalité a déjà été traité avec beaucoup plus de précision dans les écrits de Claire Tignolet et d'Enimie Rouquette. La découverte d'une partie du contexte de vie de Théodulf nous permet d'entrevoir son environnement de vie et quelques-unes de ses influences. Dans ce court aperçu de la production de Théodulf, il semble ressortir un profond attachement, un profond respect pour la cour carolingienne, notamment envers Charlemagne lui-même. Il semble attaché aux réflexions, aux réformes et aux propositions faites par les intellectuels de la cour.

Comme on peut s'en douter, la carrière politique de Théodulf est étroitement liée à la cour carolingienne. Après son arrivée à cette dernière dans les alentours de 790, il se voit offrir plusieurs titres qui nous intéressent particulièrement dans le cas de Germigny.

Dans les environs de 796-798, Théodulf accède au titre d'abbé de Fleury (à Saint-Benoît-sur-Loire), de Saint-Aignan, de Saint-Liphard, de Micy mais également au titre d'évêque d'Orléans⁷². Par ces titres, Théodulf obtient de nombreuses terres, mais aussi de nombreuses responsabilités. Pourquoi avoir mis Théodulf en charge de ces territoires ? Contrairement à ce que l'on pourrait croire, l'installation de Théodulf dans la région ne sonne pas comme une sanction de Charlemagne. Théodulf voyage régulièrement et reste en contact avec le souverain et ses conseillers. Il participe notamment aux discussions au sein de la cour de Charlemagne sur la procession du Saint-Esprit en 809 ou compte parmi les privilégiés qui assistent à la rédaction du testament de Charlemagne en 811⁷³. En outre, si l'on met en parallèle le parcours de Théodulf et d'Alcuin, ce dernier est également installé à Tours à cette même période. Il semble donc que les choix de placements de ces intellectuels soient réfléchis. Dans le cas d'Orléans, la région se trouve à une position stratégique permettant une proximité avec

⁷¹ TIGNOLET, C., 2019, *Théodulf et Orléans*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 4.

⁷² *Ibid.*, p. 2.

⁷³ *Ibid.*, p. 3.

l'Aquitaine,⁷⁴ mais également la Bretagne, territoire sur lequel Charlemagne a des vues. Le choix du roi de mettre un de ses proches conseillers à cet emplacement semble donc totalement calculé. Cette décision démontre également la confiance qu'à Charlemagne envers Théodulf. Le souverain carolingien n'aurait, semble-t-il, pas mis une personne dont il n'avait pas confiance à une position aussi importante et stratégique. Pour conforter cette théorie, Léon III⁷⁵, proche de Charlemagne, honore Théodulf du *Pallium* en 800. Il est alors consacré archevêque à titre personnel. Ce changement de statut ne modifiant pas celui de la ville d'Orléans⁷⁶.

Concernant, la ville d'Orléans, étant donné les origines hispaniques de Théodulf, il est intéressant de se pencher sur la perception de la population à l'arrivée du conseiller dans la région. En effet, comme le développe Mme Tigolet dans ses recherches, on sait que l'intégration d'étrangers a pu poser des problèmes aux populations comme le prouve le cas de Leidrade à Lyon⁷⁷. Aucun témoignage ne mentionne une opposition à l'arrivée de Théodulf à Orléans. Par ailleurs, comme expliqué précédemment, Théodulf ayant œuvré pour soutenir les différentes couches de la société avec, par exemple, la construction de bâtiment pour accueillir les plus démunis, il semble possible que Théodulf fût relativement bien accueilli dans l'Orléanais⁷⁸.

L'œuvre de Théodulf dans la région ne se limite pas à des écrits pertinents et à la construction d'un bâtiment pour les démunis. Il n'est pas simple de connaître l'entièreté des actes de l'évêque dans la région, mais certains de ses « faits d'armes » sont restés dans les écrits par leur importance. Outre la construction de Germigny, Théodulf est, notamment, à l'origine de la restauration de l'abbaye de Micy-Saint-Mesmin. Cette restauration serait d'une telle importance qu'elle est célébrée comme une « refondation »⁷⁹.

⁷⁴ Sous la responsabilité de Louis le Jeune depuis 781, mais sur lequel Charlemagne préfère avoir un regard.

⁷⁵ Léon III est Pape entre 795 et 816. Il est inscrit dans l'histoire comme le Pape qui sacra Charlemagne Empereur en 800. Léon III est de plus proche de ce dernier.

⁷⁶ TIGNOLET, C., 2019, *Théodulf et Orléans*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 3.

⁷⁷ Evêque bavarois d'origine qui s'heurta à une opposition locale menée par le neveu (Hilduin) de l'évêque précédent (Adon).

⁷⁸ *Ibid.*, p. 5.

⁷⁹ *Ibid.*, p. 4.

Après la mort de Charlemagne en 814, son successeur, Louis le Pieux, destitua Théodulf de tous ses titres en 818. La raison de cette disgrâce serait liée à un soutien que Théodulf aurait apporté à Bernard d'Italie. Ce dernier, neveu de Charlemagne, se révolta en 817 contre Louis le Pieux. La participation de Théodulf à cette révolte est encore discutée à ce jour. L'ancien évêque d'Orléans finira ses jours dans la prison monastique d'Angers. Il décède le 18 décembre 820⁸⁰.

Malgré son implication dans la *Renaissance carolingienne* et son implication politique, Théodulf resta absent des écrits de ses prédécesseurs. Il n'est, par exemple, pas mentionné dans la *Vita Sancti Maximini* de Berthold ou dans le premier livre des *Miracula sancti Benedicti* d'Adrevald datant du 9^e siècle. Claire Tigolet interprète cette absence comme l'exemple d'un malaise régional lié à sa disgrâce de 818. Elle considère qu'en plus de ce malaise, l'abbaye de Fleury tente de s'émanciper du pouvoir épiscopal et que cette volonté justifie également l'absence de Théodulf dans les écrits d'Adrevald. La première mention conservée de Théodulf après son décès est attribuée à Létald en 985⁸¹.

⁸⁰ TIGNOLET, C., 2019, *Théodulf et Orléans*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 6.

⁸¹ CROUTELLE, J., 2019, *Regard sur une construction fameuse...*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 4.

3) Identification des différentes phases de construction :

Comme expliqué précédemment, l'histoire du site est remplie d'hypothèses et d'inconnues. Son histoire architecturale essuie donc les mêmes tares. Il est certain, à la vue des différentes traces dans le bâti que le bâtiment a subi plusieurs remaniements. Certains de ces chantiers ont été clairement identifiés, d'autres sont encore hypothétiques. Selon les périodes, en plus des observations archéologiques, les chercheurs ont pu s'appuyer sur des preuves iconographiques (du 19^e siècle) ou textuelles (notamment du 11^e siècle). Dans la partie précédente, nous avons survolé l'histoire du site et de son commanditaire. Pour pouvoir modéliser les différentes étapes de construction de l'oratoire, il est néanmoins nécessaire de détailler toutes les modifications appliquées. Comme spécifié dans la partie précédente, trois phases de constructions sont souvent identifiées par les chercheurs : Le bâtiment primitif (9^e siècle), le bâtiment roman (c.a. 11^e siècle) et le bâtiment post-intervention du 19^e siècle.

a) Bâtiment primitif : 9^e siècle :

L'état d'origine du bâtiment est connu grâce à des fouilles effectuées en 1930, des observations réalisées sur le bâti en 2002 par le CEM, un sondage radar réalisé en 2016 ainsi qu'aux fouilles de 2019 (Cfr. partie *L'oratoire : de sa construction à aujourd'hui*).

Dans son premier état, l'oratoire se présente comme une église de plan centré en petits et en moyens appareils pour les chainages et montages. Le plan d'origine s'organise en deux carrés imbriqués, le premier carré est délimité par quatre piles supportant une tour lanterne. Le second carré de 10 m de côté correspond aux limites de l'église. Les deux carrés sont traversés dans son plan par une croix grecque permettant de rythmer le bâtiment. Chacun des bras de cette croix se termine par une abside (et deux absidioles à l'est). Le plan de cet état primaire correspondrait au sanctuaire actuel (fig. 11). Ce type de plan se retrouve dans de nombreuses églises antérieures dont il a déjà été traité (cfr partie *L'oratoire : de sa construction à aujourd'hui*).⁸²

⁸² CHEVALIER, P., 2019, *Germigny, une architecture originale ?*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 8.
 ID., 2019, *Une architecture originale ?*, dans SAPIN, CH., (dir.), 2019, *Germigny-des-Prés (Loiret). L'oratoire carolingien*, Auxerre, p. 22-23.

Les pierres utilisées sont le grès grossier, le silex, la brèche et le calcaire lacustre avec semble-t-il une préférence pour ce dernier. Ce sont des pierres de la région, rien d'étonnant à ce qu'elles soient présentes dans l'état primitif du bâtiment, en outre, elles servent d'identificateurs pour les parties anciennes⁸³. En 2019, les observations sur l'absidiole nord montrent également que le mortier de chaux utilisé est orangé à l'état humide et beige à l'état sec. Le mortier de l'abside n'a pas pu être observé étant donné qu'il a été remplacé par du ciment à la chaux hydraulique au 19^e siècle (fig. 22). Le mortier de chaux observé est alors appliqué en joints beurrés dans la partie interne⁸⁴.



Fig. 22. Germigny-des-Prés. Sondage 2. Articulation entre l'abside orientale et l'absidiole nord. Fin 8^e-début 9^e siècles. Vue extérieure depuis l'est. (Réalisé par le CEM d'Auxerre) (Van Wersch, L. et al., 2019, p. 43)

⁸³ SAPIN, CH., BÜTTNER, S. et AUMARD, S., 2019, *Germigny-des-Prés. Nouvelles observations archéologiques sur le bâti*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 13.

⁸⁴ VAN WERSCH, L., HENRION F., POULAIN G., HOCQUET F.-P. et SAPIN, CH., 2019, *Germigny-des-Prés (45-Loiret). Oratoire. Rapport d'intervention*, s.l., p. 41-43.

Les absides sont toutes les trois surmontées (on suppose toutes les quatre) d'une voûte en cul-de-four. Quant aux absidioles, ayant été modifiées entre le 9^e siècle et le 19^e siècle, pour ensuite être détruites à la restauration de cette même époque, leur couverture est inconnu. Néanmoins, au vu des sondages de 2019 (fig. 23), de l'épaisseur des murs de l'absidiole ainsi que des contrebutements présents, les chercheurs en tirent la conclusion que l'absidiole nord accueillait certainement une voûte⁸⁵. Il est possible que la seconde absidiole ait suivi le même schéma. Au 19^e siècle mais également durant les fouilles de 1930, les chercheurs pensaient que ces absidioles dataient d'une seconde phase de construction, potentiellement liée avec l'ajout de la sacristie au nord à l'époque romane. Néanmoins, en 2019, les fouilles à l'emplacement du sondage de 1930 ont pu déterminer que les plans de 1930 n'avaient pas rendu correctement les absidioles. Ces dernières, au vu des mortiers, de la position des maçonneries par rapport à l'abside ainsi que le sol retrouvé, dataient bien du 9^e siècle. Cependant, elles viendraient s'ajouter dans une seconde phase du premier chantier⁸⁶. Pour confirmer ces observations, les structures découvertes ont permis un prélèvement de charbon dans les mortiers pour une datation au Carbone 14. Les résultats ont permis de mettre en évidence une datation de ces structures vers la fin du 8^e siècle⁸⁷. Les absidioles sont donc bien postérieures de l'abside, mais leur construction est proche de celle de l'abside.

L'épaisseur des murs primitifs quant à eux a pu être observée durant les sondages de 2019 pour certaines parties (fig. 23). En 2019, on a pu constater que le mur de l'absidiole mesurait 0,44m d'épaisseur⁸⁸. Par extrapolation on peut considérer que

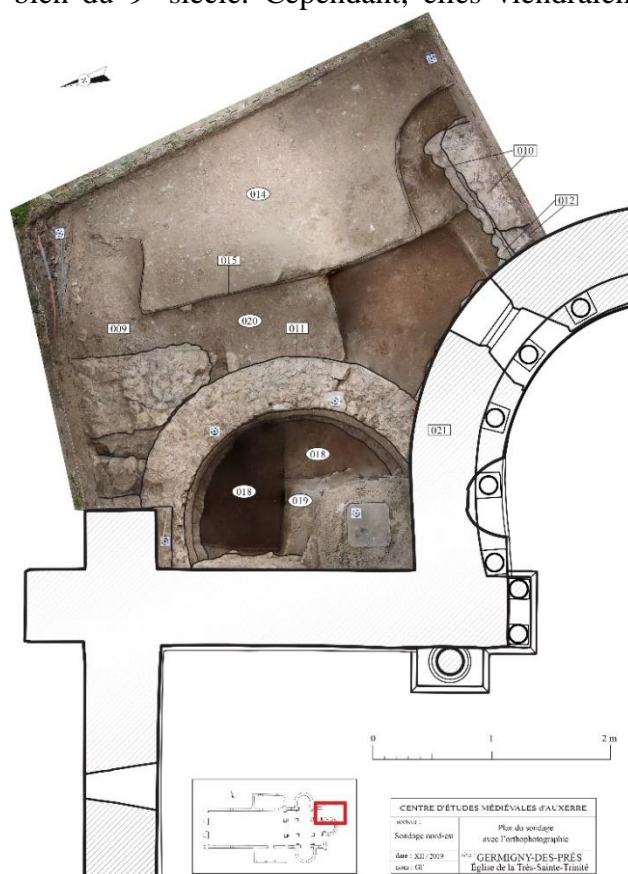


Fig. 23. Germigny-des-Prés. Relevé du sondage 2. Fin 8^e- début 9^e siècles. (VAN WERSCH, L. et al., 2019, p. 39).

⁸⁵ VAN WERSCH, L., HENRION F., POULAIN G., HOCQUET F.-P. et SAPIN, CH., 2019, *Germigny-des-Prés (45-Loiret). Oratoire. Rapport d'intervention*, s.l., p. 89.

⁸⁶ *Ibid.*, p. 41.

⁸⁷ *Ibid.*, p. 90.

⁸⁸ *Ibid.*, p. 42.

l'autre absidiole partageait les mêmes caractéristiques. Ce détail est confirmé dans le relevé de 1930 dans lequel il confirme une épaisseur de 0,43 à 0,47 m d'épaisseur pour les deux absidioles⁸⁹. Pour le reste des structures, on ne peut se baser que sur les relevés modernes (fig. 11). Dès lors, les absides et les murs du sanctuaire conservent une épaisseur d'un mètre.

L'existence de la quatrième abside à l'ouest est confirmée par les prospections radars réalisés en 2016⁹⁰. Durant les fouilles de 1930, un sondage fût ouvert à l'emplacement de l'abside occidentale (fig. 13). Le rapport de fouilles mentionne que l'abside n'est pas de forme semi-circulaire. L'abside est octogonale à pans coupés⁹¹. Cette affirmation n'est pas vérifiable par les prospections radars et aucune fouille n'a été réalisée depuis 1930 dans cette zone du bâtiment. D'après les fouilles, de cette abside part une structure de 2,20m se dirigeant vers l'ouest mais qui n'a pas été repérée en 2016. Il semblerait qu'elle soit le vestige d'un porche dont on ne connaît pas l'ampleur. La partie occidentale du bâtiment primitif est la partie la moins bien documentée en raison de son enfouissement sous la nef actuelle.⁹²

⁸⁹ HUBERT, J., 1931, *Germigny-des-Prés*, extrait du *Congrès archéologique de France de 1930*, Paris, p. 544.

⁹⁰ CAMERLYNCK, CH., SAPIN, CH. et VAN WERSCH, L., 2019, *Prospection géophysique...*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 7.

⁹¹ *Ibid.*, p. 2.

HUBERT, J., 1931, *Germigny-des-Prés*, extrait du *Congrès archéologique de France de 1930*, Paris, p. 545.

⁹² CAMERLYNCK, CH., SAPIN, CH. et VAN WERSCH, L., 2019, *Op. Cit.*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 8.



Fig. 24. DELTON, A., Eglise de Germigny-des-Prés, 1841, Charenton-le-pont, Médiathèque de l'architecture et du patrimoine, crayon, 82/45, vue du sud-ouest. (CROUTELLE, J., 2019, p.11)

La tour est au centre de l'articulation de l'élévation du bâtiment primitif. En effet, elle s'articulait en trois niveaux et un quatrième fût ajouté durant les restaurations du 19^e. Le premier niveau correspondant aux couvertures des absides, le second à un niveau intermédiaire se basant sur les pignons oriental et occidental (ce niveau n'est pas présent sur les iconographies d'avant restaurations, il a donc été rajouté au 19^e siècle) (fig. 24). Le troisième niveau correspond à l'extrémité des bras de la croix grecque inscrite dans le plan ainsi qu'à la base de la tour. Le dernier niveau est celui de la tour. Ce rythme d'élévation se présente comme un escalier montant vers le centre du bâtiment, la tour (fig. 25). La présence d'une tour dans l'état primitif est encore discutée. Cependant, les spécialistes s'accordent à dire qu'une tour étant un élément léger, la présence d'une tour-lanterne à Germigny est tout à fait envisageable au 9^e siècle⁹³. Etant donné que l'entièreté de l'élévation du bâtiment primitif (du sanctuaire actuel) est organisée autour de la tour, il semble plausible que la tour ait toujours été présente dans le plan de Germigny. Dans l'iconographie pré-restauration du 19^e siècle, la tour est représentée avec une couverture différente (fig. 24).

⁹³ CHEVALIER, P., 2019, *Une architecture originale ?*, dans SAPIN, CH., (dir.), 2019, *Germigny-des-Prés (Loiret). L'oratoire carolingien*, Auxerre, p. 22- 23.



Fig. 25. Germigny-des-Prés. Orthophotographie du chevet oriental de l'oratoire et du sondage ouvert en 2019. Fin 8^e- début 9^e siècles. (VAN WERSCH, L. et al., 2019, p. 26).

La tour a été fortement restaurée au 19^e siècle en raison de problèmes de stabilité. Selon les recherches de M. Hubert, en 1867, elle mesurait 16 mètres et, grâce à l'iconographie, il est possible de savoir qu'elle était surmontée d'une flèche dont la morphologie est difficile à déterminer⁹⁴(fig. 24). Si l'on se base sur le dessin d'Albert Delton, La flèche qui surmonte la tour semble prendre la forme d'un toit brisé avec un brisis légèrement moins raide que le terrasson (fig. 24).

La couverture du bâtiment d'origine n'a pas été conservée au vu des restaurations subies. Néanmoins, il devait être proche de l'état actuel de la couverture du chœur. Il est composé de tuiles de terre cuite creuses (ou *imbrex*) pour la majorité de la couverture et de *tegulae* pour la couverture des absides (et peut-être des absidioles). Il semble que ces *tegulae* soient un ajout du 19^e siècle. Sur les iconographies avant restauration, les absides semblent couvertes de toits en croupe ronde composés uniquement d'*imbrex* (fig. 24). Cependant, durant la campagne de fouilles de 2019, différents fragments d'*imbrex*, mais aussi de *tegulae* ont été découverts (fig. 26 et 27). Certains d'entre eux ont pu être datés du Haut-Moyen-Age en raison de leur pâte semblable à celle de Saran⁹⁵.

⁹⁴ HUBERT, J., 1931, *Germigny-des-Prés*, extrait du *Congrès archéologique de France de 1930*, Paris, p. 546-547.

⁹⁵ VAN WERSCH, L., HENRION F., POULAIN G., HOCQUET F.-P. et SAPIN, CH., 2019, *Germigny-des-Prés (45-Loiret). Oratoire. Rapport d'intervention*, s.l., p. 46.



Fig. 26. Germigny-des-Prés. Fragments de tegulae du Haut-Moyen-Age. Fin 8^e- début 9^e siècles. (Réalisé par le CEM d'Auxerre) (VAN WERSCH, L. et al., 2019, p. 55)



Fig. 27. Germigny-des-Prés. Fragment d'imbrex du Haut-Moyen-Age. Fin 8^e- début 9^e siècles. (Réalisé par le CEM d'Auxerre) (VAN WERSCH, L. et al., 2019, p. 46)

A propos de l'élévation, en 2019, les chercheurs ont également découvert différents morceaux de modillons en terre cuite. L'un de ces artefacts était dans un état de conservation exceptionnel (fig. 9). Son style et la pâte utilisée correspondent à une production carolingienne de Saran⁹⁶. Depuis 2019, les spécialistes considèrent donc que la maçonnerie comprenait également des modillons en terre cuite.

⁹⁶ VAN WERSCH, L., HENRION F., POULAIN G., HOCQUET F.-P. et SAPIN, CH., 2019, *Germigny-des-Prés (45-Loiret). Oratoire. Rapport d'intervention*, s.l., p. 66.

Concernant les ouvertures de l'état primitif, la lecture du bâtiment est assez difficile en raison des différentes modifications du 19^e siècle. Il serait nécessaire d'approfondir les recherches prochainement. Néanmoins, en 2002, le CEM a pu observer des maçonneries anciennes durant la réflexion de certains enduits contemporains. Durant ces observations, ils ont constaté qu'une baie en terre cuite en forme de mitre apparaissait dans le gouttereau sud, sous l'actuel porche (fig. 28). Pour ces spécialistes, cette ouverture appartient soit à une étape carolingienne inconnue (peut-être proche du 1^{er} état) soit à une révision dans les alentours de l'an mil. En effet, dans cette région, on considère que la baie en mitre disparaît des constructions dans les environs du 11^e-13^e siècle. Cette baie est mentionnée dans cette partie, mais il semble pour l'instant plus probable de la considérer comme faisant partie d'un chantier roman plus tardif⁹⁷.



Fig. 28. Germigny-des-Prés. Arc en mitre retrouvé sous les enduits extérieurs du mur sud. c.a. 11^e siècle. (SAPIN, CH. et BÜTTNER, S., 2019, p. 31.)

⁹⁷ SAPIN, CH. et BÜTTNER, S., 2019, *Une construction de pierre*, dans SAPIN, CH., (dir.), 2019, *Germigny-des-Prés (Loiret). L'oratoire carolingien*, Auxerre, p. 31.

Selon les dessins de Juste Lisch (fig. 29), d'Albert Delton (fig. 13 et 24) complétés des observations de 2002, on peut également constater que la taille et les emplacements des baies de l'abside orientale ont été modifiés. En effet, il semble qu'avant les interventions du 19^e siècle, les baies de l'abside étaient plus hautes et sur les côtés de l'abside (fig. 24). Actuellement, les baies sont plus basses et au nombre de trois (fig. 25). Selon l'iconographie ancienne, les baies arboraient la forme en plein cintre de baies romanes. Il n'est pas possible d'affirmer que ces baies aient été présentes durant l'état primitif du bâtiment. Selon Ch. Sapin et S. Büttner, il semble que les modifications de Lisch aient été motivées par la volonté de restaurer l'arcature aveugle (aujourd'hui, présente) qui était percée par les baies anciennes. L'hypothèse émise par le CEM est que durant l'époque carolingienne, il y avait bien une arcature aveugle au même emplacement que l'actuelle et un système de baies (potentiellement plus bas) dont les traces ont disparu durant la reprise du 19^e siècle. Durant la période romane, l'arcature aveugle est percée de trois baies hautes à plein cintre qui seront éliminées dans le projet de Lisch. Une étude d'archéologie du bâti pourrait, selon M. Sapin et M. Büttner, permettre de clarifier la situation des baies de Germigny.⁹⁸

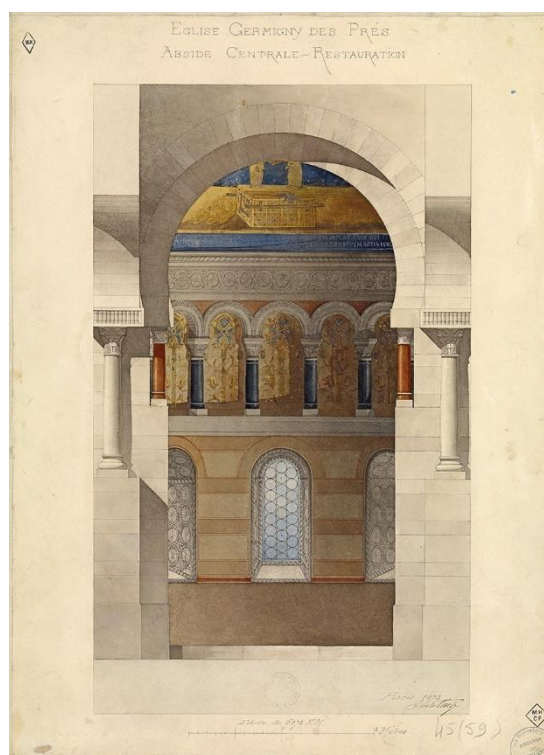


Fig. 29. LISCH, J., *Projet de restauration de l'abside occidentale de Germigny-des-Prés*, 1873, Charenton-le-Pont, Médiathèque de l'architecture et du patrimoine, aquarelle, 45/59, vue de l'ouest. (CROUTELLE, J., 2019, p.9.)

⁹⁸ SAPIN, CH., BÜTTNER, S. et AUMARD, S., 2019, *Germigny-des-Prés. Nouvelles observations archéologiques sur le bâti*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 8-14.

En 1867, Bouet décrit l'intérieur de l'église et signale l'existence d'une coupolette d'angle au-dessus de la travée nord-est de l'église⁹⁹(fig. 30). L'existence de cette coupole motivera certaines modifications du 19^e siècle. Il n'est pas possible de savoir si cette coupolette (et potentiellement les trois autres qui l'accompagnaient) faisait partie du bâtiment d'origine ou d'un chantier plus tardif. Cet élément est antérieur aux manipulations du 19^e et peut donc être considéré comme un élément primitif ou plus tardif (peut-être roman). La question n'a pas encore été approfondie à ce jour.

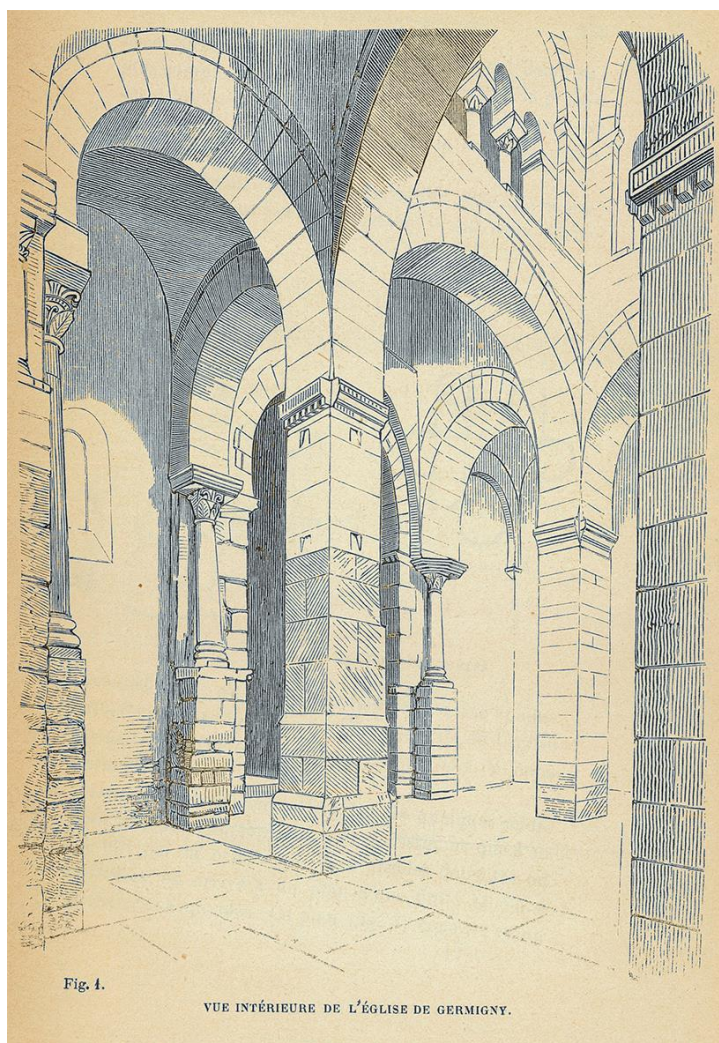


Fig. 30. BOUET, G., vue intérieure depuis l'est de l'église de Germigny-des-Prés, 1868, dessin publié dans « L'église de Germigny-des-Prés », dans 59^e Congrès archéologique de France, 1894, Paris, p. 254-271. (CROUTELLE, J., 2019, p. 15.)

⁹⁹ HUBERT, J., 1931, *Germigny-des-Prés*, extrait du *Congrès archéologique de France de 1930*, Paris, p. 550-551.

D'après les interprétations de 1930, une série de contreforts existaient également pour soutenir l'entière de la structure. À ce jour, aucune fouille n'a permis de sonder les emplacements potentiels des contreforts considérés comme carolingiens en 1930¹⁰⁰. Néanmoins, en 2002, lors des analyses entreprises par le CEM, les spécialistes considèrent que certains contreforts anciens sont facilement identifiables par l'utilisation du calcaire lacustre pour leur construction. A la suite des analyses de 2002 et des fouilles de 2019, il s'avère que les contreforts qui ont pu être étudié durant ces campagnes dateraient plus de la période romane. Les traces archéologiques de contreforts carolingiens n'ont été trouvés que durant la fouille de 1930. L'utilisation des contreforts semblent logique mais des fouilles supplémentaires sont nécessaires pour confirmer les interprétations du 20^e siècle.¹⁰¹

Au niveau du gros œuvre, durant les sondages de 2019, grâce au sol retrouvé, il a été possible de confirmer que le niveau carolingien était plus bas que le niveau actuel de l'église (fig. 23). Selon ces observations, le sol de l'église se situait à 109,54 NGF (ce qui correspond à 70 cm sous le niveau actuel du sol) dans l'absidiole nord.¹⁰²

Concernant le décor du 9^e siècle, les éléments conservés sont éparés. De nombreuses recherches se sont penchées sur les ornements qui composent l'oratoire. L'élément le plus connu du site reste la mosaïque d'Arche d'Alliance sur la voûte en cul-de-four de l'abside orientale (fig. 31). Cette mosaïque date du 9^e siècle



Fig. 31. Germigny-des-Prés. Mosaïque du cul-de-four de l'abside orientale. Vue depuis le sol. Fin 8^e-début 9^e siècles. (POILPRÉ, A.-O, 2019, p. 43.)

¹⁰⁰ HUBERT, J., 1931, *Germigny-des-Prés*, extrait du *Congrès archéologique de France de 1930*, Paris, p. 546-547.

¹⁰¹ *Ibid.*

¹⁰² VAN WERSCH, L., HENRION F., POULAIN G., HOCQUET F.-P. et SAPIN, CH., 2019, *Germigny-des-Prés (45-Loiret). Oratoire. Rapport d'intervention*, s.l., p. 35.

mais une partie conséquente de l'œuvre a été restaurée durant les restaurations du 19^e siècle. Outre cette pièce maîtresse, Germigny accueillait d'autres mosaïques, certaines sont uniquement connues par l'iconographie (comme les mosaïques au-devant de l'abside orientale) (fig. 32) et d'autres sont encore en place (comme les mosaïques de l'arcature aveugle de l'abside orientale) (fig. 33). Les recherches de Mme Poilpré et de Mme Van Wersch s'intéressent à l'ensemble des mosaïques de Germigny.

Les scientifiques ont également retrouvé plusieurs éléments de stucs. La majorité des stucs de Germigny ont été enlevés durant la restauration du 19^e siècle et envoyés au musée d'Orléans où ils sont toujours observables de nos jours (fig. 34). D'après les analyses et les observations de spécialistes, les stucs du musée correspondent à une production carolingienne. La pâte correspond à un plâtre proche de celui de Saint-Benoit-Sur-Loire daté du 9^e- 11^e siècles¹⁰³. Par ailleurs, selon Bénédicte Bertholon, la « ... mise en œuvre de Germigny-des-Prés correspond aux pratiques connues à l'époque médiévale »¹⁰⁴. Selon cette dernière, il semble également que le stuc ait été traité de manière

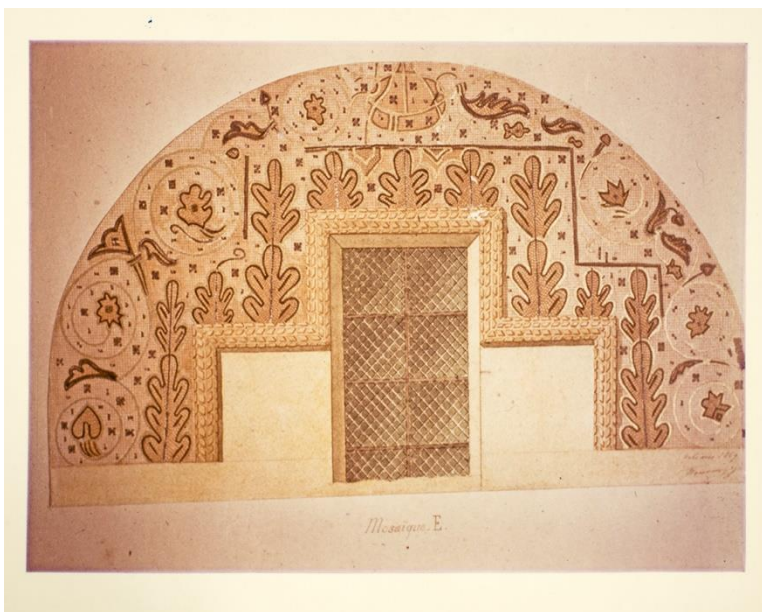


Fig. 32. FOURNIER LE JEUNE, mosaïque E, 1869, Orléans, Musée historique et archéologique de l'Orléanais. Aquarelle (?). (CROUTELLE, J., 2019, p. 23.)



Fig. 33. Germigny-des-Prés. Détails de l'arcature aveugle de l'abside occidentale de l'oratoire. Vue depuis le sol. Fin 8^e-début 9^e siècles. (BERTHOLON, B., 2019, p. 39.)

¹⁰³ BERTHOLON, B., 2019, *le décor sculpté. Le stuc*, dans SAPIN, CH., (dir.), 2019, *Germigny-des-Prés (Loiret). L'oratoire carolingien*, Auxerre, p. 40.

¹⁰⁴ *Ibid.*

équivalente à la pierre. On y retrouve donc des décors divers inspirés des motifs tardo-antiques tels que la palmette, la rose (fig. 34) ainsi que d'autres motifs végétaux (fig. 35). La majorité des informations concernant l'emplacement de ces stucs nous est parvenue par l'iconographie ancienne produite avant les restaurations de Lisch. Malgré le bon rendu de ces restaurations, Mme Bertholon considère qu'elles n'atteignent pas la qualité des originaux¹⁰⁵. A Germigny, il semble que les stucs aient été essentiellement blancs, on retrouve des éléments de polychromie rouges ou roses dans le but de rehausser les reliefs, mais sans plus¹⁰⁶. Le stuc de Germigny a été étudié par Mme Bertholon dont on ne peut que conseiller la lecture pour approfondir cet aspect du décor de l'église.



Fig. 34. Fragment concave d'une niche ou d'une baie. Stuc. Germigny-des-Prés. Musée historique et archéologique de l'Orléanais. Fin 8^e- début 9^e siècles. (BERTHOLON, B., 2019, p. 38.)



Fig. 35. Fragments de plaques ornementales. Stuc (en haut) et pierre (en bas). Germigny-des-Prés. Musée historique et archéologique de l'Orléanais. Fin 8^e-début 9^e siècles. (BERTHOLON, B., 2019, p. 41.)

¹⁰⁵ BERTHOLON, B., 2019, *le décor sculpté. Le stuc*, dans SAPIN, CH., (dir.), 2019, *Germigny-des-Prés (Loiret). L'oratoire carolingien*, Auxerre, p. 41.

¹⁰⁶ *Ibid.*, p. 40.

Germigny a également la chance de conserver plusieurs chapiteaux ainsi que plusieurs éléments lapidaires d'origine. M. Héber-Suffrin a analysé ces éléments avec attention. D'après lui, les chapiteaux présents dans le bâtiment arborent des décors qui correspondent aux pratiques carolingiennes. L'authenticité des chapiteaux est encore débattue, certains semblent indéniablement carolingiens (fig. 36), d'autres semblent plus proches de la copie. Selon Fr. Héber-Suffrin, le décor proposé par la restauration du 19^e siècle offre des représentations de bonnes qualités mais qui prennent des libertés dans la représentation des éléments manquants¹⁰⁷. On sait par l'iconographie de certains chapiteaux ont été étudiés avant la restauration dans le but de retransmettre au mieux leur aspect (fig. 37). M. Héber-Suffrin considère, malgré les modifications du 19^e siècle que Germigny conserve « un authentique décor sculpté carolingien ... »¹⁰⁸. Ce décor tend à imiter les chapiteaux antiques. On retrouve dans les exemples de Germigny des motifs de feuilles d'acanthes (fig. 36 et 37) ou encore des volutes d'angles (réduites) (fig. 36). Le tout donne un style composite inspiré de l'ordre corinthien et ionique¹⁰⁹.



Fig. 36. Chapiteau sud authentique du bas-côté est, Pierre. Germigny-des-Prés. Vue depuis le sol. Fin 8^e-début 9^e siècles. (HEBER-SUFFRIN, F., 2019, p. 9.)

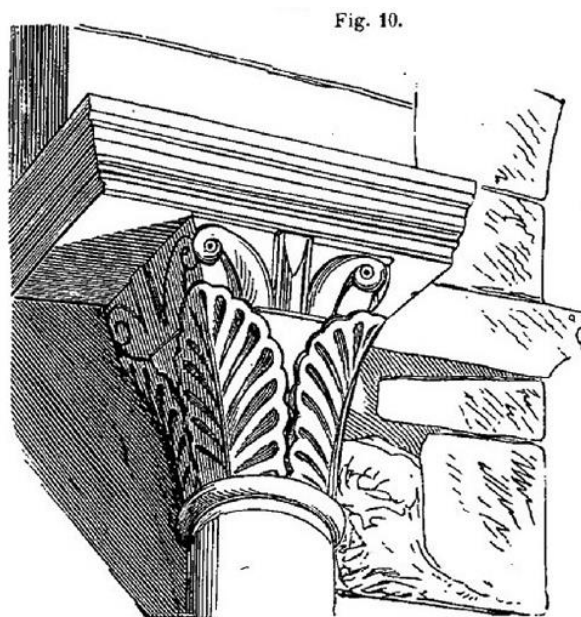


Fig. 37. BOUET, G., Bas-côté sud. Chapiteau est, s.d. (19^e siècle), Orléans, Musée archéologique et historique de l'Orléanais. Vue de face. (HEBER-SUFFRIN, F., 2019, p. 12.)

¹⁰⁷ HÉBER-SUFFRIN, F., 2019, *le décor sculpté. La pierre*, dans SAPIN, CH., (dir.), 2019, *Germigny-des-Prés (Loiret). L'oratoire carolingien*, Auxerre, p. 33.

¹⁰⁸ *Ibid.*

¹⁰⁹ ID., 2019, *Germigny, le décor sculpté. La pierre*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 24.

b) Bâtiment roman : 11^e siècle :

Comme expliqué dans la partie *L'oratoire : de sa construction à aujourd'hui*, la seconde phase du bâtiment est difficile à situer. Sur base des recherches de J. Croutelle, de Ch. Sapin et de S. Büttner, il est possible de situer cette seconde phase entre le 9^e siècle en raison d'un incendie et le 13^e siècle période à laquelle l'église change de statut. Malgré le manque d'informations pour cet intervalle, la période la plus pertinente semble être le 11^e siècle. Ce siècle correspond au moment où, selon les écrits d'André de Fleury, les abbés de Fleury développent un intérêt pour l'édifice. Ce regain d'intérêt est dû au contexte de lutte contre l'hérésie de l'époque et la réalisation de plusieurs miracles à Germigny. De cette période, les écrits nous mentionnent deux mandats : celui de Gauzlin et celui de Hugues. Ce dernier est le moins bien documenté, mais Hughes semble néanmoins établir des moines à Germigny pour s'occuper de l'église et pour réaliser des travaux de modifications du bâtiment¹¹⁰. Comme déjà précisé, l'ampleur de ces travaux est inconnue, mais leur datation correspond à une des hypothèses émises par le CEM en 2002 lors de leurs observations sur le parement du gouttereau sud et de l'abside orientale. Selon Ch. Sapin et S. Büttner, les modifications des baies et de l'appareil correspondent au 11^e siècle. Ils admettent néanmoins la possibilité que les éléments repérés en 2002 puissent correspondre à un état originel inconnu jusqu'alors¹¹¹. Des recherches sont encore nécessaires pour identifier avec certitude la période de cette seconde phase de chantier. Néanmoins, au vu des conclusions du CEM de 2019, nous considérerons que ce chantier se développe au 11^e siècle.

Il est intéressant de mentionner qu'au début du 20^e siècle, plusieurs chercheurs interprètent certaines modifications comme datant du 14^e-15^e siècles¹¹². Ces affirmations sont aujourd'hui considérées comme peu probables au vu des recherches récentes. Certains articles utilisés mentionneront donc le 14^e ou le 15^e siècle pour des modifications qui seront considérées comme romanes dans ce document.

¹¹⁰ CROUTELLE, J., 2019, *Regard sur une construction fameuse...*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 5.

¹¹¹ SAPIN, CH. et BÜTTNER, S., 2019, *Une construction de pierre*, dans SAPIN, CH., (dir.), 2019, *Germigny-des-Prés (Loiret). L'oratoire carolingien*, Auxerre, p. 31.

¹¹² HUBERT, J., 1931, *Germigny-des-Prés*, extrait du *Congrès archéologique de France de 1930*, Paris, p. 538.

Cette période étant faiblement documentée et mal située, certaines modifications n'ont peut-être pas encore été identifiées. La majorité des remaniements concernent l'ajout de parties ou de pièces.

A cette époque, à l'est du bâtiment primitif, on rajoute une structure quadrangulaire au nord-est du bâtiment. Selon les relevés de 1930, un mur accolé à l'abside nord s'étendait sur 6m en direction de l'est pour ensuite former un angle droit avec un second mur qui s'étendait sur +- 4,5m vers le sud (fig. 13). Ce dernier venait s'accoler à l'absidiole nord. Il est admis que cette structure devait être une sacristie¹¹³. Cette sacristie a été rasée durant les travaux de Juste Lisch. Cet élément est connu surtout grâce aux fouilles de 1930 et de 2019 qui ont permis de mettre au jour ses fondations. La date d'installation de cette structure n'est pas certaine. À la suite des observations de 2019, il semble que l'appareillage de moellons est supérieur aux moellons de l'absidiole primitive et que ses fondations sont plus hautes que les fondations carolingiennes (fig. 38). Le mortier semble néanmoins proche de celui des structures primitives. Il en a été déduit que cette sacristie était effectivement postérieure à l'état primitif du bâtiment. Son attribution pour la période romane semble tout à fait pertinente¹¹⁴.



Fig. 38. Germigny-des-Prés. Sondage 2. Vue depuis l'est. Fin 8^e- début 9^e siècles. (Réalisé par le CEM d'Auxerre) (VAN WERSCH, L. et al., 2019, p. 57)

¹¹³ CHEVALIER, P., 2019, *Germigny, une architecture originale ?*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 3.

¹¹⁴ VAN WERSCH, L., HENRION F., POULAIN G., HOCQUET F.-P. et SAPIN, CH., 2019, *Germigny-des-Prés (45-Loiret). Oratoire. Rapport d'intervention*, s.l., p. 41-43.

A l'ouest de l'abside nord, une petite structure quadrangulaire de 4,5m sur 1,5m est également construite à l'époque romane. Sa fonction n'est pas connue et elle n'a pas été décelée durant les relevés radars. Elle nous est connue essentiellement par les relevés de 1930 sans que ceux-ci n'apportent d'informations supplémentaires. Elle se situait entre l'actuelle abside nord et l'actuelle sacristie (fig. 13).

Dans les autres modifications à mentionner, il est important de citer l'ajout d'une nef courte (fig. 13). Celle-ci, selon l'iconographie et les plans du 19^e siècle, prend place à l'emplacement de l'abside ouest (fig. 12 et 13). Elle était rythmée par deux travées s'étendant sur une dizaine de mètres (sur base des relevés radars). Au vu des plans de 1841 d'Albert Delton, elle avait une forme trapézoïdale en raison de la grange qui la bordait au nord¹¹⁵(fig. 39). Jusqu'à la fin du 20^e siècle, les chercheurs mentionnent souvent l'ajout de cette nef aux 15^e- 16^e siècles, mais cette affirmation est beaucoup plus discutée de nos jours¹¹⁶. Il est possible que cet ajout soit en lien avec des modifications précoces (cela semble peu probable) du 9^e siècle mais aussi avec le changement de statut de l'église au 13^e siècle. Malheureusement, la structure ayant été détruite au 19^e, il est impossible de confirmer ou d'infirmer ces hypothèses. La prospection radar réalisé en 2016 a permis aux chercheurs d'identifier son emplacement ainsi que sa taille¹¹⁷(fig. 12). Néanmoins, un second sondage radar en dehors de la période touristique pourrait compléter les éléments concernant cette nef.

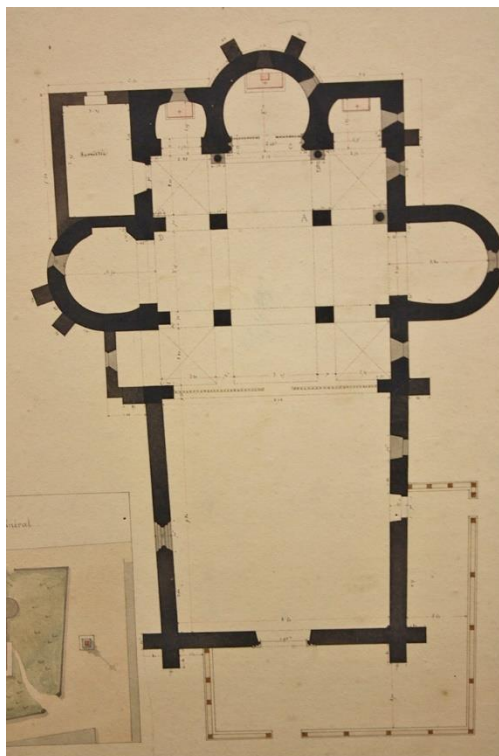


Fig. 39. DELTON, A., *Plan de l'église de Germigny-des-prés, 1841, Charenton-le-Pont, Médiathèque de l'architecture et du patrimoine, encre et crayon sur papier, 82/45.* (CROUTELLE, J., 2019, p.13.)

¹¹⁵ CROUTELLE, J., 2019, *Regard sur une construction fameuse...*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 13.

¹¹⁶ HUBERT, J., 1931, *Germigny-des-Prés*, extrait du *Congrès archéologique de France de 1930*, Paris, p. 538.

¹¹⁷ CAMERLYNCK, CH., SAPIN, CH. et VAN WERSCH, L., 2019, *Prospection géophysique...*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 7.

Au regard de l'iconographie, cette nef est accompagnée d'un porche en L longeant les murs méridionaux et occidentaux (fig. 13 et 21). Ce porche devait être en bois avec des fondations en pierre mais aucun vestige n'a pu être trouvé à ce jour. Selon les relevés de 1930, ce porche donnait accès à deux entrées (fig. 13). L'entrée principale s'ouvrait au centre de la façade occidentale et une seconde donnait accès à l'église par le gouttereau sud. Cette seconde entrée prenait place, a priori, au même emplacement que l'actuelle ouverture du gouttereau sud.

Conformément à l'iconographie et aux observations du 19^e siècle, on peut observer l'absidiole du sud du chevet (fig. 24). On peut y voir une longue toiture en appentis qui est accolée au mur est du bras sud. Il est possible que la même toiture surmontât l'absidiole nord mais elle n'est jamais mentionnée.

Pour terminer avec les modifications du gros œuvre, il semble que la tour n'ait pas été modifiée durant l'époque romane. Les éléments décrits précédemment semblent inchangés. En réalité, la représentation de la tour se base sur la redécouverte du bâtiment au 19^e siècle. La description de la tour se base uniquement sur cette iconographie. N'ayant aucune mention de modifications de la tour avant le 19^e siècle, on peut penser qu'elle conserve la même forme à la période romane.

Au vu des témoignages du 19^e siècle, lors de sa redécouverte, le bâtiment est renforcé par plusieurs contreforts au niveau des absides. Ces derniers ont été détruits lors de la dernière campagne de restauration de Lisch¹¹⁸. Néanmoins, lors des fouilles de 1930 et du sondage de 2019, ces éléments ont pu être à nouveau étudiés. En 2019, les fondations de contrefort retrouvés contre l'abside orientale semblent se rapprocher de l'appareillage de l'abside et de l'absidiole carolingiennes (fig. 40). Cependant, mis à part quelques pierres en boutisse, le contrefort ne contient aucune trace de chaînage avec l'abside. Par ailleurs, ces fondations sont plus hautes que celles de l'abside et de l'absidiole. Les chercheurs en ont conclu que ce contrefort daterait d'un chantier postérieur au chantier primitif¹¹⁹. Il est donc plausible que ce contrefort ait été ajouté durant le chantier roman. Néanmoins, ses fondations sont plus basses que celles de la sacristie romane. Son attribution au chantier roman est donc encore sujet à débat.

¹¹⁸ SAPIN, CH., BÜTTNER, S. et AUMARD, S., 2019, *Germigny-des-Prés. Nouvelles observations archéologiques sur le bâti*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 12-13.

¹¹⁹ VAN WERSCH, L., HENRION F., POULAIN G., HOCQUET F.-P. et SAPIN, CH., 2019, *Germigny-des-Prés (45-Loiret). Oratoire. Rapport d'intervention*, s.l., p. 41-43.

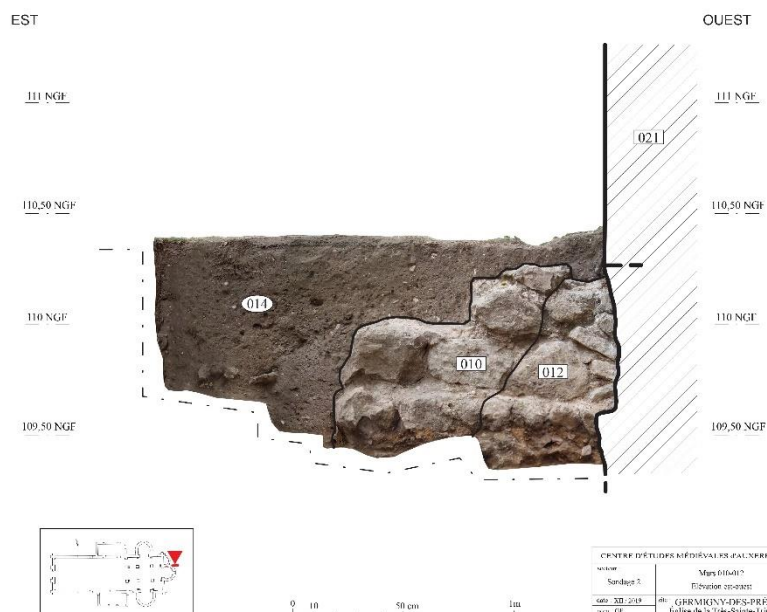


Fig. 40. Germigny-des-Prés. Sondage 2. Relevé d'un contrefort. Vue depuis le nord. c.a. 11^e siècle. (Réalisé par le CEM d'Auxerre) (VAN WERSCH, L. et al., 2019, p. 42.)

L'ampleur de ces contreforts ne peut se baser que sur les fondations retrouvées en fouille et l'iconographie. En comparaison avec celle-ci, les contreforts semblaient s'élever jusqu'au niveau des baies romanes (fig. 24). En 2019, il a été possible de relever la longueur des fondations d'un contrefort mais pas sa largeur. Le contrefort oriental mesurait 1,2m de long¹²⁰. L'organisation des contreforts est un sujet qui mériterait une étude plus approfondie. En 1930, certains contreforts n'ont pas pu être datés comme celui mis à jour en 2019. Des doutes demeurent concernant l'attribution à l'époque romane. Il pourrait être intéressant d'éclaircir cet aspect de l'histoire architectural du bâtiment par le biais d'une étude d'archéologie du bâti et de fouilles ciblées.

Concernant la pierre utilisée pour ces modifications, il semble que le calcaire de Beauce est choisi pour certains éléments anciens comme dans le cas d'un contrefort au sud du chevet. Aucun courant ne semble ressortir de ces modifications, contrairement aux modifications du 19^e siècle. La pierre utilisée semble correspondre à celle déjà trouvée dans le bâtiment primitif.¹²¹

¹²⁰ VAN WERSCH, L., HENRION F., POULAIN G., HOCQUET F.-P. et SAPIN, CH., 2019, *Germigny-des-Prés (45-Loiret). Oratoire. Rapport d'intervention*, s.l., p. 41.

¹²¹ SAPIN, CH., BÜTTNER, S. et AUMARD, S., 2019, *Germigny-des-Prés. Nouvelles observations archéologiques sur le bâti*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 13.

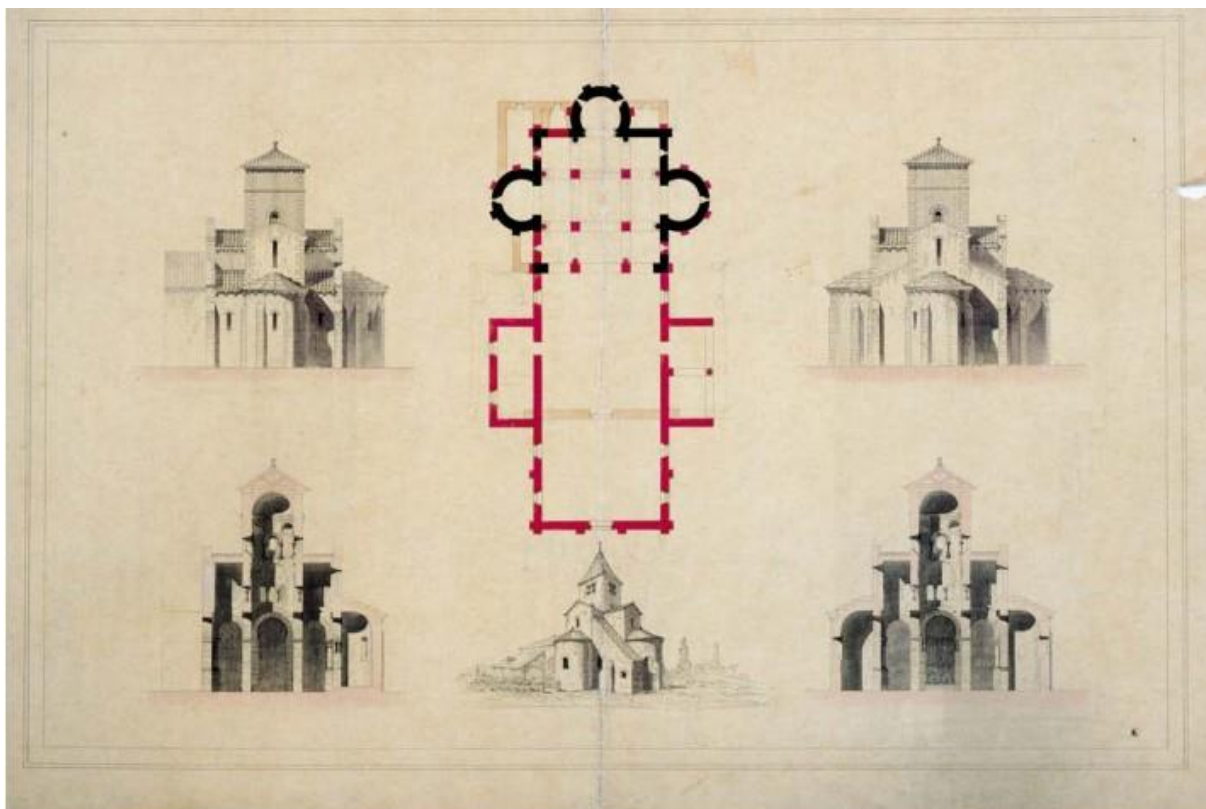


Fig. 41. LISCH, J., Plan indiquant les parties à conserver, à détruire ou à reconstruire, ap. 1866, Charenton-le-Pont, Médiathèque de l'architecture et du patrimoine (?), encre sur papier. (CROUTELLE, J., 2019, p. 9.)

Comme expliqué précédemment, l'époque romane a également modifié la disposition des baies. Pour le moment, les seules recherches qui ont été possibles de réaliser concernent le gouttereau sud et les baies de l'abside occidentale. Selon l'iconographie du 19^e siècle, cette dernière est donc percée de deux baies à plein cintre à hauteur de l'actuelle arcature (fig. 41).

Comme développé dans la partie dédiée à l'état primitif du bâtiment, en 2002, le CEM a pu observer, lors de travaux de reprises des enduits, des éléments qui sembleraient également appartenir à la nef courte. Dans le mur du gouttereau sud (sous le porche actuelle), les chercheurs ont découvert une ancienne baie en mitre (fig. 28). Elle est réalisée en brique. L'analyse laisse sous-entendre que contrairement à ce que l'on pense, la nef et les modifications qui l'accompagnent, ont eu lieu durant la période romane.¹²²

¹²² SAPIN, CH. et BÜTTNER, S., 2019, *Une construction de pierre*, dans SAPIN, CH., (dir.), 2019, *Germigny-des-Prés (Loiret). L'oratoire carolingien*, Auxerre, p. 31.

Concernant le décor, aucune recherche n'a démontré une modification avant le 19^e siècle. La plupart des chapiteaux ou des stucs conservés datent de l'état carolingien ou de la restauration du 19^e siècle. À ce jour, il semble donc que le décor roman ait été le même qu'au 9^e siècle.

L'état présumé du reste du Moyen-Age est celui dans lequel le bâtiment a été redécouvert au 19^e siècle. Néanmoins, suivant les témoignages, l'église est presque à l'état de ruine lors de sa découverte. D'après les travaux de J. Croutelle, il semble en effet que les mentions de Germigny tendent à disparaître après le 13^e siècle. Exception faite d'un intérêt des Mauristes au 18^e siècle pour le site et son prétendu palais royal, il faut attendre le 19^e siècle pour que l'oratoire soit à nouveau cité dans les écrits¹²³. L'église semble, par son absence dans les écrits, être mise de côté après la période médiévale.

c) Bâtiment moderne : 19^e siècle :

Lors de sa redécouverte au début du 19^e siècle, l'église est décrite comme une ruine. Dès 1840, plusieurs intellectuels tels que Mérimée ou Viollet-le-Duc attirent l'attention sur l'état du bâtiment. Ils motivent l'intérêt pour le bâtiment par son ancienneté. En effet, très vite elle est élevée au statut de trésor de l'histoire française et donc motive la volonté de conservation de l'édifice. Plusieurs architectes vont se suivre pour essayer de proposer des projets à Germigny. La première intervention réalisée par M. Pascault, sur base de l'impulsion de Prosper Mérimée, consiste à consolider en urgence le bâtiment entre 1842 et 1848. D'après les observations de l'époque, l'église a besoin d'urgence de travaux pour stabiliser ses structures et surtout sa mosaïque. Durant ces premiers travaux, les réparations urgentes, la consolidation de la mosaïque et la reconstruction de l'abside sud sont entreprises. Succèdera à M. Pascault, l'architecte Louis Lieschening qui s'occupera de réparer la mosaïque et l'abside occidentale entre 1845 et 1857. En 1859-1860, M. Millet prend en charge la consolidation de la tour qui

¹²³ CROUTELLE, J., 2019, *Historiographie et restaurations*, dans SAPIN, CH., (dir.), 2019, *Germigny-des-Prés (Loiret). L'oratoire carolingien*, Auxerre, p. 9.

menace de s'écrouler. Monsieur Millet est le dernier architecte à travailler sur la stabilisation du bâtiment.¹²⁴

Après ces premiers travaux, M. Millet va être remplacé par Juste Lisch. Il arrive sur le chantier en 1863 et entreprend de grands travaux qui avaient pour but de se rapprocher de l'aspect originel de l'oratoire. Les interprétations de l'époque aimaient voir en Germigny le seul exemple d'architecture byzantine de l'Europe occidentale et donc de nombreuses modifications entreprises à cette époque se basent sur cette lecture. L'aspect actuel du bâtiment est directement lié aux interventions de Lisch justifiées par une classification du bâtiment que l'on sait aujourd'hui fausse.¹²⁵

Lors de ses premières observations, Juste Lisch considéra certains éléments comme trop récents. Cherchant à la base à revenir au plus près de l'état d'origine, il décida de détruire ces parties « récentes ». En réalité, dans ces destructions, on recense aussi bien des éléments carolingiens que romans. Il considère que les absidioles qui flanquent l'abside orientale ainsi que la sacristie romane sont trop modernes pour faire partie de l'état primitif et donc décide de les détruire. Les contreforts romans qui soutenaient les absides sont également détruits.¹²⁶

La structure quadrangulaire présente sur le plan roman, au nord du bâtiment et à l'ouest de l'abside nord, est détruite durant le chantier. A la place, au nord, M. Lisch va construire une grande structure quadrangulaire faisant office, encore aujourd'hui, de sacristie (fig. 11). Celle-ci est éclairée par deux baies rectangulaires à piédroits surmontés de coussinets non-figurés. Les baies sont séparées au centre par une colonne ionique. A l'est de cette sacristie, une porte a également été ajoutée, elle prend la même forme rectangulaire accompagnée de piédroits surmontés de coussinets non-figurés. Pour équilibrer le bâtiment et donner l'impression d'un plan en croix latine, le porche en « L » antérieur qui se trouvait au sud-ouest de la nef courte est détruit. Il est remplacé par un porche quadrangulaire (fig. 11). Ce porche comprend exactement les mêmes dimensions que la sacristie au nord. Le porche est soutenu au sud par deux colonnes ioniques.

¹²⁴ CROUTELLE, J., 2019, *Regard sur une construction fameuse...*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 20-21.

¹²⁵ *Ibid.*, p. 25-26.

¹²⁶ *Ibid.*, p. 21.

Paradoxalement avec son envie de revenir à l'état carolingien, Juste Lisch va intervenir sur la nef romane. Sur demande des paroissiens, il lance la construction d'une extension pour la nef courte romane¹²⁷. Il fait donc raser le mur occidental de la nef romane et agrandit la nef de trois travées. Il ferme la structure à l'ouest par une façade sobre coiffée d'un clocher-peigne (fig. 42). Ce dernier est percé de deux baies pour accueillir les cloches et est légèrement en ressaut de la façade. En séparation avec le sanctuaire, l'architecte construit un impressionnant arc triple¹²⁸ (fig. 43).

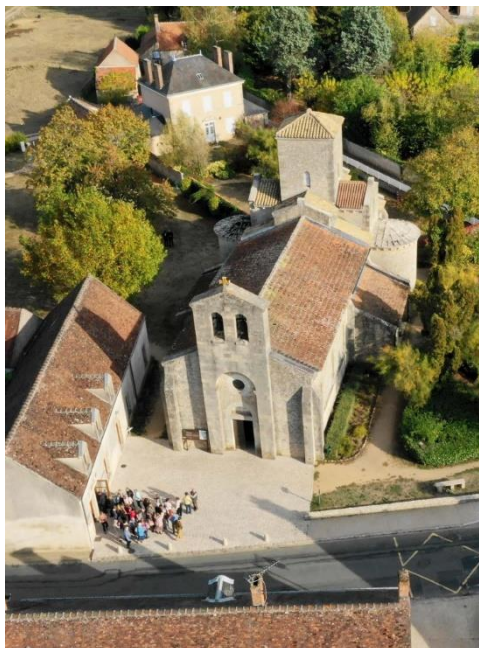


Fig. 42. Germigny-des-Prés. Façade occidentale de l'oratoire de Germigny-des-Prés. Vue extérieure aérienne depuis l'ouest. Fin 8^e-début 9^e siècles. (CHEVALIER, P., 2019, p. 20.)



Fig. 43. Germigny-des-Prés. Vue du sanctuaire et du chœur depuis la nef. Vue intérieure depuis l'ouest. Fin 8^e-début 9^e siècles. (HÉBER-SUFFRIN, F., 2019, p. 32.)

¹²⁷ CROUTELLE, J., 2019, *Regard sur une construction fameuse...*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 18.

¹²⁸ Il serait d'ailleurs de sa création selon certains.

L'ensemble de la nef est couvert par une charpente à la bordelaise apparente (fig. 44). Le choix de cette charpente n'est pas justifié dans les écrits de Juste Lisch. À l'heure actuelle, aucune recherche n'a approfondi cet aspect du bâtiment. L'utilisation de ce type de charpente intrigue. En effet, il s'agit d'un type de charpente traditionnellement présent en Vendée et dans la région de Bordeaux à partir du 16^e siècle¹²⁹. Il ne s'agit donc pas d'une charpente traditionnelle dans le Loiret et elle n'est pas non plus proche chronologiquement des interventions. Le choix de cette charpente est peut-être induit par la couverture de tuile canal (*Imbrex*) à laquelle elle se prête bien. Il est possible que la proximité avec Viollet-le-Duc, qui a caractérisé la charpente à la bordelaise au début du 19^e siècle, ait influencé le choix de M. Lisch. Cette décision est peut-être également motivée par l'ancienne charpente de la nef. Il n'existe néanmoins pas, à ce jour, de preuves archéologiques ou écrites prouvant l'existence d'une charpente bordelaise dans la nef courte. De plus, si une charpente bordelaise a bien été installée avant le 19^e siècle, cela pourrait induire une intervention aux 16^e-17^e siècles et ajouter un élément parmi la chronologie du site. Pour l'instant, aucun spécialiste ne s'est penché sur cette problématique. Une étude approfondie de la charpente ainsi que la découverte de nouvelles sources textuelles pourraient apporter des éléments de réponse concernant cette charpente.

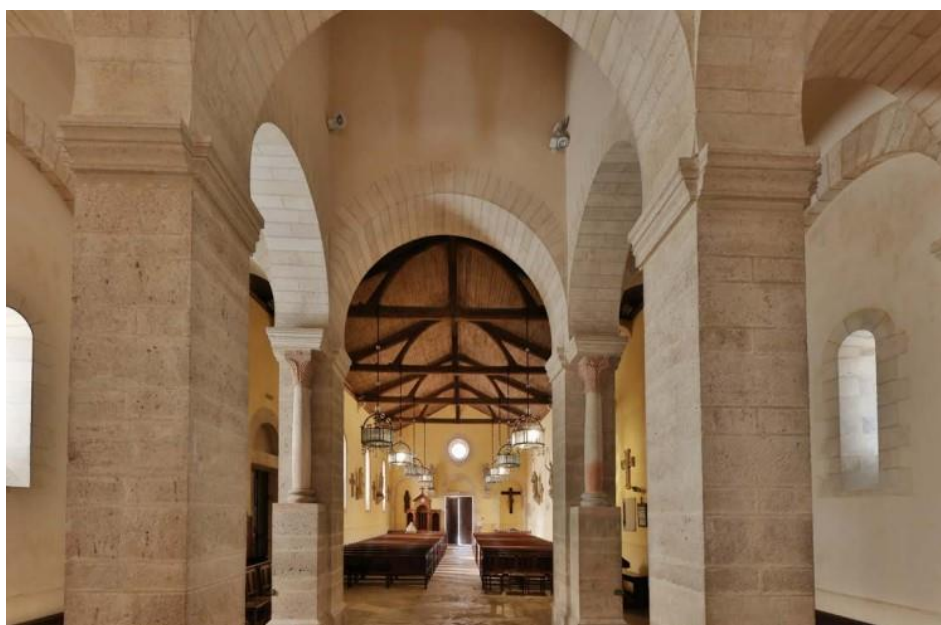


Fig. 44. Germigny-des-Prés. Nef depuis le sanctuaire. Vue intérieure depuis l'est. Fin 8^e-début 9^e siècles. (HÉBER-SUFFRIN, F., 2019, p. 32.)

¹²⁹ HUNOT, J.-Y., 2004, *L'évolution de la charpente de comble en Anjou : XIIe - XVIIIe siècles*, dans *Revue archéologique de l'ouest*, tome 21, p. 242.

A la fin du 19^e siècle, les couvertures sont également modifiées. D'après les sources, on enlève les tuiles à canal qu'on remplace par des tuiles à emboitements en raison de problèmes d'étanchéités¹³⁰. La couverture des absides change également pour devenir une toiture en *tegulae* plate semi-circulaire (fig. 45). Le pignon est et ouest des bras inscrits dans le chœur sont également modifiés pour donner un niveau supplémentaire dans l'élévation du bâtiment (fig. 41 et 42). L'ensemble du sanctuaire est donc surmonté d'une toiture à trois niveaux formant un « escalier » jusqu'à la tour centrale.



Fig. 45. Germigny-des-Prés. Vue générale de l'oratoire. Vue aérienne zénithale. Fin 8^e-début 9^e siècles. (CAMERLYNCK, CH., SAPIN, CH. et VAN WERSCH, L., 2019, p. 26.)

Toutes les modifications du 19^e siècle ne sont pas dues à l'architecte Lisch. La tour est, elle, modifiée par M. Millet. Durant la réparation de la toiture en 1860, la tour est abaissée de 5 mètres et perd sa flèche, remplacée par une couverture en pavillon (fig. 41). On profite de ce remaniement pour ajouter la coupole actuelle. Celle-ci est un motif inspiré de l'art byzantin qui ne devait sûrement pas être présent dans le bâtiment primitif. Lors de ces travaux on reprend également les piliers centraux de la tour ainsi que les arcs doubleaux qui l'accompagnent (fig. 43 et 44). Juste Lisch reconstruira également les piliers de la tour vers 1866.¹³¹

¹³⁰ CROUTELLE, J., 2019, *Regard sur une construction fameuse...*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 19.

¹³¹ ID., 2019, *Quelle origine pour Germigny ?*, dans SAPIN, CH., (dir.), 2019, *Germigny-des-Prés (Loiret). L'oratoire carolingien*, Auxerre, p. 16.

L'ensemble des contreforts présents actuellement autour du bâtiment semble être construit ou reconstruit durant les restaurations. A nouveau, aucune recherche n'a pour le moment étudié cet aspect du bâtiment. Les mentions de ces éléments traitent des destructions des anciens contreforts mais jamais de la construction des nouveaux. Néanmoins, sur base de l'iconographie mais également de la taille de l'appareil des contreforts ceux-ci correspondent majoritairement à une construction récente¹³².

Concernant les baies, l'ensemble des ouvertures actuelles est, a priori, due aux interventions du 19^e siècle. En comparaison avec l'iconographie, il semble que les ouvertures des absides aient été modifiées. Dans le cas de l'abside sud, l'ouverture à plein cintre est rétrécie et remontée (fig. 24 et 46). Il semble que l'abside nord ait été modifiée de la même manière. En 1873, M. Lisch découvre sous le stuc de l'abside occidentale une arcature aveugle et des mosaïques. L'arcature est percée par les baies romanes. À la suite de cette découverte, il décide de reconstruire l'arcature aveugle et de percer trois baies à plein cintre plus bas que les romanes (fig. 29). Ce sont toujours les baies présentes dans l'abside orientale de nos jours (fig. 47). Toutes les baies de la nef sont également installées par Juste Lisch durant ses travaux d'agrandissement.¹³³

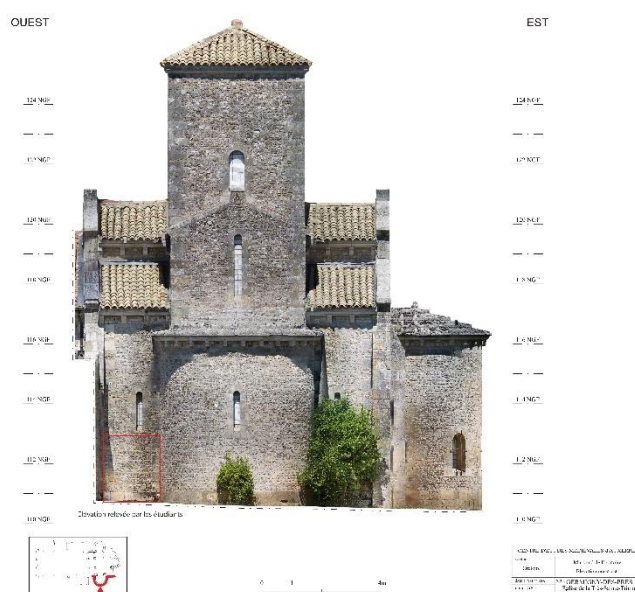


Fig. 46. Germigny-des-Prés. Orthophotographie de la façade sud du sanctuaire de l'oratoire. Vue depuis le sud. Fin 8^e- début 9^e siècles. (Réalisé par le CEM d'Auxerre) (VAN WERSCH, L. et al., 2019, p. 86)



Fig. 47. Germigny-des-Prés. Vue de l'est de l'oratoire. Vue extérieure depuis le nord-est. Fin 8^e-début 9^e siècles. (CROUTELLE, J., 2019, p. 18.)

¹³² SAPIN, CH., BÜTTNER, S. et AUMARD, S., 2019, *Germigny-des-Prés. Nouvelles observations archéologiques sur le bâti*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n° 11, Auxerre, p. 13.

¹³³ *Ibid.*, p. 10-12.

Selon les observations de M. Sapin, l'ensemble des structures datant des modifications du 19^e se caractérise par l'utilisation du calcaire blanc de la Charité-sur-Loire. Dans les structures intérieures comme l'arc triple séparant le sanctuaire de la nef, sa clarté est frappante (fig. 43). Par ailleurs, durant les analyses de M. Sapin et M. Büttner en 2002, ils ont remarqué un layage très régulier et orienté identifiable au 19^e siècle.¹³⁴

Concernant le décor, comme expliqué précédemment, une grande campagne de restauration est lancée au 19^e siècle. Sur base des stucs conservés et des chapiteaux toujours en place, différents restaurateurs vont s'atteler à restaurer ou reproduire les décors antérieurs. Les analyses de M. Héber-Suffrin et de Mme Bertholon traitent de ces sujets. Ce qu'il en ressort aujourd'hui est que le décor de Germigny est assez sobre. Les éléments présents dans les stucs et les chapiteaux semblent respecter les décors carolingiens conservés, mais sans leur rendre leur splendeur d'antan¹³⁵. En conclusion, le décor du 19^e n'est, a priori, en rien différent du décor roman et carolingien étant donné qu'il semble s'agir d'une restauration fidèle.

Germigny reste un bâtiment très complexe. L'hétérogénéité du bâtiment ressort régulièrement dans les recherches récentes. La majorité des scientifiques qui se sont attardés sur Germigny semblent d'accord pour affirmer qu'il s'agit encore aujourd'hui d'un bâtiment mal connu. Il a fortement été modifié au cours de son histoire et la lecture de la maçonnerie n'est pas simple. Etant couverts par des stucs ou enfouis sous l'église, beaucoup d'éléments de réponses n'ont pas encore pu être analysés. Les recherches avancent pour apporter des éléments supplémentaires dans la compréhension de l'histoire du site. Grâce aux dernières recherches du CEM, de l'UCL et de l'Uliège ainsi qu'à l'utilisation de techniques géophysiques non-invasives, le bâtiment semble être plus compréhensible qu'avant.

¹³⁴ SAPIN, CH., BÜTTNER, S. et AUMARD, S., 2019, *Germigny-des-Prés. Nouvelles observations archéologiques sur le bâti*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 9.

¹³⁵ HÉBER-SUFFRIN, F., 2019, *le décor sculpté. La pierre*, dans SAPIN, CH., (dir.), 2019, *Germigny-des-Prés (Loiret). L'oratoire carolingien*, Auxerre, p. 34.

BERTHOLON, B., 2019, *le décor sculpté. Le stuc*, dans SAPIN, CH., (dir.), 2019, *Germigny-des-Prés (Loiret). L'oratoire carolingien*, Auxerre, p. 41.

4) Modélisation : Généralités :

La représentation graphique en archéologie et en histoire de l'art est depuis longtemps un élément primordial. La représentation d'un état ou de certains éléments par les moyens graphiques permet de garder des traces d'artefacts perdus ou modifiés. Cela permet également de donner accès à des informations à distance de l'élément représenté. Cet aspect est d'autant plus important en architecture. Une statuette ou un tableau peut être transporté dans un laboratoire ou une quelconque institution scientifique pour y être étudié¹³⁶. Certains objets, comme les bâtiments, ne sont pas transportables pour leur étude. La représentation graphique est alors un outil pertinent pour contrebalancer la distance. Particulièrement durant des périodes perturbées comme aujourd'hui, certaines zones restent inaccessibles. On peut mentionner les cas de guerre ou d'épidémies qui empêchent d'accéder aux sites directement. Dans ces cas-là, l'utilisation de support graphique peut être inévitable.

Communément, la saisie graphique sur un chantier archéologique du sous-sol ou du bâti passe par des dessins à la main des structures ou par un recueil photographique riche. Il est certain que ces méthodes sont efficaces et maîtrisées par les archéologues actuels. Les deux méthodes offrent l'opportunité de cibler avec précisions certains éléments tout en impliquant un coût modeste dans leur mise en pratique. Concernant les relevés à l'aide de papier, d'un porte-mine, de papiers millimétrés, d'un porte-document, des mètres et d'un fil à plomb, il est possible de produire des dessins de grandes qualités. Concernant la photographie, un appareil photo est le seul outil nécessaire.

Avec l'arrivée des ordinateurs au 20^e siècle et la démocratisation de ceux-ci, de nouvelles méthodes ont commencé à attirer les chercheurs. Par exemple, il est commun maintenant de repasser les plans ou les dessins obtenus en chantier dans un logiciel de Dessin Assisté par Ordinateur (DAO) pour retravailler les relevés. Grâce à des logiciels comme la série des Adobe Illustrator ou les logiciels issus d'Autodesk, il est possible de remettre en forme les dessins, de mettre en avant les structures, de retracer les parements mais surtout d'informatiser les informations pour les stocker dans des bases de données. L'exploitation de logiciel DAO n'est pas systématique dans les chantiers modernes mais leur emploi est de plus en plus régulier

¹³⁶ Le transport de ces artefacts entraînant évidemment d'autres difficultés techniques notamment concernant la conservation de ceux-ci durant le trajet.

en raison de leur facilité d'utilisation, de leur précision et de l'archivage systématique qu'il entraîne.

Concernant la photographie, elle aussi pourra dans certains cas passer par des logiciels de retouches pour améliorer leur qualité. Ces nouvelles approches, conditionnées par l'informatique, n'abordent néanmoins aucun changement dans la manière de représenter les sites ou les artefacts. Les relevés ainsi que les photographies sont toujours représentés en deux dimensions.

Le dessin en deux dimensions a fait ses preuves. Cette façon de faire est efficace et utile pour les chercheurs. Elle aide à la compréhension, à la réalisation, à la conservation et à la communication. Il est certain qu'un travail actuel ne peut pas se passer de représentations graphiques de ce genre. Néanmoins, les technologies directement liées à la géométrie ont évolué à la fin du 20^e siècle pour donner l'opportunité aux archéologues d'expérimenter une nouvelle technique d'analyse : la représentation en trois dimensions. Dans cette partie, nous allons nous concentrer sur l'historique de la méthode, sur les formes qu'elle prend ainsi que sur les dernières applications qui ont pu être observées dans le monde archéologique.

L'utilisation de la représentation en trois dimensions dans le patrimoine est encore un sujet de débat de nos jours. La majorité des écrits qui traitent des méthodes tridimensionnelles sont évidemment émis par des chercheurs qui ont expérimenté et apprécié la technique. Il est donc difficile d'avoir des avis objectifs concernant les chercheurs qui préfèrent utiliser les méthodes plus classiques comme le relevé pierre à pierre sur papier. Cependant, certains chercheurs, aux vues des dernières expérimentations, ont permis de mettre en avant l'intérêt de cette technologie, mais aussi ses faiblesses. Malgré les avantages mis en avant durant des expérimentations, il semble pourtant régulier que les techniques tridimensionnelles passent en second plan dans les chantiers archéologiques, laissant la place avant tout aux méthodes traditionnelles¹³⁷. Cette hiérarchie des méthodes est sûrement motivée par certains éléments tels que le coût du matériel ou la formation nécessaire pour la maîtrise de celui-ci.

¹³⁷ POUX, F., NEUVILLE, R., VAN WERSCH, L., NYS, G.-A., et BILLEN, R., 2017, *3D point clouds in archeology...*, dans *Geosciences*, 7 (96), Orléans, p. 3.

L'objectif de cette partie est de revoir l'état de la situation actuelle dans le patrimoine. Pour cela, il est nécessaire de mettre en avant les deux méthodes principales pour la capture tridimensionnelle : la photogrammétrie et la lasergrammétrie.

Concernant l'utilisation des deux méthodes, il est important de préciser que le choix de l'une ou l'autre technique doit être réfléchi mûrement avant le début du chantier. Comme l'explique, Mmes Héno et Chandelier, il est nécessaire d'entreprendre un cahier des charges¹³⁸. Selon l'objectif visé par la campagne, une technique semblera plus avantageuse par rapport à l'autre. Les dernières expérimentations confirment ce constat. Certaines techniques se prêtent mieux à certains environnements¹³⁹. Nous reviendrons sur ces constats dans les parties dédiées à chaque méthode.

a) La photogrammétrie :

Il s'agit de la méthode la plus ancienne et la plus courante en archéologie. Elle se base sur l'utilisation de photographies permettant la représentation d'un espace tridimensionnel ou d'un objet.

On considère qu'elle prend ses origines dans les années 1850 avec Aimé Laussade qui expérimente l'utilisation de la photographie pour réaliser les plans de façade des bâtiments en face de son bureau. Ses travaux seront complétés par ceux de son collègue allemand Meydenbauer. Ce dernier utilisera la technique de manière régulière dans les relevés architecturaux de monuments à partir de la fin du 19^e siècle.¹⁴⁰

Lors de ses premières utilisations, la méthode se base sur le principe de vision stéréoscopique. Ce principe utilise l'effet physique ressenti lors de l'observation d'un objet fixe. Habituellement, le cerveau analyse les images des deux yeux et les « superpose » pour former une image simple. On peut cependant remarquer que lorsque l'on ferme un œil puis ensuite le

¹³⁸ HÉNO, R. et CHANDELIER, L., 2014, *Numérisation 3D de bâtiments. Cas des édifices remarquables*, « Collection SIG et intelligence territoriale », Londres, p. 17-19.

¹³⁹ MAUMONT, M., 2010, *L'espace 3D. de la photogrammétrie à la lasergrammétrie*, dans *in situ*, 13/ 2010, Paris, p. 14-15.

¹⁴⁰ HÉNO, R. et CHANDELIER, L., 2014, *Op. Cit.*, p. 31.

second, la scène ou l'objet semble bouger. Cet effet est dû à la séparation des yeux de quelques centimètres. Lorsqu'on rapproche un objet de manière à annuler la « correction automatique » du cerveau, l'observateur ressent une notion de relief. Sur base de ce même principe, des appareils ont été créés pour reproduire cet effet. Au début ces appareils sont rudimentaires, consistant en l'utilisation de deux clichés rapprochés qu'il faut regarder en alternance avec l'œil droit puis gauche.¹⁴¹

Avec le 20^e siècle, la technologie va être exploitée dans un premier temps pour les relevés aériens ensuite, avec l'impulsion entre autres de Henri Deneux (1930) et Georges Poivilliers (1944), dans le cadre du patrimoine architectural¹⁴². Lors de ces premières productions, les photographies sont prises à l'aide d'appareils spécifiques (*les chambres* ou *appareils métriques*) permettant d'imposer des intervalles prédéfinis tout en conservant avec précision les réglages focaux¹⁴³(fig. 48). Ensuite, sur base de points spécifiques (naturels ou non), les photographies vont être superposées, formant des « couples stéréoscopiques », dans le but de créer une sensation de relief. Pour réaliser ces superpositions, de grandes tables sur roues métriques sont utilisées pour permettre le positionnement avec précision des clichés. Grâce à ces postes, dits « analogiques » (fig. 49), il était possible à l'opérateur de voir les clichés en relief, mais également de dessiner dessus permettant la mise en avant de certains éléments. Les premières applications dans le patrimoine se concentrent alors sur les cathédrales françaises ou des sites emblématiques telles que les tombes égyptiennes¹⁴⁴.



Fig. 48. Exemple de chambres métriques. 1972. ICOMOS. (HÉNO, R., et CHANDELIER, L., 2014, p. 33.)

¹⁴¹ http://foto.insa.free.fr/Ressources/Stéréo_parisel.pdf, consulté le 1^{er} Juillet 2020.

¹⁴² HÉNO, R. et CHANDELIER, L., 2014, *Numérisation 3D de bâtiments...*, « Collection SIG et intelligence territoriale », Londres, p. 31-32.

¹⁴³ Ils devaient être réglé avec grandes précisions en laboratoire avant utilisation.

¹⁴⁴ *Ibid.*



Fig. 49. Exemple de poste de traitement photogrammétrique analogique Planimat, Zeiss). S.l.n.d. (HÉNO, R. et CHANDELLIER, L., 2014, p. 34.)

Avec les années 70, les postes de travail analogiques se perfectionnent en accueillant un ordinateur. Ce type de table « analytique » reste encombrante mais les calculs et le placement se font plus rapidement (fig. 50).¹⁴⁵



Fig. 50. Exemple de poste de traitement photogrammétrique analytique (SD 2000, Leica). S.n.l.d. (HÉNO, R. et CHANDELLIER, L., 2014, p. 34.)

¹⁴⁵ HÉNO, R. et CHANDELLIER, L., 2014, *Numérisation 3D de bâtiments...*, « Collection SIG et intelligence territoriale », Londres, p. 33-34.

A partir de 1990, les chercheurs vont commencer à s'équiper petit à petit d'appareils photographiques numériques. Ceux-ci vont démocratiser la méthode qui jusque-là était surtout l'apanage des géomètres et des topographes. Avec la démocratisation des appareils numériques, il faut aussi mentionner l'apparition dans les années 2000 de logiciels de photogrammétrie. Ces logiciels calculent les différents placements plus rapidement et avec plus de précisions qu'auparavant. Avec l'avènement de ceux-ci, la production 3D sur base de la photogrammétrie était née. Depuis, la technologie continue à évoluer et à se préciser. Maintenant, une production photogrammétrique se développe à partir d'un ordinateur et d'un appareil photo. Les ordinateurs ont remplacé les stations de travail analogiques et analytiques.¹⁴⁶

La photogrammétrie est une technologie produisant à l'origine des représentations bidimensionnelles, mais qui actuellement permet de créer des reconstitutions en trois dimensions. Pour ce faire, elle se base sur la corrélation d'images. Cela signifie que pour produire un objet 3D avec la photogrammétrie, il faut utiliser des photographies conservant des points communs comme cela était le cas au début de la méthode.

Pour entamer une production photogrammétrique, il est nécessaire de s'équiper d'un appareil photo numérique ou argentique. En raison de l'utilisation de logiciels, il est cependant conseillé, pour plus de facilité, d'utiliser un appareil numérique. La qualité de celui-ci dépend entre autres de la qualité désirée. Concernant les objectifs utilisés, il y a deux positions chez les chercheurs. Certains conseilleront de s'équiper de différents objectifs dont au minimum un objectif à courte focale et un objectif à longue focale pour permettre de prendre des plans larges ainsi que de cibler certains détails¹⁴⁷. D'autres considèrent que, pour conserver la même géométrie dans les photographies, il vaut mieux n'utiliser qu'un seul objectif fixe défini à l'avance¹⁴⁸. Dans les deux cas, une attention toute particulière doit être donnée aux réglages et à la qualité des clichés.

In Situ, une fois l'appareil choisi, il faut saisir des photographies de l'objet ou de la structure visée. Ces photographies seront ensuite introduites dans un logiciel qui aura pour objectif de calculer leur position et de les replacer. Pour ce faire, le logiciel doit pouvoir

¹⁴⁶ HÉNO, R. et CHANDELIER, L., 2014, *Numérisation 3D de bâtiments...*, « Collection SIG et intelligence territoriale », Londres, p. 35.

¹⁴⁷ *Ibid.*, p. 36.

¹⁴⁸ MAUMONT, M., 2010, *L'espace 3D...*, dans *in situ*, 13/ 2010, Paris, p. 11.

identifier les éléments caractéristiques et communs sur les photographies. Cette identification de points se base sur le principe de corrélation énoncé précédemment. Généralement, on utilisera des cibles. Ces dernières sont, en général, de trois types :¹⁴⁹

- Des repères manuels/ naturels : il s'agit d'éléments choisis par l'opérateur qui les marque sur l'objet visé à l'aide d'une croix. Il doit mesurer avec précision les distances entre ces points et l'appareil photo (à l'aide d'un mètre ou d'un tachéomètre).
- Des repères topographiques : si des points géographiques ont été mesurés grâce à une station totale sur le site, ils peuvent être utilisés comme marqueur.
- Les « markers » ou les mires : elles sont dépendantes de chaque logiciel. Une fois placées, elles doivent être mesurées avec précision par rapport à l'appareil photo. Elles sont reconnues automatiquement par les logiciels, ce qui facilite l'intégration.

Cependant, ce sont les principes de base et la méthodologie continue à évoluer. Il est possible de coupler cela avec l'aide d'un cheminement topographique et d'une station totale. Dans ce cas, il faudra utiliser les repères du logiciel ainsi que les coordonnées topographiques connues pour mettre en place un cheminement.

L'objectif de ces manipulations est de créer un système de géoréférencement permettant à la fois de situer les différentes photographies entre elles mais aussi de compenser les déformations de celles-ci et de toutes les mettre à l'échelle automatiquement.

Pour que l'ensemble fonctionne correctement, les photographies doivent respecter le principe de recouvrement. Afin que les logiciels reconnaissent rapidement et facilement les positionnements des photographies, il est nécessaire d'avoir au moins trois points de repères (ou mires) (cfr ci-dessus) par photographies ainsi qu'un taux de recouvrement de 60% à 80% entre chaque photographie. Ce taux de recouvrement signifie qu'entre chaque photo, il doit avoir entre 60% et 80% de points en commun. Grâce à cela, le logiciel pourra calculer aisément les positions de chacune des photos. Une fois l'ensemble des photos prises¹⁵⁰, il faut les exporter dans un logiciel de photogrammétrie qui organisera l'ensemble. Le taux de recouvrement tend

¹⁴⁹ https://raan.hypotheses.org/files/2016/02/Photoscan_ModeEmploi_2015.pdf, consulté le 15 juillet 2020.

¹⁵⁰ A préciser que, généralement, on conseille d'avoir un recueil photographique généreux. Il vaut mieux avoir trop de photographies que trop peu.

à changer avec les dernières versions de logiciels qui sont plus performantes. Garder un haut taux de recouvrement est plus un gage de sécurité.

Depuis plusieurs années, les logiciels de photogrammétrie se multiplient sur le marché. Certains sont en *open access* et d'autres sont payants. On peut citer les plus connus tels que ReCap (Autodesk), Metashape (Agisoft) ou encore Meshroom (Alicevision). Dans le cadre du patrimoine, les chercheurs semblent utiliser régulièrement ces trois logiciels ¹⁵¹. Ces logiciels, grâce à des algorithmes, permettent de positionner les photographies sur base des éléments de reconnaissance comme expliqués précédemment. Ces logiciels peuvent dès lors fournir plusieurs résultats¹⁵² :

- Ils peuvent fournir un maillage de polygones (fig. 51) : l'algorithme va calculer les pixels communs sur les photographies et sur base de cette reconnaissance, il va fournir un maillage suivant les contours de la surface.
- Ils peuvent fournir un maillage surfacé (fig. 52) : les polygones sont remplacés par une texture.
- Ils peuvent fournir un maillage texturé (fig. 53) : on utilise les photographies pour les coller sur le maillage calculé par le logiciel.
- ...¹⁵³

¹⁵¹ BACCI, G., BERTOLINI, F., e.a, 2019, *HBIM methodologies for the architectural restoration. The case of the ex-curch of San Quirico all'Olivo in Lucca, Tuscany*, Actes du colloque *2nd International conférence of géomatics and restoration*, Volume XLII-2/W11, Milan, p. 122.

AGUSTIN, L. ET QUINTILLA, M., 2019, *Virtual reconstruction in BIM technology and Digital inventories of Heritage*, actes du colloque *International Committee of Architectural Photogrammetry*, XLII-2/W15, Avila, p. 29.

ALIBERTI, L. et IGLESIAS PICAZO, P., 2019, *Close-Range photogrammetry practice. Graphic documentation of the interior of the walls of Avila (Spain)*, actes du colloque *International Committee of Architectural Photogrammetry*, XLII-2/W15, Avila, p. 51.

¹⁵² MAUMONT, M., 2010, *L'espace 3D...*, dans *in situ*, 13/ 2010, Paris, p. 4.

¹⁵³ D'autres applications sont possibles pour des personnes compétentes dans le domaine. De plus, avec les nouvelles recherches, d'autres possibilités sont réfléchies régulièrement par les spécialistes. N'étant pas le propos de ce travail, nous nous arrêterons aux applications les plus régulières.

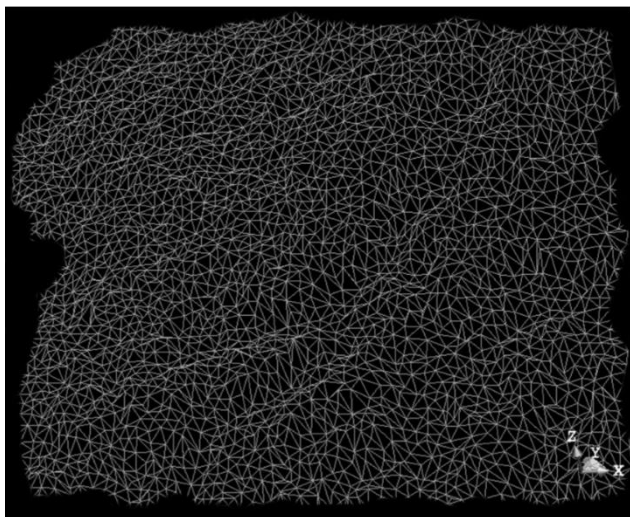


Fig. 51. Exemple de maillage de polygones. 2010. Ministère de la culture et DRAC Aquitaine. (MAUMONT, M., 2010, p. 4.)

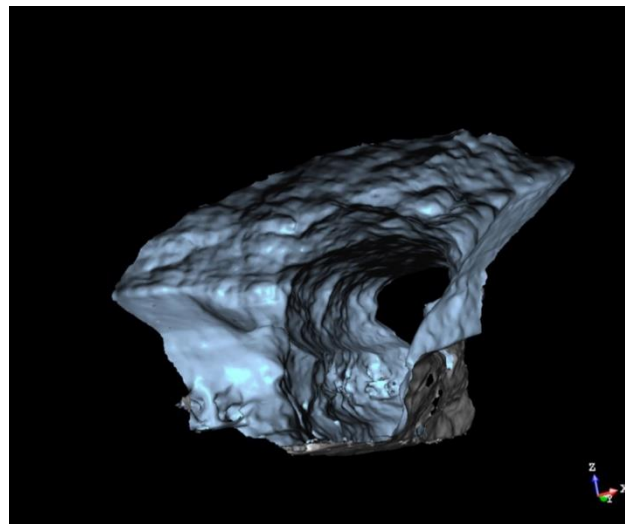


Fig. 52. Exemple de maillage surfacé. 2010. Ministère de la culture et DRAC Aquitaine. (MAUMONT, M., 2010, p. 4.)

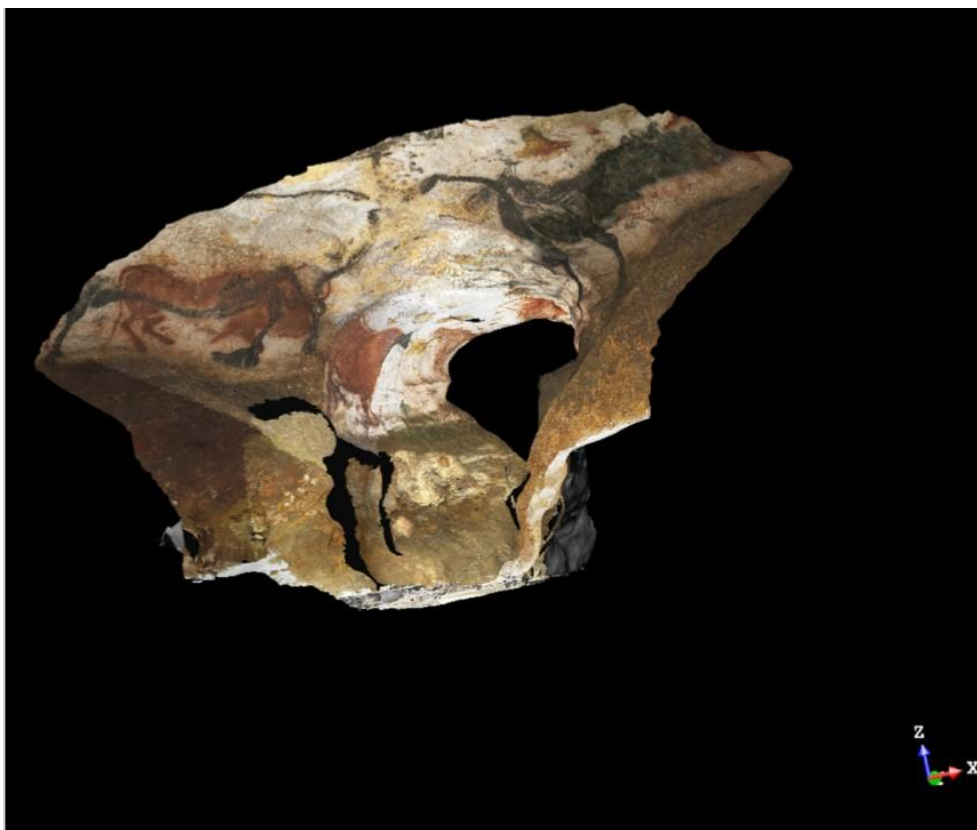


Fig. 53. Exemple de maillage texturé. 2010. Ministère de la culture et DRAC Aquitaine. (MAUMONT, M., 2010, p.5.)

L'utilisation la plus fréquente en recherche consiste à produire un modèle 3D texturé basé sur les photographies qui ont été prises *In Situ*. L'ensemble étant de plus en plus pris en main par les logiciels, la formation nécessaire pour la maîtrise d'un logiciel est courte et il est même possible de le maîtriser en autonomie. Ces dernières années, la photogrammétrie est la méthode de modélisation la plus courante et la plus appréciée dans le patrimoine.

Ces utilisations sont nombreuses. Pour ne citer que quelques exemples parmi les plus aboutis, en France, nous avons des cas d'utilisation de cette technique dans les milieux rupestres pour recréer des grottes¹⁵⁴ (fig. 53). Elle est également utilisée dans la conservation de structures disparues ou menacées comme cela a été le cas avec les remparts d'Avila en Espagne qui ont été modélisés sur base de photographies du site¹⁵⁵ (fig. 54).

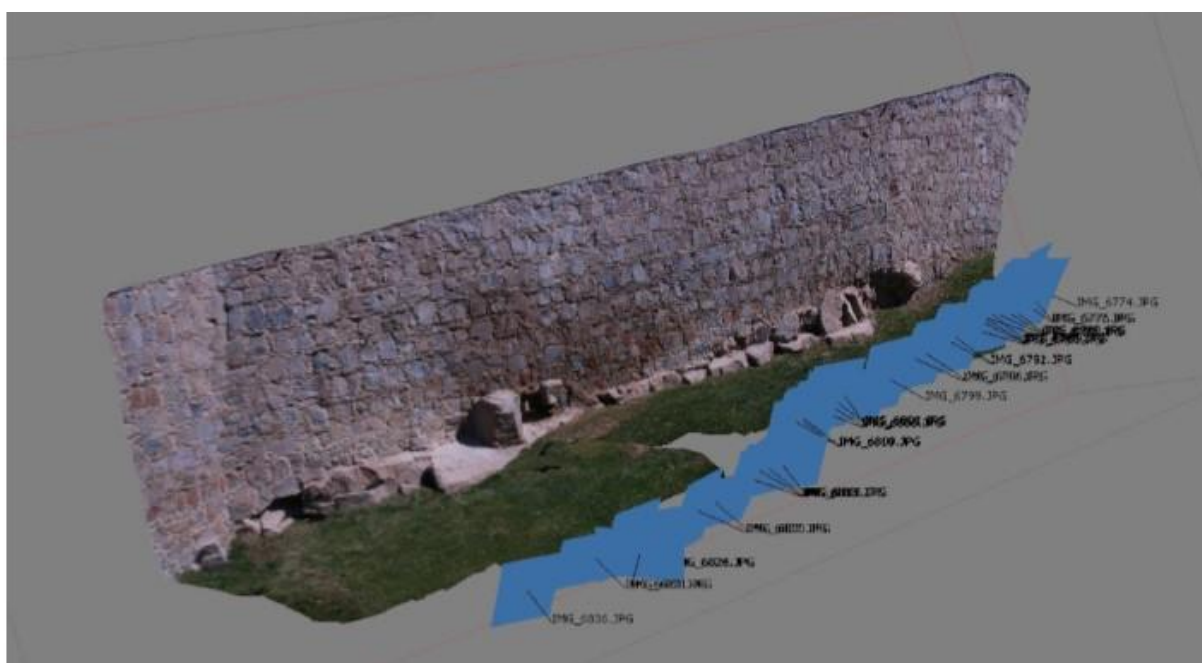


Fig. 54. Avila. Modèle texturé d'une des sections du mur intérieur de la ville. 2017. (Agisoft Metashape) (ALIBERTI, L. et IGLESIAS PICAZO, P., 2019, p. 51.)

¹⁵⁴ MAUMONT, M., 2010, *L'espace 3D...*, dans *in situ*, 13/ 2010, Paris, p. 14-15.

¹⁵⁵ ALIBERTI, L. et IGLESIAS PICAZO, P., 2019, *Close-Range photogrammetry practice...*, actes du colloque *International Committee of Architectural Photogrammetry*, XLII-2/W15, Avila, p. 52.

En Syrie, la méthode a même été expérimentée pour conserver l'état d'un bâtiment menacé par la guerre. Grâce à ces chercheurs, ils ont pu conserver l'état de certains bâtiments de Bosra Al-Sham avant leur potentielle destruction (fig. 54).¹⁵⁶



Fig. 54. Bosra Al-Sham. Orthophotographie de la porte ouest de la ville. 2018. (Agisoft Metashape) (AL KHALIL, O. et GRUSSENMEYER, P., 2019, p. 59.)

Dans l'ensemble des cas cités, l'expérience s'est avérée efficace et utile. Elle a permis de mettre en avant des peintures anciennes¹⁵⁷ ou encore de conserver des éléments menacés¹⁵⁸.

¹⁵⁶ AL KHALIL, O. et GRUSSENMEYER, P., 2019, *2D & 3D reconstruction workflows from archive images, case study of damaged monuments in Bosra Al-Sham City (Syria)*, actes du colloque *International Committee of Architectural Photogrammetry*, XLII-2/W15, Avila, p. 55-62.

¹⁵⁷ MAUMONT, M., 2010, *L'espace 3D...*, dans *in situ*, 13/ 2010, Paris, p. 14-15.

¹⁵⁸ ALIBERTI, L. et IGLESIAS PICAZO, P., 2019, *Close-Range photogrammetry practice...*, actes du colloque *International Committee of Architectural Photogrammetry*, XLII-2/W15, Avila, p. 52.

De ces expériences ressortent souvent les avantages et les défauts de la méthode. Les avantages sont les suivants :

- *La rapidité d'exécution* : une journée peut suffire à réaliser tous les relevés et les clichés nécessaires à la réalisation d'un modèle.
- *Le coût* : le matériel nécessaire n'est pas onéreux. Il suffit d'un appareil photo et d'une station totale (qui peut être louée). Concernant les logiciels, comme déjà spécifié, certains sont payants d'autres sont gratuits. Des chercheurs ont comparé plusieurs logiciels gratuits et payants. Leur expérience a montré que les logiciels payants offrent tout de même une précision plus grande et plus de possibilités.¹⁵⁹
- *Le rendu* : les logiciels actuels et les algorithmes qui les accompagnent fournissent des rendus de très bonnes qualités.
- *La facilité de mise en œuvre* : les compétences nécessaires sont accessibles à tous et ne demandent pas de formations longues comme cela était le cas à la fin du 20^e siècle.
- *La conservation* : il est possible de conserver sur des bases de données les analyses et les résultats de ces campagnes.
- *La flexibilité des logiciels de photogrammétrie* : ils peuvent permettre différentes manipulations mais aussi des exportations, des rendus différents. Ils peuvent permettre d'ajouter des éléments après les campagnes, de redessiner, etc.¹⁶⁰

¹⁵⁹ AL KHALIL, O. et GRUSSENMEYER, P., 2019, *2D & 3D reconstruction workflows ...*, actes du colloque *International Committee of Architectural Photogrammetry*, XLII-2/W15, Avila, p. 60.

¹⁶⁰ ALBY, E., VIGOUROUX, E. et ELTER, R., 2019, *Implementation of survey and three-dimensional monitoring of archaeological excavations of the Khirbat Al Dusaq site, Jordan*, actes du colloque *International Committee of Architectural Photogrammetry*, XLII-2/W15, Avila, p. 45.

Néanmoins, la méthode n'est pas exempte de défauts :

- *La précision des clichés* : il s'agit d'un défaut qui peut être contré si l'opérateur fait attention lors de la saisie. En effet, l'exposition ou les réglages de l'appareil peuvent entraîner des disparités dans les rendus. Outre la perte esthétique que cela entraîne, ces disparités peuvent entraîner des difficultés de calcul pour les algorithmes.
- *L'accessibilité à certains endroits* : en effet, lorsqu'il est question d'accéder aux parties hautes d'un bâtiment, il peut être nécessaire de devoir utiliser des accessoires supplémentaires comme des perches. Celles-ci peuvent être difficile de manipulation et leur stabilité est également difficile à gérer, entraînant dès lors des clichés de moins bonnes qualités¹⁶¹. Néanmoins, la commercialisation de drones de plus en plus performants ces dernières années permettent de contrebalancer ce problème. Lors de leur expérimentation en milieu rupestre, M. Maumont et son équipe soulevaient également le problème d'accessibilité¹⁶². Il est nécessaire de pouvoir faire des clichés dans de bonnes conditions mais celles-ci ne sont pas toujours remplies dans les milieux rupestres en raison de l'humidité, des problèmes d'éclairages ou encore de l'étroitesse de l'espace.
- *Les effets de déformation des clichés* : il est courant que les clichés subissent des déformations sur les côtés en raison de l'objectif utilisée. Les logiciels corrigent ces défauts mais cela reste néanmoins un élément auquel il est nécessaire de prêter attention.
- *La taille des fichiers* : en effet, les fichiers peuvent prendre beaucoup de place étant donné toutes les données qui les composent. Néanmoins, les fichiers ont tendance à être de plus en plus compressés pour permettre un transfert et une utilisation simplifiés.
- *L'utilisation des fichiers* : régulièrement, l'une des critiques faites à la méthode concerne la difficulté d'utilisation et de transport pour les fichiers. En effet, un fichier tridimensionnel ne peut pas être utilisé aussi facilement qu'un fichier 2D. Finalement, pour être utilisable, le fichier 3D doit souvent être remis en format 2D. Nous reparlerons de ce point plus loin.

¹⁶¹ HÉNO, R. et CHANDELIER, L., 2014, *Numérisation 3D de bâtiments...*, « Collection SIG et intelligence territoriale », Londres, p. 50-53.

¹⁶² MAUMONT, M., 2010, *L'espace 3D...*, dans *in situ*, 13/ 2010, Paris, p. 15.

La méthode continue aujourd'hui à évoluer. Il est possible maintenant d'avoir des pré-rendus sur des tablettes, les appareils photos sont de plus en plus performants tout en étant de plus en plus faciles à manier, notamment avec les nouveaux téléphones portables¹⁶³. La photogrammétrie est une méthode qui semble de plus en plus être entrée dans le cahier des charges classique d'un chantier. De plus, on observe de plus en plus, la combinaison de cette méthode avec la seconde méthode qui nous concerne directement : la lasergrammétrie.

b) La lasergrammétrie :

Il s'agit de la seconde méthode la plus courante pour réaliser des relevés 3D. Elle se base sur le principe de mesure du temps de vol d'une lumière. Elle prend ses origines plus tardivement que la photogrammétrie. On considère qu'elle est mise en place en 1960 par l'américain Théodore Maiman lors de ses expériences sur les émissions laser. Deux ans plus tard, Louis Smullin utilise la technique pour mesurer la distance entre la terre et la lune.¹⁶⁴

Dès 1964, la technologie est commercialisée par un fabricant américain. Avec l'évolution de la technique et de sa maîtrise, la méthode fût rapidement adaptée dans différents domaines (aérien, topographie, etc)¹⁶⁵. Lors de l'arrivée des ordinateurs, au fur et à mesure la méthode est devenue plus rapide et plus précise. Selon Mmes Héno et Chandelier, déjà durant les années 90, des scanners à balayage permettaient la saisie de 5000 points par seconde¹⁶⁶. L'utilisation de ce matériel à l'époque concerne essentiellement des relevés topographiques mais dès cette période, des expériences vont commencer à être menées en laboratoire pour une utilisation dans le patrimoine. Pour Michaël Shott, durant

¹⁶³ ALLESSANDRI, L., BAIOCCHI, V., DEL PIZZO, S., DI CIACCIO, F., ONORI, M., ROLFO, M.-F. et TROISI, S., 2019, *Three-dimensional survey of Guattari cave with traditional and mobile phone cameras*, actes du colloque 2nd *International conference of geomatics and restoration*, Volume XLII-2/W11, Milan, p. 37-41.

¹⁶⁴ HÉNO, R. et CHANDELIER, L., 2014, *Numérisation 3D de bâtiments...*, « Collection SIG et intelligence territoriale », Londres, p. 81.

¹⁶⁵ *Ibid.*, p. 81.

¹⁶⁶ *Ibid.*, p. 82.

les années 1990-2000, les biologistes ont également ouvert la voie aux archéologues en utilisant la technologie 3D pour réaliser des études de *Geometric morphometrics*¹⁶⁷ en biologie et en paléobiologie¹⁶⁸. Début 2000, avec les premières commercialisations des scanners laser, les chercheurs se penchent plus sur l'utilisation de la méthode dans le patrimoine¹⁶⁹.

Au fur et à mesure, la technologie s'est améliorée mais surtout s'est compactée. Actuellement, les scanners laser ne font plus que quelques kilos et sont facilement transportables. En fonction des modèles, la précision est différente, mais sur le marché actuel, les scans proposent en général des captures de 506 000 à 1 000 000 de points par seconde sur 360°¹⁷⁰.

On peut ajouter que ces scanners sont enrichis depuis plusieurs années de petits appareils photographiques embarqués permettant d'ajouter des clichés aux relevés laser. Leur qualité est discutable mais ils peuvent permettre dans certains cas d'enrichir les relevés. Les qualités de ces appareils s'améliorent aussi de plus en plus. Mais souvent quand il est décidé d'utiliser des photographies pour texturer les résultats, on aura tendance à utiliser des photographies externes.

La méthode consiste donc à pointer un objet ou une surface avec un faisceau lumineux (de préférence un laser, car il est peu sensible à l'atmosphère) et à calculer le temps que met le faisceau pour réaliser l'aller-retour entre la surface et le capteur. Une fois, le temps calculé, le point est géoréférencé dans un système de coordonnées interne à l'appareil. En répétant la chose des milliers voire des millions de fois, il est possible de fournir un nuage de points géoréférencés¹⁷¹. Nous ne parlerons ici que de l'acquisition *TLS*

¹⁶⁷ Il s'agit d'une méthode consistant à observer, quantifier et comparer des organismes pour permettre une classification.

¹⁶⁸ SHOTT, M., 2014, *Digitizing archaeology. A subtle revolution in analysis*, dans *World Archaeology*, Vol. 46 (1), London, p. 2.

¹⁶⁹ HÉNO, R. et CHANDELIER, L., 2014, *Numérisation 3D de bâtiments...*, « Collection SIG et intelligence territoriale », Londres, p. 82

¹⁷⁰ <https://www.imag-ing.com/le-laser-scanning-3d-ou-lasergrammetrie>, consulté le 3 Juillet 2020.

¹⁷¹ HÉNO, R. et CHANDELIER, L., 2014, *Op. Cit.*, p. 82-83.

(*Terrestrial lasers scan*) mais d'autres applications, dont certaines pratiquées dans le patrimoine, existent comme le *MNT* (*Mesure Numérique de Terrain*) ou le *MNE* (*Mesure Numérique d'Élévation*)¹⁷².

Un scanner se compose généralement d'un émetteur laser (dont la fréquence et la puissance peuvent parfois être modulables), d'un prisme ou d'un miroir rotatif pour permettre de modifier l'angle du laser, d'un récepteur et d'un logiciel interne pour enregistrer et géoréférencer les résultats (fig. 55).¹⁷³

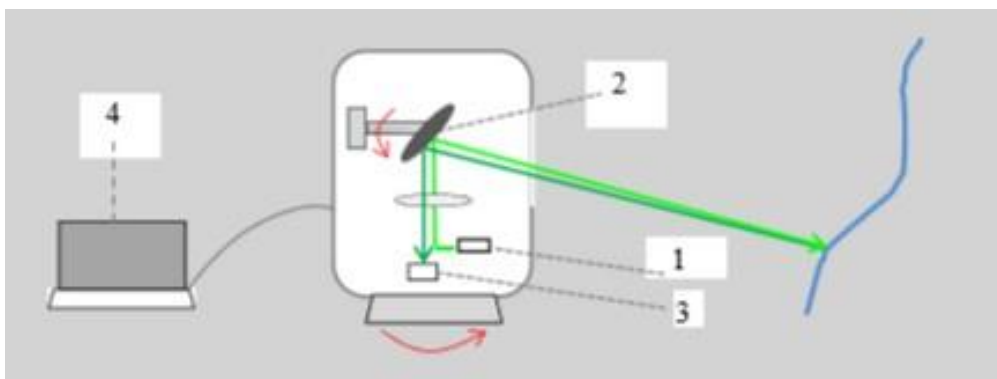


Fig. 55. Schéma simplifié du fonctionnement d'un scanner laser. 2014. (HÉNO, R. et CHANDELIER, L., 2014, p.83.)

In situ, un scan doit généralement suivre le même fonctionnement qu'un relevé au tachéomètre ou à la station totale. Il est nécessaire d'avoir un point de mise en station géoréférencé (par la présence d'une borne géographique ou par un cheminement à la station totale). Ensuite, dans la majorité des cas de relevés architecturaux, un seul emplacement n'est pas suffisant pour couvrir l'entièreté des structures. Dans ce cas, on effectuera un cheminement à l'aide d'une station totale. Les différents points de mises en station se doivent d'être marqués à l'aide de cibles (planes ou sphériques) permettant aux emplacements d'être identifiés par le logiciel d'acquisition du nuage¹⁷⁴. Cependant, certains

¹⁷² Ce sont, à l'origine, des approches topographiques avec une saisie aérienne ou zénithale (pour les maquettes par exemple) qui trouvent également des échos en histoire de l'art et en archéologie.

¹⁷³ HÉNO, R. et CHANDELIER, L., 2014, *Numérisation 3D de bâtiments...*, « Collection SIG et intelligence territoriale », Londres, p. 82.

¹⁷⁴ LANDES, T., GRUSSENMEYER, P. et BOULAASSAL, H., 2011, *Les principes fondamentaux de la lasergrammétrie terrestre. Acquisition, traitement des données et applications (partie 2/2)*, dans *Revue XYZ*, n°129, 4^e trimestre, s.l., p. 27.

modèles récents de scanner se voient maintenant équipés de systèmes de localisation GPS précis (comme pour les nouvelles stations totales). Il est donc parfois plus facile de mettre en station certains modèles de scanner laser.

Concernant la méthode d'acquisition, les chercheurs mettent en avant trois types d'acquisitions différentes issues de différents modèles de scanners laser. :

- Le scanner laser à temps de vol ou à impulsion (fig. 56) : dans ce cas-là, l'appareil envoie un faisceau direct sur la cible qui le renvoie et selon le temps de vol, l'appareil peut calculer la distance et l'emplacement du point. ¹⁷⁵
- Le scanner laser à décalage de phase (fig. 57) : le système dégage un laser continu également mais qui subit une modulation sinusoïdale en amplitude. Le positionnement du point est déduit de la comparaison entre l'onde émise et l'onde retournée. ¹⁷⁶
- Le scanner laser à triangulation optique (fig. 58) : dans ce cas-ci, l'émetteur envoie un laser continu sans modulation mais le récepteur est décalé en hauteur par rapport au récepteur. Le parcours émetteur-surface- récepteur forme alors un triangle qui permet de calculer l'emplacement du point. Cette technique est surtout utilisée sur des petits objets afin d'obtenir une grande précision. ¹⁷⁷

Ces trois modes d'analyses ne peuvent pas être réalisés par les mêmes scanners. Il s'agit de trois modèles différents. Il semble que le scanner le plus couramment utilisé sur les chantiers du patrimoine soit le système à temps de vol. Ce dernier s'adapte bien aux relevés en extérieur sur des bâtiments de grandes tailles grâce à une bonne portée mais également a d'excellentes performances face à la lumière naturelle. Concernant les scanners à décalage, ils s'adaptent idéalement aux captures en intérieur et dans les zones particulières comme les escaliers. Comme expliqué plus haut, les scanners à triangulation se prêtent mieux par leur finesse à de petits objets ou à du mobilier. ¹⁷⁸

¹⁷⁵ HÉNO, R. et CHANDELIER, L., 2014, *Numérisation 3D de bâtiments...*, « Collection SIG et intelligence territoriale », Londres, p. 83.

¹⁷⁶ *Ibid.*, p. 83.

¹⁷⁷ *Ibid.*, p. 84.

¹⁷⁸ *Ibid.*, p. 92.

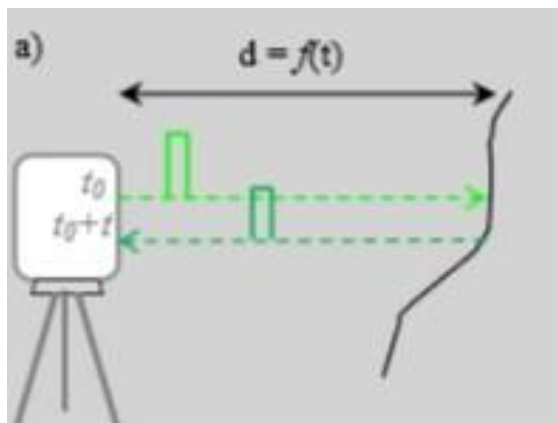


Fig. 56. Schéma simplifié du fonctionnement d'un scanner laser à temps de vol. 2014. (HÉNO, R. et CHANDELIER, L., 2014, p.84.)

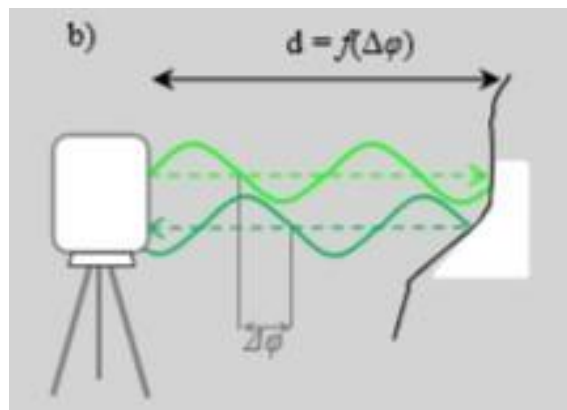


Fig. 57. Schéma simplifié du fonctionnement d'un scanner laser à décalage de phase. 2014. (HÉNO, R. et CHANDELIER, L., 2014, p.84.)

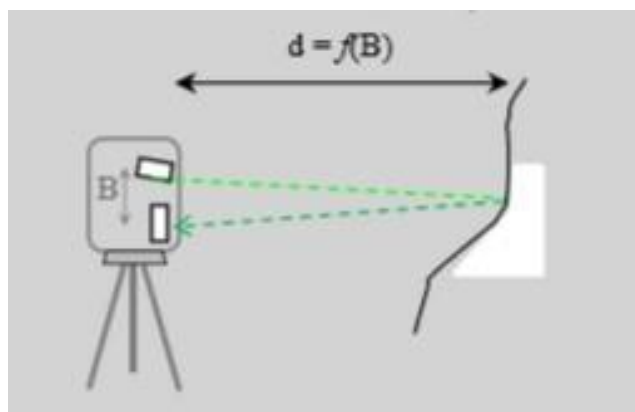


Fig. 58. Schéma simplifié du fonctionnement d'un scanner laser triangulation optique. 2014. (HÉNO, R. et CHANDELIER, L., 2014, p.84.)

Une fois l'acquisition réalisée sur le terrain, il est souvent nécessaire de retravailler le fichier pour le rendre plus « léger » numériquement et plus aisé à manipuler. Cette étape passe par différents logiciels comme par exemple Point Tools ou Point Cab. C'est au moyen de ce premier logiciel qu'on va, à l'aide d'algorithmes, rassembler les différents nuages produits durant la capture (chaque point de mise en station produisant un nuage à part entière). Une fois ces nuages rassemblés, ils vont être recalibrés, les points doublons ou inutiles seront éliminés.

Selon le cahier des charges, il peut être nécessaire d'utiliser un second logiciel. Comme précisé précédemment, il est important de savoir avant d'entreprendre un chantier de capture 3D ce que l'on désire avoir en fin de campagne. Selon l'endroit, les conditions

ou l'objectif visé, une technique de capture ou une approche correspondra mieux à une autre. Les possibilités concernant les nuages de points sont nombreuses. Il est possible de les conserver en tant que tels pour exprimer, en fonction de la précision et la taille des points, les grandes lignes structurelles du bâtiment ou encore des détails plus discrets comme des marques de tacherons. De plus, les nuages de points sont également utilisés pour diagnostiquer et prévoir des interventions sur des structures grâce aux propriétés radiométriques des données récoltées¹⁷⁹. Enfin, il est également possible d'utiliser les nuages de points pour réaliser des dessins filaires pour exprimer les grandes lignes structurelles du bâtiment, son parement ou pour permettre une texturation.¹⁸⁰

Dans le cas de ces derniers, il est nécessaire de transférer le nuage de points dans un logiciel de *Modeling*. Ces logiciels sont nombreux et ils n'offrent pas tous les mêmes spécificités, mais, surtout, la majorité n'a pas pour vocation la modélisation archéologique. Il existe des logiciels gratuits comme Blender et Sketchup, mais ceux-ci ne permettent pas l'intégration de nuage de points. Ils n'ont dès lors pas d'intérêt dans une campagne de relevé laser. Mais ils existent également des logiciels d'architecture et de géomatique plus professionnels. Dans cette catégorie rentrent des logiciels comme Revit (Autodesk) ou encore MicroStation 3D (Bentley). Le choix de tel ou tel logiciel est très personnel, ils offrent des possibilités et des interfaces différentes. On doit reconnaître que souvent, concernant la modélisation dans le patrimoine, Revit est cité comme un outil pratique et adéquat pour la discipline.

La modélisation et les nuages de points sont moins courants sur les chantiers, car le matériel est plus coûteux que dans le cas de la photogrammétrie. De plus, la maîtrise du matériel est plus conséquente aussi. Il faut maîtriser à la fois le scanner laser, ses paramètres ainsi que son calibrage mais aussi les logiciels post-capture primordiaux pour l'exploitation des données

¹⁷⁹ ADAMOPOULOS, E. et RINAUDO, F., 2019, *3D interpretation and fusion of multidisciplinary data for heritage science. A review*, actes du colloque *International Committee of Architectural Photogrammetry*, XLII-2/W15, Avila, p. 17.

¹⁸⁰ HÉNO, R. et CHANDELIER, L., 2014, *Numérisation 3D de bâtiments...*, « Collection SIG et intelligence territoriale », Londres p. 83. p. 19.

récoltées. Néanmoins, la méthode a été de plus en plus utilisée ces dernières années sur les chantiers archéologiques.

En prime des relevés, les captures tridimensionnelles permettent différentes applications. Une capture peut permettre dans certains cas de détecter des zones de bâtiments touchées par l'humidité comme à Salamanque en Espagne¹⁸¹. Grâce à cette détection, des actions de restaurations ont pu être mises au point.

En se basant sur les mêmes principes de comparaisons que les biologistes, certains chercheurs ont pu utiliser la 3D pour mettre en avant des problèmes dans les typologies lithiques (dans ce cas-ci en Patagonie)¹⁸².

Il a aussi été possible de modéliser des bâtiments disparus. Dans le cas du complexe palatial d'Aix-La-Chapelle, l'entièreté du complexe a pu être recréée (fig. 59)¹⁸³. Dans le cas de la modélisation du complexe palatiale, le modèle a été réalisé sans passer par une capture tridimensionnelle à l'aide d'un scanner. Les chercheurs sont basés uniquement sur les relevés papiers et les recherches sur le complexe. Ils n'ont donc utilisé qu'un logiciel de modélisation (de *Modeling*).



Fig. 59. Aix-la-Chapelle, Reconstitution 3D du complexe palatiale d'Aix-la-Chapelle. 2015. Cologne. (KÖBE, A., RISTOW, S. et VASÁROS, Z., 2017, p. 328)

¹⁸¹ ADAMOPOULOS, E. et RINAUDO, F., 2019, *3D interpretation and fusion of multidisciplinary data ...*, actes du colloque *International Committee of Architectural Photogrammetry*, XLII-2/W15, Avila, p. 17.

¹⁸² SHOTT, M., 2014, *Digitizing archaeology ...*, dans *World Archaeology*, Vol. 46 (1), London, p. 2.

¹⁸³ KÖBE, A., RISTOW, S. ET VASÁROS, Z., 2017, *Modell der Pfalz Karls des Großen in Aachen*, dans STIEGEMANN, CH., dir., 2017, *Wunder Roms Im Blick des Nordens Von der Antike bis zur Gegenwart*, Catalogue II, Paderborn, p. 328-329.

En Turquie, certains chercheurs ont décidé d'utiliser les scanners laser pour modéliser des zones difficiles d'accès dont l'éclairage et les conditions rendent les relevés difficiles. Dans ce cas-ci, ils ont scanné des citernes souterraines byzantines à Istanbul (fig. 60). Grâce à ces scans, ils ont pu mieux comprendre leur structure et leur agencement. Sans les scanners laser, ce type de relevé serait très complexe au vu du site¹⁸⁴. Le même constat a été fait dans les milieux rupestres où M. Maumont considérait également que les scanners lasers se prêtaient beaucoup mieux à l'environnement.¹⁸⁵

Les exemples d'expérimentation et de résultats de campagne de scans 3D ne manquent pas. Comme constaté par les chercheurs de l'Université de Naples, le scan laser trouve des applications dans la conservation, la préservation, mais aussi dans la communication avec le



Fig. 60. Istanbul. Reconstitution 3D des citernes byzantine de Sarnicli Han. 2013, Istanbul. (Geomagic) (TEMIZER, T., NEMLI, G., EKIZCE, E., DEMIR, S., BAYRAM, B., ASKIN, F.-H., COBANOGU, A.-V. et YILMAZ, H.-F., 2013, p. 625.)

¹⁸⁴ TEMIZER, T., NEMLI, G., EKIZCE, E., DEMIR, S., BAYRAM, B., ASKIN, F.-H., COBANOGU, A.-V. ET YILMAZ, H.-F., 2013, *3D Documentation of a historical monument using terrestrial laser scanning case study. Byzantine Water Cistern, Istanbul*, Actes du colloque *International Committee of Architectural Photogrammetry*, Volume XL-5/W, Strasbourg, p. 623-628.

¹⁸⁵ MAUMONT, M., 2010, *L'espace 3D...*, dans *in situ*, 13/ 2010, Paris, p. 15.

public¹⁸⁶. Ces modèles en trois dimensions, outre leur intérêt scientifique, permettent également de partager aux publics certains artefacts disparus ou difficiles à observer. La méthode et les techniques continuent à évoluer (avec notamment l'évolution de l'intégration de métadonnées). Comme pour la photogrammétrie, il semble pertinent de lister ses qualités évidentes, mais aussi ses défauts.

Concernant ses qualités, voici les éléments qui ressortent régulièrement des expériences récentes dans le patrimoine :

- *Précision* : quand le scanner opère sans soucis, les points qu'il produit sont d'une grande précision.
- *Rapidité du scan* : les scans se font très vite avec les technologies actuelles. Les meilleurs modèles réalisant des relevés de 1 000 000 de points/ sec, une journée suffit souvent pour collecter l'ensemble des relevés d'un bâtiment.
- *Densité des points* : cela rejoint le point sur la précision. Les nuages de points produits sont maintenant très denses et permettent un grand niveau de détails.
- *La couleur* : les scanners actuels permettent de produire des nuages de points qui capturent la couleur avec une grande précision. La possibilité d'utiliser ces couleurs permet de faire des diagnostics pour les bâtiments menacés, mais aussi de permettre l'utilisation directement du nuage de points pour l'exposition au grand public.
- *Un grand choix de logiciels* : il y a de plus en plus de logiciels sur le marché. Chaque spécialiste est libre de se pencher sur l'un d'entre eux, chacun offrant des approches et des interfaces différentes.
- *L'évolution du matériel* : le matériel évolue rapidement. Il se simplifie, s'allège et devient plus précis. En quelques dizaines d'années, les fabricants ont énormément évolué dans les gammes proposées. On voit de plus en plus de scanners équipés de caméras ou d'appareils photos. La qualité de ceux-ci n'est pas toujours convaincante mais cela continue à évoluer.

¹⁸⁶ NICCOLUCCI, F., FELICETTI, A., AMICO, N. et D'ANDREA, A., 2013, *Quality control in the production of 3D documentation of monuments*, actes du colloque *Built heritage 2013 : Monitoring Conservation Management*, Milan, p. 864.

- *L'accessibilité* : l'appareillage permet un accès à des zones parfois difficiles comme dans le cas des milieux rupestres ou souterrains cités précédemment.
- *Intégration de métadonnées* : il s'agit d'un élément qui est de plus en plus mis en avant dans les recherches dans le patrimoine ces dernières années. Il est en effet possible d'attacher aux fichiers des informations complémentaires et donc permettre d'avoir énormément d'informations sur un fichier 3D¹⁸⁷.

Cependant, la lasergrammétrie semble convaincre moins franchement les archéologues en raison des défauts suivants :

- *Son coût* : un scanner laser coûte énormément d'argent. Selon Michaël Scott, il faut compter entre 2500€ pour les modèles les moins performants et 100 000€ pour les plus performants¹⁸⁸. Pour ma part, je n'ai pas consulté les catalogues de ventes pour faire un comparatif des différents scanners. Cependant, à titre d'exemple, un modèle Leica BLK 360 (modèle basique, facile de transport produit par une compagnie performante dans le domaine) chez un sous-traitant, coûte 19 200€ TTC¹⁸⁹. Il ne s'agit pas du modèle le plus performant mais sûrement l'un des modèles ayant le meilleur rapport qualité/ taille. Il fournit 360 000 points par seconde, est équipé d'une petite caméra, se manipule à l'aide d'une tablette et ne pèse que 1kg¹⁹⁰. Au coût du matériel de terrain, il faut également ajouter le prix des logiciels de modélisations. Certains sont gratuits mais n'offrent que peu de flexibilité pour travailler. Les logiciels payants ont tous des prix et des systèmes d'abonnements différents (au mois, à l'année ou à vie). Les prix peuvent monter jusqu'à 7750 € pour les logiciels les plus onéreux¹⁹¹. L'ensemble de ces coûts sur un chantier d'archéologie ne sont pas négligeables. Néanmoins, concernant les scanners, des locations sont toujours possibles.

¹⁸⁷ POUX, F., NEUVILLE, R., VAN WERSCH, L., NYS, G.-A., et BILLEN, R., 2017, *3D point clouds in archeology...*, dans *Geosciences*, 7 (96), Orléans, p. 22.

¹⁸⁸ SHOTT, M., 2014, *Digitizing archaeology...*, dans *World Archaeology*, Vol. 46 (1), London, p. 3.

¹⁸⁹ <https://www.topographie-laser.eu/scanner-laser-scanner-3d-leica-blk360.html>, consulté le 13 Juillet 2020.

¹⁹⁰ <https://leica-geosystems.com/fr-be/products/laser-scanners/scanners/blk360>, consulté le 13 Juillet 2020.

¹⁹¹ <https://all3dp.com/fr/1/meilleur-logiciel-architecture-3d/>, consulté le 13 Juillet 2020.

- *Sa complexité* : en effet, contrairement à la photogrammétrie, il est préférable de suivre une formation pour la maîtrise du matériel et des différents logiciels. Ces formations dépendent de chacun mais elles semblent régulièrement nécessaires pour les logiciels payants, performants et professionnels. Concernant les logiciels gratuits, les formations ne semblent pas toujours nécessaires.
- *Les fichiers* : chaque fabricant de logiciel a son format de fichier. Il n'y a pas un format officiel. Cela rend parfois les transferts et l'exploitation difficiles. A cet effet, de plus en plus de fabricants prennent cette problématique en cause au vu des nouvelles élaborations de logiciel. A ce problème de format, il faut ajouter le problème de la taille des fichiers. Il est régulier que les fichiers de nuages de points ou de modèles 3D soient très lourds en raison des nombreuses données qu'ils contiennent. Comme pour les formats, de plus en plus de sociétés tendent à régler ou à considérer ce problème.
- *L'exploitation des données* : outre les mesures et les résultats produits durant la création du modèle 3D, il est difficile d'exploiter un fichier dans ce format. Il est souvent réduit à repasser par le format 2D pour être publiable ou utilisable par des confrères. Avec l'apparition de logiciels simples de lecture 3D tels que PDF 3D, l'utilisation de fichier 3D semble de plus en plus simple.
- *Les problèmes techniques* : si un défaut de fabrication ou de calibration survient, le relevé peut en être impacté. De plus, certains matériaux, tels que le verre, entraînent des réflexions différentes du laser qui peuvent potentiellement causer des anomalies dans le relevé. Les faisceaux laser peuvent être également influencés par l'environnement et développer des bruits involontaires¹⁹².
- *Le temps* : l'un des défauts qui revient régulièrement dans les expérimentations concerne le temps nécessaire pour réaliser un modèle 3D. Selon les objectifs visés, il est possible que le travail post-capture soit plus long par rapport aux techniques 2D plus traditionnelles.¹⁹³
- *Les logiciels d'architecture ou de géomatique* : comme déjà expliqué précédemment, les logiciels de modélisation n'ont souvent pas pour objectif l'application dans le patrimoine. Certains en tiennent compte comme Sketchup sans non plus être principalement orientés vers cette utilisation. Cela entraîne une certaine frustration

¹⁹² HÉNO, R. et CHANDELIER, L., 2014, *Numérisation 3D de bâtiments...*, « Collection SIG et intelligence territoriale », Londres p. 83. p. 89.

¹⁹³ *Ibid.*, p. 28.

après des archéologues qui ne trouvent pas toujours les outils recherchés dans des logiciels qui parfois auront pris du temps d'apprentissage et rongé une partie non négligeable du budget de la campagne.

Cette liste de qualités et de défauts n'est évidemment pas exhaustive. La méthode évolue continuellement et les approches actuelles prennent en compte les défauts et les qualités de la technique.

c) La combinaison de la photogrammétrie et de la lasergrammétrie :

Par ailleurs, dans cet écrit, les techniques ont été présentées séparément mais il est de plus en plus courant de les combiner¹⁹⁴. En effet, dans le but d'avoir des reconstitutions précises et réalistes, certains chercheurs ont pu lier la précision du relevé au scanner laser avec les relevés photogrammétriques. Il en ressort des résultats assez convaincants tout en demandant une certaine maîtrise dans le domaine. Par ailleurs, ce genre de campagne demande plus de temps qu'une campagne en photogrammétrie ou en lasergrammétrie ainsi que l'accès au matériel nécessaire pour les deux méthodes. On peut citer l'expérimentation par une équipe de géomaticiens de l'Uliège sur la mosaïque de Germigny-des-Prés. Ils ont combiné un nuage de point avec des photographies¹⁹⁵. Le rendu est assez convaincant (fig. 61.).

¹⁹⁴ TEMIZER, T., NEMLI, G., EKIZCE, E., DEMIR, S., BAYRAM, B., ASKIN, F.-H., COBANOGU, A.-V. et YILMAZ, H.-F., 2013, *3D Documentation of a historical monument ...*, Actes du colloque *International Committee of Architectural Photogrammetry*, Volume XL-5/W, Strasbourg, p. 623.

¹⁹⁵ POUX, F., NEUVILLE, R. et BILLEN, R., 2017, *Point cloud classification of tesserae ...*, Actes du colloque *International Committee of Architectural Photogrammetry*, Volume IV-2/W2, Ottawa, p. 203-211.



Fig. 61. Germigny-des-Prés. Reconstitution 3D de la mosaïque occidentale. Vue du dessus. 2017. Département de géomatique de l'Université de Liège. Liège. (Context capture) (POUX, F., NEUVILLE, R. et BILLEN, R., 2017, p. 205)

Ces expérimentations restent encore isolées mais dans un futur proche, il est possible que le mélange des deux approches soit plus récurrent sur les chantiers d'archéologie. Au vu de l'évolution des scanners laser, il n'est pas impossible que les appareils photographiques embarqués deviennent de plus en plus performants, offrant ainsi directement tous les outils nécessaires pour combiner la photogrammétrie et la lasergrammétrie.

d) Discussion :

Un défaut commun aux deux méthodes concerne l'exploitation des relevés. En effet, il s'agit d'un des paradoxes de la méthode. Il n'est pas simple de présenter dans un écrit ou dans une étude un relevé 3D. Il est souvent décidé d'utiliser un support plane, en deux dimensions. C'est l'un des reproches les plus virulents adressés à la modélisation. Pourtant les deux méthodes entretiennent un lien étroit avec la représentation bidimensionnelle au sein même des possibilités qu'elles offrent. En effet, un des avantages des logiciels de photogrammétrie et de modélisation est de pouvoir réaliser des coupes ou des élévations de façade. En réalité, ces

logiciels peuvent offrir les mêmes rendus qu'un relevé plus classique en deux dimensions. Considérer cette représentation bidimensionnelle comme un défaut n'est dès lors peut-être pas justifiée étant donné que cela fait partie intégrante des fonctionnalités de la méthode.

En revanche, si les méthodes tridimensionnelles n'apportent rien de plus que des représentations bidimensionnelles, il est logique d'en déduire que ces méthodes n'ont que peu d'intérêts. Cependant, comme déjà mentionnée précédemment, l'observation tridimensionnelle permet des constats et des recherches différentes. Quant à l'appareillage, il permet lui-même de fournir des informations précieuses. Outre les apports d'informations de la technique, concernant le format, de plus en plus de logiciels permettent d'utiliser les fichiers 3D facilement comme PDF 3D. Dès lors, la photogrammétrie et la lasergrammétrie apportent en plus d'un support 2D, un support 3D. Les technologies autour de la 3D sont en plein développement et il est probable que dans plusieurs années, les inquiétudes concernant l'intérêt de la technique se soient dissipées.

Par ailleurs, ces modèles ne trouvent pas un intérêt uniquement dans un cadre scientifique. Il est également possible d'utiliser ceux-ci dans un cadre grand public. Le support visuel 3D est tout à fait adaptable pour les documentaires ou les expositions. Nous parlions précédemment de la reconstitution du complexe palatiale d'Aix-la-Chapelle, ce dernier est actuellement visible dans l'exposition concernant l'histoire de la ville à Aix même.

Un second élément qui revient régulièrement dans les reproches faites aux méthodes de modélisation est son manque d'accessibilité. En effet, outre son format qui peut rendre la méthode contraignante à visualiser, les fichiers prennent parfois la forme d'énormes documents. Il est certain qu'un fichier brut de 30 Gigaoctet (Go) est plus difficile à utiliser qu'un fichier de quelques Megaoctets (Mo). En plus de la difficulté d'utilisation, ces formats et tailles numériques entraînent des questionnements pour leur conservation. Les fichiers peuvent être stockés sur des serveurs propres aux institutions tout en privilégiant, si nécessaire, un partage externe des résultats. Dans le cas où les modèles sont déposés sur des serveurs publics en *Open access*, il faut alors se questionner sur les problèmes de sécurité. Pour contrer ces problèmes, de plus en plus de sociétés ou d'institutions réfléchissent ou mettent en place des bases de données protégées et libres d'accès. Grâce à ce service, il est possible de consulter des travaux récents tout en les soumettant à une protection. Dans certains cas, il est même possible d'avoir un lecteur 3D directement sur la base de données. On peut citer l'exemple de 3D Warehouse

créé par Sketchup qui permet de visualiser les travaux de chacun (professionnels ou particuliers) en accès libre et protégé¹⁹⁶.

En France, il est également intéressant de citer le projet NUBES mis en place par la CNRS MAP (Centre National de Recherche Scientifique, Modèles et simulations pour l'Architecture et le Patrimoine). Ce projet avait pour objectif de mettre en place une plateforme permettant d'accueillir des formats différents et donc de faciliter l'accessibilité à leurs informations¹⁹⁷. Malheureusement, NUBES a été arrêté en 2014.

Plus récemment, l'Union européenne a lancé le projet INCEPTION permettant d'avoir accès à des nuages de points de monuments européens¹⁹⁸. Il est possible d'y visualiser des relevés sous format vidéo ou directement dans un lecteur 3D (Sketchfab)¹⁹⁹. Le projet a été lancé début 2020 et donc n'est qu'à ses débuts, cela semble prometteur.

On peut encore citer l'exemple de Visionlidar 360 mis en place par Géo-plus qui offre une plateforme de partage pour les modélisations ainsi que les nuages de points en garantissant leur sécurité²⁰⁰. Cette plateforme est plus dédiée et réfléchie pour les relevés de géomaticiens ou de topographes, mais des projets similaires peuvent être avancés pour le patrimoine.

La modélisation demande une maîtrise d'outils numériques qui se trouve en perpétuelle évolution. La 3D est une technologie qui est utile dans l'art, celle-ci intéresse les chercheurs et le public averti. Si, pour le moment, elle traîne encore quelques défauts, la technologie va continuer à se perfectionner. Il semble pertinent de continuer à s'intéresser à la méthode, à se pencher sur ses avancées ainsi que sur les éléments qu'elle peut apporter dans le patrimoine. Actuellement, la méthode a des imperfections, mais elle a également des qualités indéniables. Nous avons vu dans certains cas qu'elle s'est avérée essentielle pour l'avancée scientifique. Cependant pour savoir comment procéder et comment utiliser la méthode, nous avons mentionner qu'il était impératif de choisir le logiciel adéquat. Celui-ci doit être en lien

¹⁹⁶ <https://3dwarehouse.sketchup.com>, consulté le 15 juillet 2020.

¹⁹⁷ http://www.map.cnrs.fr/?portfolio_page=pavage-3-3-22-2-2, consulté le 15 Juillet 2020.

¹⁹⁸ <https://cordis.europa.eu/article/id/413514-3d-models-explore-our-built-cultural-heritage-through-time-onsite-and-remotely/fr>, consulté le 15 Juillet 2020.

¹⁹⁹ <https://www.inception-project.eu/en/results/3d-models>, consulté le 15 Juillet 2020.

²⁰⁰ <https://www.geo-plus.com/visionlidar365/?lang=fr>, consulté le 15 Juillet 2020.

avec le cadre du patrimoine. Pour définir le logiciel adéquat, il est nécessaire de passer par l'expérimentation. C'est dans cette logique d'expérimentation et d'avancée qu'a été pensé ce travail.

5) Application : propositions des différentes phases de constructions :

Durant le déroulé de cet écrit, chacun des points abordés a pour objectif de préparer cette expérimentation. Comme expliqué précédemment, il est important de mettre au point un cahier des charges et de clarifier les objectifs pour s'assurer d'aborder la modélisation avec la meilleure pertinence. Dans cette partie, nous allons donc aborder les objectifs attendus, le matériel utilisé, le logiciel utilisé et les résultats obtenus.

a) Préparation :

Lors de mon arrivée dans le projet de modélisation de Germigny en début 2018, un nuage de points avait déjà été réalisé en 2016²⁰¹ (fig. 62). J'avais donc pour objectif de gérer la partie modélisation. Dans le cadre de ce projet, nous rentrions dans un cas de HBIM. Le BIM ou *Building Information Modeling* (ou Bâti Immobilier Modélisé en français) est une discipline de modélisation qui vise à construire des modèles 3D de bâtiments ou de structures dans des projets d'architecture, de génie civil, etc dans le but de faciliter le processus de conception, de construction, etc. Cette définition concerne les projets actuels. Depuis peu, les chercheurs en archéologie parlent également de HBIM (*Historical Building information modeling*). A travers cette terminologie, il est question de tous les projets de modélisation visant à soutenir la reconstitution ou l'étude d'un bâti ou d'une structure ancienne²⁰².

²⁰¹ POUX, F., NEUVILLE, R., VAN WERSCH, L., NYS, G.-A., et BILLEN, R., 2017, *3D point clouds in archeology...*, dans *Geosciences*, 7 (96), Orléans, p. 9-11.

²⁰² <http://biblus.accasoftware.com/fr/quest-ce-que-cest-le-hbim-le-bim-applique-aux-batiments-existants/>, consulté le 20 Juillet 2020.



Fig. 62. Germigny-des-Prés. Nuage de points avec écart de 1cm de l'édifice retravaillé. 2016. Liège. (Retravaillé par HALLOT. P.) (source : LAMBRIGTS, R., 2019)

L'objectif défini en début de projet correspondait totalement à la définition de HBIM. Il était question de modéliser les grandes phases de construction que l'oratoire avait connu. Comme nous avons pu le démontrer précédemment on identifie trois phases principales : la phase primitive carolingienne, la phase romane et la phase actuelle. Sur base du nuage de points, des relevés réalisés en fouilles et des observations faites au cours des études du bâtiment, il semblait pertinent de réaliser trois modèles séparés. Ces modèles serviraient ensuite aux études futures sur le bâtiment fournissant ainsi un support visuellement clair. Ils pourraient également être utilisés pour réaliser une étude sur la lumière au sein de l'église. Par après, il était envisagé de potentiellement fournir les résultats à l'Office de Tourisme du Val-de-Sully (Bureau de Germigny-des-Prés) pour qu'ils puissent le présenter, par exemple, dans le cadre de visites sur le site.

En amont du travail, comme conseillé dans de nombreux travaux HBIM, il était nécessaire de définir le niveau de détails des représentations. Il paraissait utile d'entreprendre une modélisation filaire dans un premier temps. Il s'agit d'une modélisation basée sur les lignes et les points. Les modèles filaires sont donc composés de lignes, d'arcs ou de courbes qui

définissent les arêtes des objets²⁰³. Dans un second temps, si le planning le permettait, une texturation était envisagée. La texturation étant l'ajout d'une image en deux dimensions, comme la couleur d'un matériau ou une photographie, sur une surface 3D. Au début du projet, nous cherchions à atteindre un degré de précision assez élevé, il semblait pertinent de représenter chaque élément architectural constituant le bâtiment.

Une fois les objectifs établis, il était nécessaire de s'équiper d'un matériel adéquat. Le nuage de points était directement fourni par M. Hallot, il ne manquait plus qu'un ordinateur pour commencer le travail. En effet, les logiciels de modélisation sont des programmes exigeants en termes de ressources. Ils demandent une carte graphique performante pour permettre une visualisation optimale ainsi qu'un processeur assez puissant. Après différentes négociations et tentatives pour trouver un ordinateur disponible offrant les capacités nécessaires pour une modélisation, il a été choisi, pour plus de faciliter, que j'investisse dans l'achat d'un ordinateur. J'ai donc acheté un MSI Trident X plus 9se. Il est équipé d'un processeur Intel Core I7-9700k. Il a 16g de ram, un disque dur SSD de 512gb et un second disque dur HDD de 2tb. Au niveau graphisme, il est équipé d'une carte Nvidia GeForce RTX 2080. N'étant pas un spécialiste en informatique, je me suis basé sur les conseils de connaissances personnelles travaillant dans le domaine de l'informatique et sur les conseils de M. Hallot. Cet ordinateur est un modèle performant. Il n'est ni l'ordinateur le plus puissant du marché ni un modèle pensé pour réaliser des modélisations. Cependant, grâce à sa carte graphique (un modèle RTX, souvent mise en avant sur le marché) et son processeur récent, c'est un ordinateur qui ne devrait rencontrer aucun problème pour accueillir des fichiers conséquents ou pour afficher une multitude de points et des modèles 3D. Il pourrait être intéressant d'être équipé d'un écran performant sans non plus que cela ne soit une obligation dans une installation. Pour ma part, il s'agit d'un modèle AOC de 28,5 pouces. C'est un modèle récent, assez grand et assez performant pour me fournir un cadre de travail adéquat. L'entièreté de l'installation est récente (2019) et a été pensée dans le but de pouvoir modéliser avec facilité.

²⁰³ <https://knowledge.autodesk.com/fr/support/autocad/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/FRA/AutoCAD-Core/files/GUID-84E193D7-A18D-4EE2-B978-19E4AFBCAEEC-htm.html>, consulté le 7 août 2020.

Une fois le matériel acquis, il était nécessaire d'également choisir le logiciel qui sera utilisé. Ce travail offrant l'opportunité d'expérimenter des nouveaux logiciels, M. Hallot conseilla l'utilisation d'un logiciel peu connu dans le domaine du HBIM : MicroStation 3D (V 10.13.0.48). Il est développé par Bentley Systems, une compagnie américaine de CAO (Conception Assisté par Ordinateur). Microstation 3D est avant tout un logiciel de BIM créé pour les projets d'architectures. Il offre l'opportunité de travailler à la fois en 2D et en 3D, un peu comme les produits d'Autodesk. N'étant pas pensé pour le HBIM, une tentative de production avec Microstation semblait être une opportunité d'expérimenter son intérêt dans la recherche archéologique. Ce logiciel propose des caractéristiques intéressantes comme la personnalisation de l'interface ou la possibilité d'intégrer n'importe quel format de fichier (celui-ci étant ensuite modifié dans le format propre au logiciel). Il permet également l'intégration de nuage de points (ce qui est primordial dans notre cas) ainsi que l'utilisation de différents outils pour créer des surfaces ou des solides 3D.²⁰⁴

D'un point de vue financier, MicroStation est un logiciel payant fonctionnant avec un système d'abonnement. Grâce à l'Université de Liège, par le biais de M. Hallot, j'ai pu avoir accès au logiciel facilement.

Sur base des conseils de M. Halet, gérant de BeCad²⁰⁵, une société spécialisée dans les formations sur les logiciels de Bentley, il a aussi été décidé d'ajouter l'extension Descartes à la version de MicroStation utilisée. Descartes est un logiciel qui permet une meilleure intégration du nuage de points dans MicroStation ainsi qu'une meilleure manipulation et une meilleure combinaison avec d'autres matériels comme les solides utilisés dans les projets BIM²⁰⁶.

Pour cette expérimentation, le nuage de points utilisé a été réalisé par F. Poux, R. et A. Luczfalvy Jancsó en 2016. Pour le relevé, ils ont utilisé un laser scan Leica P30. Il s'agit d'un scanner très performant capable d'une capture de 1 000 000 de points/ sec avec une portée de 270m et qui fournit des images HDR de bonnes qualités²⁰⁷. Une fois la capture réalisée, les

²⁰⁴ <https://www.bentley.com/fr/products/product-line/modeling-and-visualization-software/microstation>, consulté le 22 Juillet 2020.

²⁰⁵ <https://www.becad.net>, consulté le 22 Juillet 2020.

²⁰⁶ <https://www.bentley.com/fr/products/product-line/reality-modeling-software/bentley-descartes>, consulté le 22 Juillet 2020.

²⁰⁷ <https://leica-geosystems.com/fr-fr/products/laser-scanners/scanners/leica-scanstation-p40--p30>, consulté le 22 Juillet 2020.

nuages obtenus ont été retravaillés avec Leica Cyclone²⁰⁸ et Point Tools de chez Bentley²⁰⁹. Ces deux logiciels offrent les outils nécessaires pour éditer des nuages de points.

Après avoir été retravaillé, le nuage a été fourni sous deux formats : un nuage avec un espacement de 10cm entre chaque point et un nuage avec un espacement de 1cm entre chaque point. Le nuage brut de 1cm (fig. 62.) comprend 316 570 143 points pour une taille de 3,4gb (format .POD).

L'ensemble de l'installation a été mis en place courant novembre 2019. Une fois le programme installé, le nuage de points transmis, le travail de modélisation a pu commencer. Il semblait pertinent de démarrer l'expérimentation à partir du nuage de points et donc de l'état moderne pour ensuite entreprendre les modélisations des phases antérieures qui, elles, sont basées, en partie du moins, sur des interprétations archéologiques.

Il est nécessaire de préciser que mon expérience dans le domaine est basique. J'ai eu l'opportunité d'apprendre des bases sur la technologie tridimensionnelle durant le cours de M. Hallot en 2018-2019. Dans celui-ci, j'ai pu expérimenter la méthode 3D avec Blender. Avant cela, en 2018, lors d'un projet de cours à l'Université de Namur chapeauté par M. Lefftz, je m'étais également essayé à la méthode lors de la création d'un musée virtuel. On peut également mentionner ma participation au cours de M. Billen (donné par Mme Luczfalvy Jancsó) sur l'introduction des CAD et de l'infographie en archéologie. Ce cours concernait les applications 2D à l'aide d'Autocad (licence Autodesk) mais il s'agit également d'une expérience avec les logiciels de DAO.

Pour résumer mon expérience, je dirais que j'ai eu une introduction à la technologie et que celle-ci m'intéresse. Ce travail permet donc d'expérimenter si un néophyte (n'ayant suivi aucune réelle formation dans le domaine) en modélisation, mais ayant un regard critique, peu produire des modèles de qualité avec un programme de BIM professionnel.

²⁰⁸ <https://leica-geosystems.com/fr-fr/products/laser-scanners/software/leica-cyclone>, consulté le 22 Juillet 2020

²⁰⁹ <https://www.bentley.com/fr/products/brands/pointools>, consulté le 22 Juillet 2020.

b) Application :

La première étape est l'intégration du nuage de points. MicroStation accepte normalement toutes formes de fichier et les transforme dans un format propre à son fonctionnement, le .POD. Notre fichier de base était en .E57. Cette intégration n'a pas été simple. Pour une raison inconnue, le fichier a été difficile à intégrer dans MicroStation 3D. Après de multiples tentatives et l'aide de M. Halet, le fichier a finalement pu être inséré normalement. Une fois l'intégration finie, un problème d'accrochage est survenu. En effet, le nuage de points n'acceptait par l'accrochage d'éléments sur ses points. A nouveau grâce à la connaissance du logiciel de M. Hallet, l'option a pu être débloquée rapidement.

Après rectification, il semblait nécessaire de retravailler à nouveau le nuage. Malgré le travail de M. Hallot, le nuage contenait des points inutiles venant de l'herbe, du sol ou des ramures des arbres avoisinants le bâtiment. Ces éléments n'étant pas utiles et pouvant gêner la saisie des points, il fallait les enlever. De plus, Le nuage exporté s'avère également trop dense pour que le logiciel soit fluide et lisible facilement. Donc après l'intégration du nuage, il a dû être retravaillé et divisé.

Pour cela, MicroStation, grâce à l'extension Descartes, propose une option de reclassification des points. Le nuage de points de base est compris dans une seule classe. Les points peuvent être sélectionnés dans différents groupes pour ensuite être exportés dans une nouvelle classe (fig.63). Il est, par exemple, possible de mettre tous les points inutiles dans une classe « inutile ». Sur base de cette option, le nuage de base a été divisé en deux nuages moins conséquents : un nuage comprenant la nef et un second comprenant le sanctuaire. Avec cette division, la taille du nuage est divisée par deux et sa lisibilité est augmentée. Ensuite, le nuage désiré est exporté sur un nouveau document pour permettre de travailler directement dessus. Dans ce cas-ci, il a été décidé de commencer par le nuage de la nef. Il s'agissait d'une partie plus simple du bâtiment et étant en train de découvrir le logiciel, il semblait préférable de l'appréhender à partir d'éléments simples.

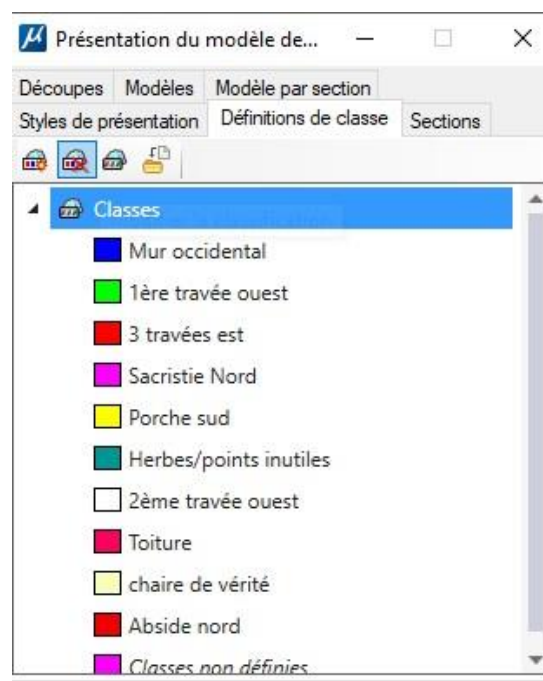


Fig. 63. Exemple de classification de points. 2019.
(Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)

Une fois le nuage « Nef » exporté, le nuage restait encore conséquent par sa taille et difficile à travailler. Une nouvelle classification a donc été réitérée pour séparer la nef en différentes parties. Il a été choisi de la séparer en sept parties : « Mur occidental », « première travée ouest », « seconde travée ouest », « 3 dernières travées est », « porche sud », « sacristie nord » et « herbes/ points inutiles » (fig. 63). Grâce à l'extension Descartes, le logiciel permet d'afficher ou non certaines classes. Je peux donc décider d'afficher uniquement le « mur occidental ». Si l'on couple cette option à la possibilité, comme dans la majorité des programmes, de créer différents niveaux de travail, cela permet d'avoir des niveaux qui comprennent uniquement les solides produits sur base d'une seule partie du nuage de points. Dans un but de clarté et de facilité, chaque niveau a donc été lié à une classe. L'ensemble rend facile l'affichage de l'entièreté du projet ou de certaines parties uniquement.

J'ai décidé d'entreprendre la modélisation d'ouest en est et j'ai donc commencé avec le mur occidental. Le seul logiciel de modélisation 3D que j'avais pu expérimenter, Blender, fonctionnait sur le principe de la construction d'un solide autour du nuage généré par le logiciel qu'il était ensuite possible de modeler pour qu'il corresponde aux différents points. J'ai donc voulu démarrer de la même manière. J'ai construit un solide rectangulaire à partir du sol au niveau du mur-clocher. Pour construire un solide dans le logiciel, il suffit de sélectionner l'outil « solide » (il y a différentes options de solides permettant de choisir au mieux par rapport à l'objectif attendu). Une fois l'outil sélectionné, il faut tracer une surface plane qui peut être ensuite extrudée (« agrandie » pour devenir un solide)²¹⁰. Il est possible d'accrocher les angles de la surface aux points du nuage correspondants aux coins du bâtiment. Mais, Microstation permet également d'accrocher des points dans « le vide ». Cela permet d'être précis pour les bâtiments ou les objets ciblés dans le cas où les points sont disponibles mais également dans le cas où il y a un manque ou une anomalie due à la capture laser et que la position du point est hypothétique. Par exemple, les points peuvent être absents dans les zones difficiles d'accès comme le toit.

Une fois le solide comprenant l'entièreté de la façade tracé, j'ai voulu le modifier pour qu'il corresponde aux irrégularités de la façade. Je me suis alors rendu compte qu'il n'était possible de modifier que les coins du solide et non ses arêtes. Comprenant que réaliser

²¹⁰ Pour cela, un point doit être saisi sur la surface visée, cela peut être le centre ou encore un coin. Il est ensuite possible d'extruder cette surface et de préciser, grâce au point sélectionné, jusque où le solide doit s'étendre.

l'entièreté d'une façade sur base d'un seul solide modulable n'était pas l'option qui convenait dans ce logiciel. Il a donc été décidé de tracer chaque élément un à un. Le logiciel offre tout aussi bien la possibilité de tracer uniquement des surfaces. Dans un souci de précision concernant l'angle des murs, il semblait plus pertinent de préférer l'option des surfaces plutôt que des solides. La modélisation par les solides aurait de plus été plus contraignante lorsqu'il aurait fallu percer des baies²¹¹. Pour réaliser la façade occidentale, je me suis d'abord concentré sur les contreforts, puis les murs et ensuite les baies et la toiture. Durant la réalisation de cette partie j'ai utilisé plusieurs outils. Dans un soucis de compréhension, j'ai décidé de les représenter sous forme d'un « guide d'utilisation ».

Pour tracer :

a) Une surface comprenant uniquement des cotés droits (paroi verticale ou oblique) :

- 1) sélectionner l'outil « surface par coin ».
- 2) sélectionner le premier coin de la surface.
- 3) sélectionner le deuxième coin et ainsi de suite. Attention à ne pas sélectionner des points sur un plan différent de la surface visée.

Remarque : il est nécessaire d'avoir quatre coins pour que le logiciel considère la surface comme tracée. Dans le cas d'un triangle, il faut soit passer par un outil différent, soit sélectionner deux fois le même coin.

b) Un arc :

- 1) sélectionner l'outil « interpolation des arcs ».
- 2) sélectionner l'une des extrémités de l'arc.
- 3) sélectionner le sommet de l'arc.
- 4) sélectionner l'autre extrémité de l'arc.
- 5) sélectionner l'outil « extruder ».
- 6) sélectionner l'arc et extruder comme désiré.

²¹¹ Une option existe dans le logiciel pour percer les solides mais je ne l'ai pas expérimenté.

Remarque : attention aux différents plans. Une fois l'arc placé, si la courbure doit être modifiée, il est nécessaire de recommencer depuis le début.

c) Un oculus :

- 1) sélectionner l'outil « interpolation par arcs ». Nb : quand la courbe n'est pas trop raide, il est possible d'utiliser l'outil « conique » qui peut s'avérer plus pratique dans certaines situations.
- 2) sélectionner un point au milieu du cercle formant l'oculus.
- 3) sélectionner le sommet de la moitié du cercle formant l'oculus.
- 4) sélectionner le point opposé au premier, représentant l'extrémité de l'arc.
- 5) réitérer les étapes 2, 3 et 4 pour former la seconde moitié du cercle.
- 6) sélectionner l'outil « extruder ».
- 7) sélectionner l'un des deux arcs tracés et l'extruder autant que désiré.
- 8) réitérer l'étape 7 pour la seconde moitié du cercle.

d) Une surface comprenant un côté courbe

- 1) sélectionner l'outil « surface par coin ».
- 2) sélectionner l'une des extrémités de l'arc.
- 3) sélectionner un autre point.
- 4) répéter plusieurs fois l'action jusqu'à réussir à former un espace vide triangulaire dont l'un des côtés est l'arc de l'étape 2.
- 5) sélectionner l'outil « surface par arêtes ».
- 6) sélectionner dans l'ordre suivant, dans le sens horloger, l'arc, ensuite le premier côté et le dernier côté.

Avec les outils développés ci-dessus, il est possible de modéliser l'ensemble des éléments constituant la façade occidentale (fig. 64). Débutant avec le logiciel, l'ensemble de la construction de cette partie a pris 50h. Il est fort probable qu'un géomaticien ou une personne formée sur le logiciel aurait pris bien moins de temps. Il serait intéressant de comparer cela avec le travail de professionnel.

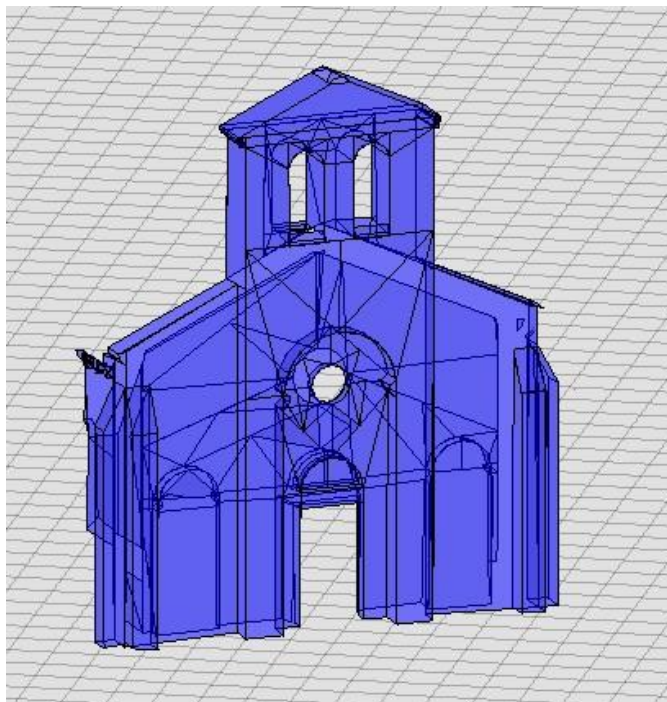


Fig. 64. Germigny-des-Prés. Reconstitution 3D de la façade occidentale de l'oratoire. Vue extérieure de face. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGHTS, R., 2019)

Une fois la façade terminée, la modélisation a continué avec la nef. Les mêmes outils ont été utilisés pour construire cet élément. Lors de l'élaboration de cette partie, pour être dans les temps, il a été décidé de modifier les objectifs de modélisation. L'objectif étant de fournir trois modèles filaires comprenant les lignes structurelles du bâtiment, il a été décidé de négliger la représentation d'éléments « secondaires » pour se concentrer avant tout sur l'objectif du projet : la structure du bâtiment. Dès le début du projet, les détails du décor constituaient un complément à l'objectif premier. Cette adaptation signifie que des éléments comme les corbeaux de la nef ne seront pas modélisés. Avant cette modification, une partie des corbeaux avaient été modélisée (fig. 65). Pour être plus efficace, ceux-ci ont été tracés grâce à l'outil « copier-coller ». Malgré ce gain de temps, il était récurrent de devoir modifier les corbeaux pour qu'ils s'intègrent correctement au modèle.

Excepté dans la première travée ouest, la modélisation se focalisera sur le rendu des murs, des baies et de la toiture. Pour faciliter la modélisation, cette dernière sera modélisée en dernier.

Lors de la construction de la nef, je me suis heurté à un problème. En effet, dans cette partie du bâtiment, les murs sont percés de baies à pénétration. Je n'ai eu aucune difficulté à représenter la baie sauf pour l'intrados. Pourtant, la représentation de ces baies est importante

pour le rendu final du modèle. Dans le cas où le modèle serait utilisé pour analyser les effets de la lumière à l'intérieur du bâtiment, une baie classique ou une baie à pénétration n'entraîne pas le même comportement pour la lumière. Pour éviter de perdre trop de temps sur cet élément, j'ai décidé de le mettre de côté pour continuer la modélisation des grandes parties structurelles du bâtiment. Nous reviendrons sur les baies à pénétration plus loin dans la modélisation.

A la suite de la construction de la nef (fig. 66), j'ai décidé de réaliser le porche sud. Pour la construction de celui-ci, à nouveau, les mêmes outils présentés précédemment furent nécessaires (fig. 67 et 68).

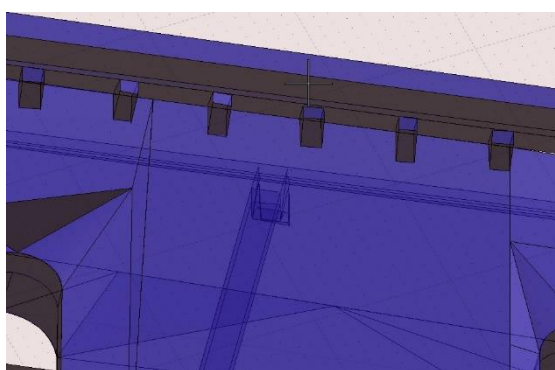


Fig. 65. Germigny-des-Prés. Détails des reconstitutions 3D des corbeaux du mur sud de l'oratoire. Vue extérieure depuis le sol. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)

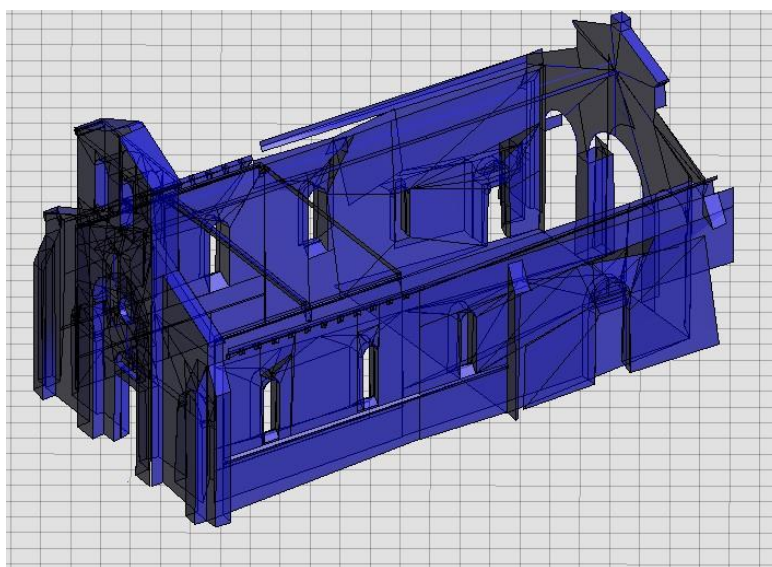


Fig. 66. Germigny-des-Prés. Reconstitutions 3D de la nef et de la façade occidentale de l'oratoire. Vue extérieure oblique depuis le sud-ouest. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)

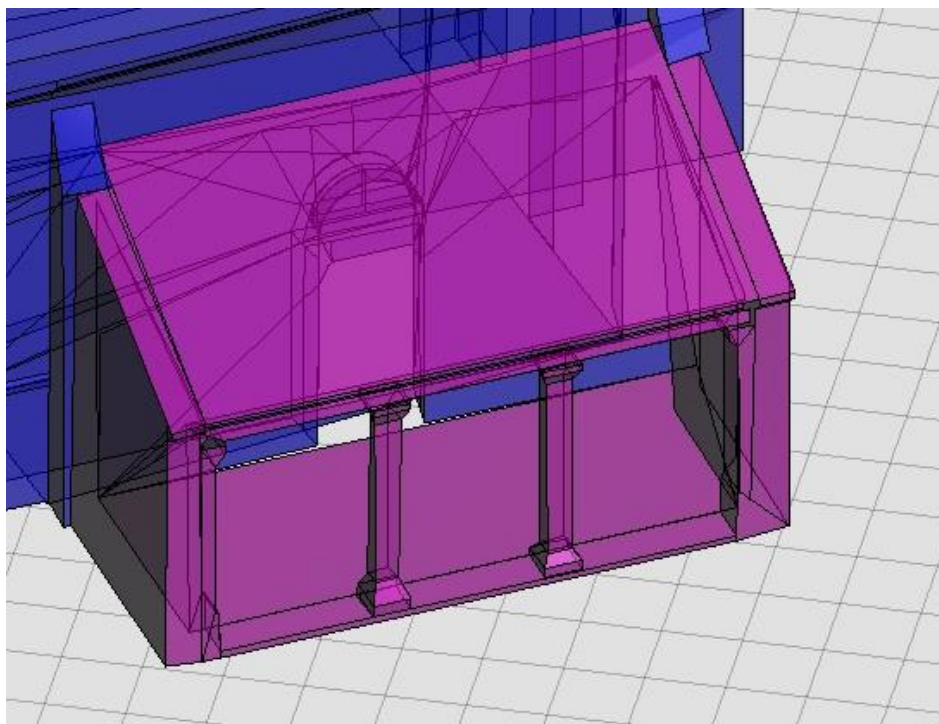


Fig. 67. Germigny-des-Prés. Reconstitutions 3D du porche sud de l'oratoire. Vue extérieure oblique depuis le sud-ouest. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)

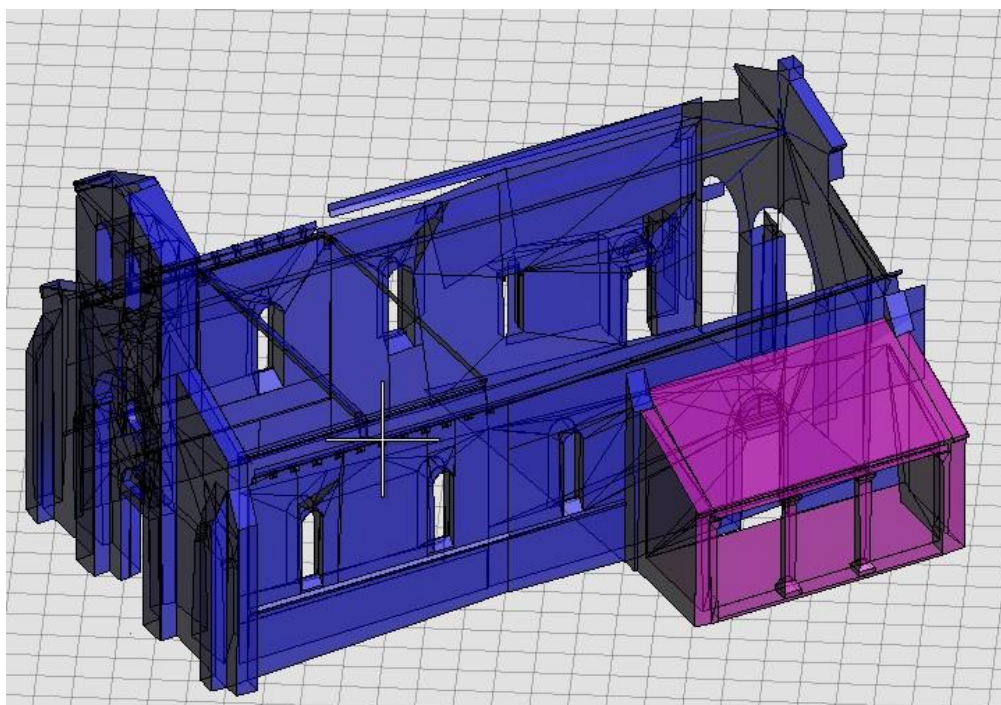


Fig. 68. Germigny-des-Prés. Reconstitutions 3D de la nef, de la façade occidentale et du porche sud de l'oratoire. Vue extérieure oblique depuis le sud-ouest. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)

Après le porche, la construction de la sacristie au nord a été entreprise. Dans cette partie du nuage de points, il était nécessaire d'à nouveau éliminer une partie des points. En effet, il semble que lors de la capture, la pièce étaient remplies de mobilier et d'autres accessoires nécessaires à l'entretien de l'édifice (fig. 69). Le nuage de points obtenu est donc chargé. En raison de cet encombrement, la sacristie a été simplifiée dans sa structure et certains éléments n'ont pas pu être modélisés (fig. 70). Néanmoins, l'objectif étant de représenter les grandes lignes structurelles du bâtiment, cette simplification n'est pas gênante. De plus, la chaire de vérité n'a pas été représenté ne faisant pas partie de la structure du bâtiment (fig. 71). Avec l'ajout de l'outil « cylindre » aux fonctionnalités utilisées, les baies ont pu être réalisées (fig. 72) et la sacristie a pu être finalisée (fig. 73 et 74).

e) Tracer une colonne :

- 1) sélectionner l'outil « Surface cylindrique ».
- 2) sélectionner le centre du cylindre ainsi que son diamètre. Nb : Il est plus simple de sélectionner le centre d'une surface plane préalablement tracée.
- 3) sélectionner l'axe et la hauteur du cylindre.
- 4) modifier la position, le diamètre et la hauteur du cylindre comme désiré. Nb : Il semble plus facile de tracer la colonne grossièrement dans un premier temps et de la modifier ensuite.

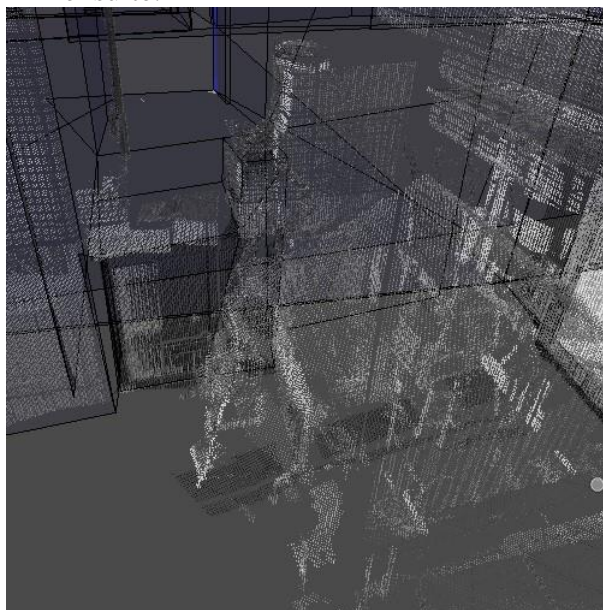


Fig. 69. Germigny-des-Prés. Encombrement de la sacristie présent dans le nuage de points. Vue intérieure depuis le nord. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)

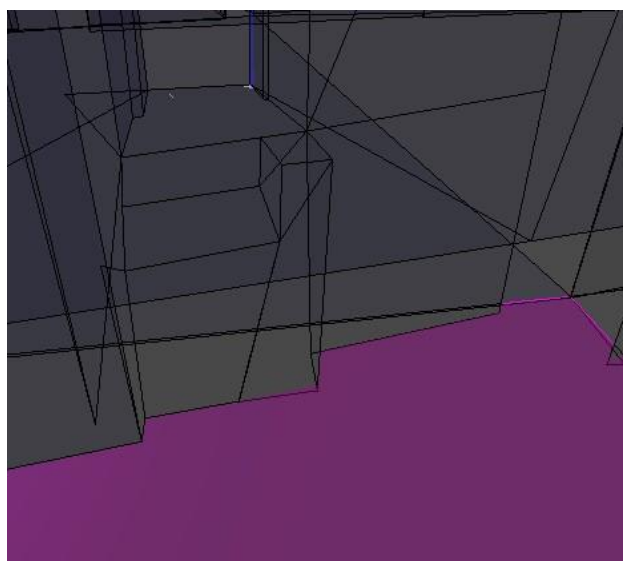


Fig. 70. Germigny-des-Prés. Reconstitutions 3D simplifiées de l'accès à la chaire de vérité depuis la sacristie. Vue intérieure depuis le nord. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)

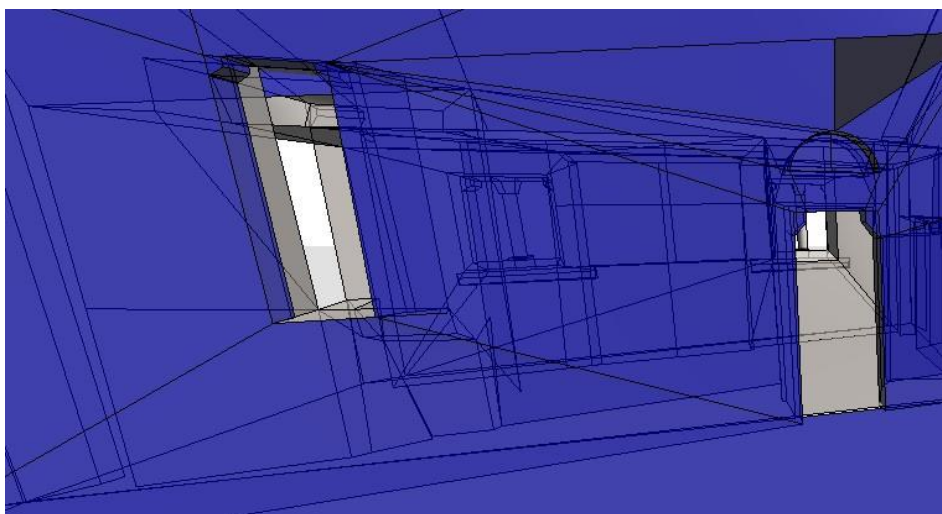


Fig. 71. Germigny-des-Prés. Reconstitutions 3D du mur nord de la nef au niveau de la sacristie avec l'accès à la pièce (à droite) et l'accès à la chaire de vérité (à gauche). Vue intérieure depuis le sud. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)

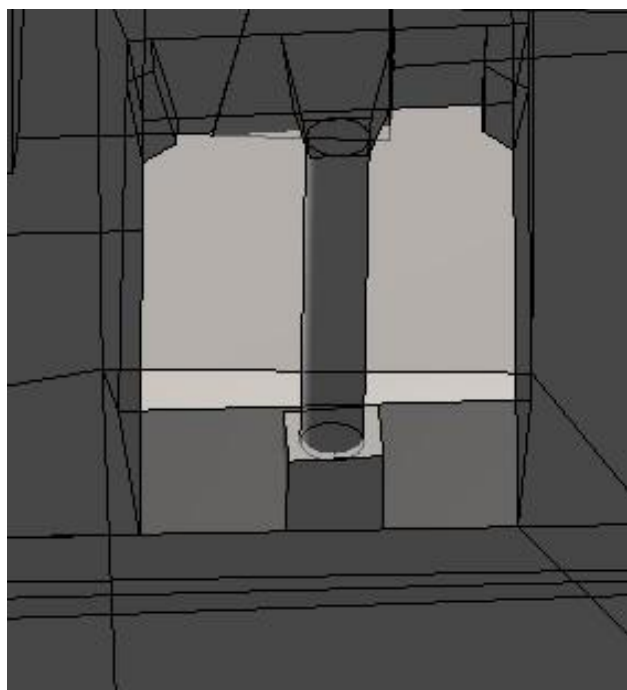


Fig. 72. Germigny-des-Prés. Reconstitutions 3D de la baie ouest de la sacristie. Vue extérieure oblique depuis le nord. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)

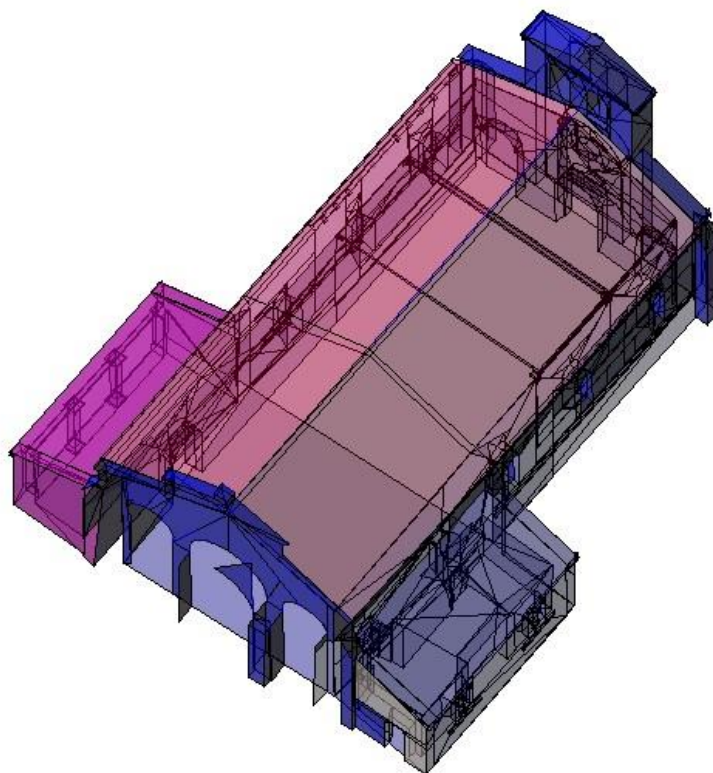


Fig. 73. Germigny-des-Prés. Reconstitutions 3D de la nef, de la façade occidentale, du porche sud et de la sacristie de l'oratoire. Vue extérieure zénithale depuis le nord-est. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)

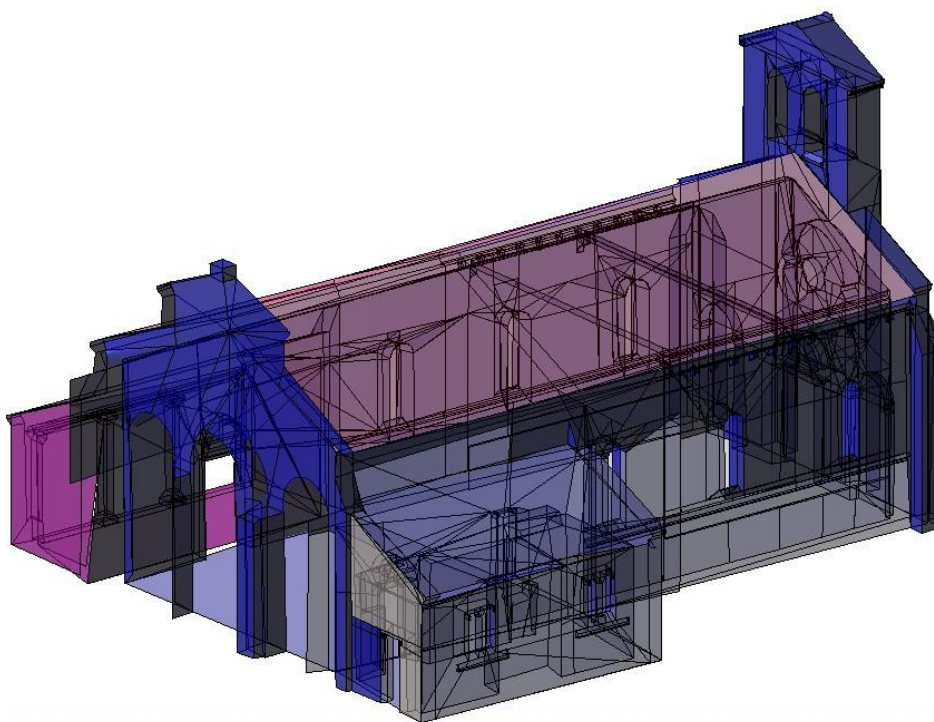


Fig. 74. Germigny-des-Prés. Reconstitutions 3D de la nef, de la façade occidentale, du porche sud et de la sacristie de l'oratoire. Vue extérieure oblique depuis le nord-est. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)

Durant la réalisation de la sacristie, il a été décidé de se concentrer avant tout sur la réalisation d'un modèle à partir du relevé 3D. La modélisation des trois états de construction séparément semblait être intéressante mais aurait demandé beaucoup plus de temps. Pour avoir un modèle exploitable, il a donc été décidé de ne produire qu'un seul modèle basé sur l'état actuel. Néanmoins, il paraissait essentiel de pouvoir fournir un support visuel capable d'exposer les différentes phases de construction. En conséquence, il a été déterminé que les phases carolingiennes, romanes et récentes seraient mises en avant par un code couleur.

Le sanctuaire étant une zone plus complexe comprenant des structures arrondies et des voûtes, le choix de le commencer après avoir pris ses marques sur le logiciel était pertinent. Si la modélisation avait été débutée par cette partie, avec ma méconnaissance du logiciel, cela aurait été long et complexe.

La première étape a été d'ajouter la seconde partie du nuage de points. Jusque maintenant, la modélisation était réalisée sur la première moitié du nuage. Pour cela, Descartes permet une option d'ajout de nuage de points très facile. Il est important de faire attention à ajouter le nuage sur un niveau à part pour éviter des conflits d'affichage.

Pour cette partie, il a été décidé de réaliser les trois absides en premier puis d'évoluer vers le centre et la tour. Contrairement à la nef, le nuage n'a pas été divisé en classe. Pour une raison inconnue, il était impossible de sélectionner des points pour diviser le nuage. Cependant, en diminuant la densité du nuage de points et en utilisant les changements de vues proposées par le logiciel²¹², la modélisation a pu être réalisée sans problème.

J'ai tout d'abord commencé par modéliser l'abside septentrionale (fig. 75), ensuite l'abside méridionale (fig. 76) et j'ai terminé par l'abside orientale (fig. 77). Par faciliter, j'ai commencé par concevoir les murs extérieurs. Les absides septentrionale et méridionale étant percées d'une baie à pénétration au centre de l'abside, il est préférable de commencer par réaliser ces baies avant de construire les murs en tant que tels. A l'aide des outils précédemment présentés, j'ai pu réaliser l'ouverture. Durant la construction de la nef, aucune option n'avait été trouvée pour former les voûtes à pénétration. Mais avec la réalisation des absides, une méthode a pu être mise au point. Pour ceci, j'ai utilisé l'option « surface par arêtes ».

²¹² Le logiciel permet différentes vues telles que des vues latérales, zénithales ou isométriques mais également, il est possible de saisir un point de placement pour une « caméra » et de définir son sens. En résumé, il est possible de complètement définir sa vue.

f) Tracer une voûte à pénétration :

- 1) tracer à l'aide de l'outil « surface par coin » les piédroits.
- 2) tracer à l'aide de l'outil « interpolation par arcs » 3 arcs : l'extrémité extérieure de la voûte, l'extrémité intérieure de l'arc et le centre de la voûte.
- 3) sélectionner l'outil « surface par arêtes ».
- 4) sélectionner l'arc extérieur.
- 5) sélectionner l'arc central.
- 6) la première moitié de l'arc est alors calculée et tracée.
- 7) réitérer les étapes 3, 4 et 5 en sélectionnant l'arc central et l'arc intérieur. Nb : selon les situations, le logiciel n'arrivera pas à sélectionner à nouveau l'arc central considérant qu'il fait partie intégrante de la voûte précédemment tracée. Pour faciliter la sélection, il semble préférable de tracer à nouveau l'arc central (à l'aide de l'outil « interpolation par arcs ») en suivant le tracé de la première voûte tracée.

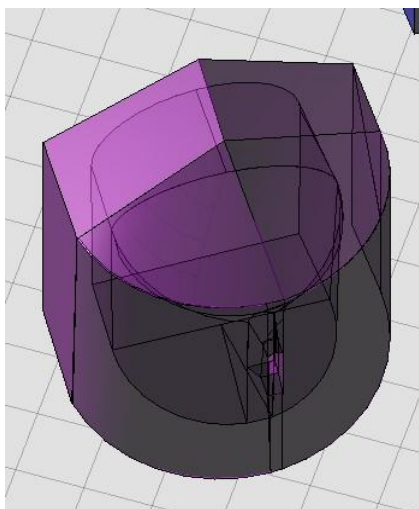


Fig. 75. Germigny-des-Prés. Reconstitution 3D de l'abside septentrionale. Vue extérieure depuis le nord-est. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)

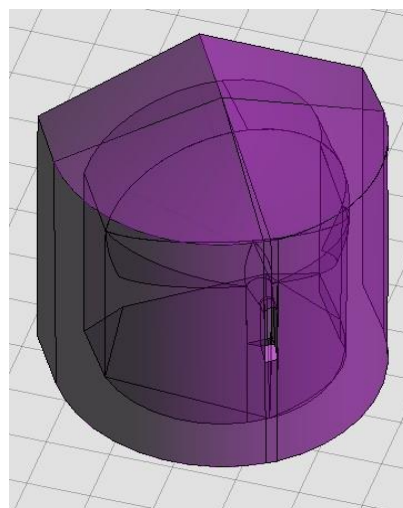


Fig. 76. Germigny-des-Prés. Reconstitution 3D de l'abside méridionale. Vue extérieure depuis le sud-ouest. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)

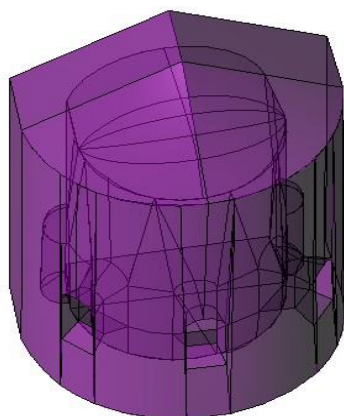


Fig. 77. Germigny-des-Prés. Reconstitution 3D de l'abside orientale. Vue extérieure depuis l'est. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)

Une fois les baies représentées, les murs peuvent être modélisés. Etant en demi-cercle, il est préférable de procéder différemment qu'avec les murs droits.

g) Tracer une abside (méthode appliquée pour les absides nord et sud) :

- 1) tracer à l'aide de l'outil « droite » le prolongement des piédroits de la baie à pénétration depuis la baie jusqu'au sol.
- 2) réitérer la première étape pour le second piédroit.
- 3) tracer un arc à l'aide de l'outil « interpolation par arcs » entre l'extrémité inférieure de la droite de l'étape 1 et l'extrémité inférieure du mur droit de l'abside. Nb : Les murs de l'abside démarrant du sanctuaire ne sont pas directement arrondis, il est préférable de tracer ces premiers mètres en tant que mur droit à l'aide de l'outil « surface par coins ».
- 4) réitérer l'étape 1, 2 et 3 pour la partie supérieure du mur (au-dessus de la baie).
- 5) sélectionner l'outil « surface par arêtes ».
- 6) sélectionner l'arc inférieur (tracé durant l'étape 3).
- 7) sélectionner l'arc supérieur (tracé durant l'étape 4).
- 8) réitérer toutes les étapes précédentes pour l'autre moitié de l'abside. En-dessous et au-dessus de la baie, il reste normalement des zones non tracées. Celles-ci sont tracées à partir de l'étape 9.
- 9) tracer un arc à l'aide de l'outil « interpolation par arcs » entre les droites tracées durant l'étape 1.
- 10) repasser à l'aide de l'outil « droite » sur le meneau de la baie.
- 11) sélectionner l'outil « surface par arêtes ».
- 12) sélectionner l'arc tracé durant l'étape 9.
- 13) sélectionner la droite tracée durant l'étape 10.
- 14) réitérer les étapes 9-13 pour l'espace au-dessus de la baie. Nb : la baie étant surmontée d'un arc, pour l'étape 10, il faut utiliser l'outil « interpolation par arcs » à la place de l'outil « droite ».

L'ensemble de ces étapes permet de tracer le mur extérieur de l'abside tout en comprenant la baie. Le même procédé est utilisé pour tracer le mur intérieur de l'abside. Etant donné que l'abside est couverte d'une voûte en cul de four, il est nécessaire de respecter l'élévation du mur. Dans le cas contraire la voûte ne pourra pas être tracée correctement.

Concernant la voûte en cul de four, à ma connaissance, aucun outil n'est dédié précisément à cet élément architectural. J'ai longuement essayé de tracer la voûte à l'aide de différents outils mais je n'ai pas réussi à déterminer un procédé type comme pour les éléments précédents. Pour les voûtes des absides nord et sud, une première méthode a pu être utilisée (fig. 78). Pour la voûte de l'abside orientale, une autre méthode a dû être mise au point (fig. 79).

h) Tracer une voûte en cul-de-four (méthode appliquée pour l'abside nord et sud (fig. 78) :

- 1) tracer un arc à l'aide de l'outil « interpolation des arcs » entre le coin supérieur des murs faisant la jonction entre l'abside et le sanctuaire (cfr étape 3 du point g) en passant par le sommet de l'arc.
- 2) tracer un arc à l'aide de l'outil « interpolation des arcs » pour former l'arc qui sépare le sanctuaire de l'abside.
- 3) sélectionner l'outil « surface par arêtes ».
- 4) sélectionner l'arc tracé dans l'étape 1.
- 5) sélectionner l'arc tracé dans l'étape 2. Le logiciel crée alors une voûte en plein cintre permettant de délimiter la voûte en cul-de-four.
- 6) tracer un arc à l'aide de l'outil « interpolation des arcs » sur base du contour intérieur (côté abside et non coté sanctuaire) de la voûte modéliser à l'étape 5.
- 7) tracer un arc à l'aide de l'outil « interpolation des arcs » qui suit les parties hautes des murs modéliser dans le point g. 14.
- 8) sélectionner l'outil « surface par profils de sommets ».
- 9) sélectionner l'arc supérieur.
- 10) sélectionner l'arc inférieur (qui suit le tracé des murs de l'abside). Le logiciel calcule alors une surface en cul-de-four.

Pour une raison inconnue, cette méthode n'a pas fonctionné avec la voûte occidentale. L'abside occidentale a demandé un travail plus long et plus minutieux simplement en raison de son nombre de baies. Pour les murs extérieurs et intérieurs, les étapes décrites dans les points *f* et *g* sont les mêmes, elles ont simplement été multipliées par trois (étant le nombre de baies sur l'abside orientale).

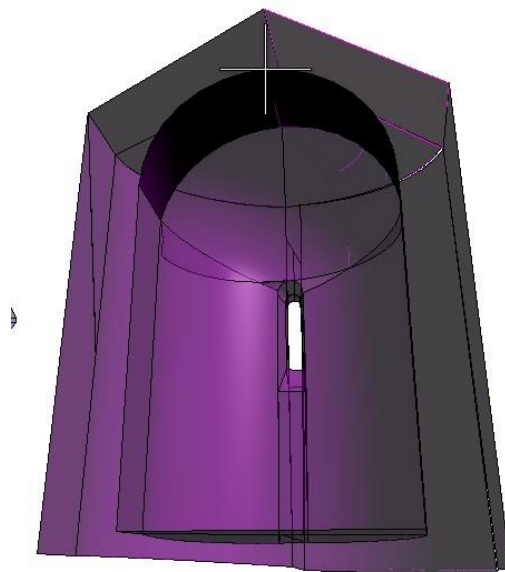


Fig. 78. Germigny-des-Prés. Reconstitution 3D de l'abside septentrionale. Détails de la voûte en cul-de-four. Vue intérieure depuis le sud. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)

Concernant la voûte, l'outil « surface par profils de sommets » n'a pas réussi à calculer correctement sa forme. Il a alors été décidé d'aborder la création de la voûte orientale par étape.

i) Tracer une voûte en cul-de-four (méthode appliquée pour l'abside occidentale (fig. 79)).

- 1) réitérer les étapes 1-7 du point *h*.
- 2) à l'aide de l'outil « interpolation des arcs » tracer un arc démarré de l'extrémité de la voûte en berceau séparant l'abside et le sanctuaire (cfr étape 1 point *h*) jusqu'à l'extrémité opposée passant par le sommet de la voûte. Le résultat donne un arc oblique qui suit la courbe de la voûte.
- 3) sélectionner l'outil « surface par arêtes ».
- 4) sélectionner l'arc intérieur (coté abside) de la voûte en berceau séparant l'abside et le sanctuaire. Nb : le logiciel empêche parfois la saisie de cet arc, pour éviter le problème, il est préférable de retracer un arc (à l'aide de l'outil « interpolation des arcs ») en suivant le tracé de la voûte.
- 5) sélectionner l'arc modélisé durant l'étape 2. Le logiciel calcule alors une surface correspondant à une partie de la voûte.

- 6) En répétant à nouveaux ces étapes mais en modifiant le tracé de l'arc mentionné dans l'étape 2 (en conservant les mêmes extrémités mais en traçant un sommet différent) il est possible de fournir par étape la surface de la voûte.

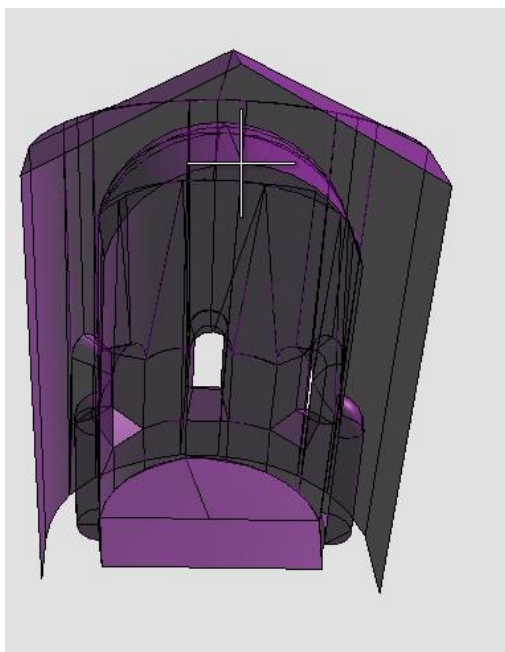


Fig. 79. Germigny-des-Prés. Reconstitution 3D de l'abside orientale. Détail de la voûte en cul-de-four. Vue intérieure oblique depuis l'ouest. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)

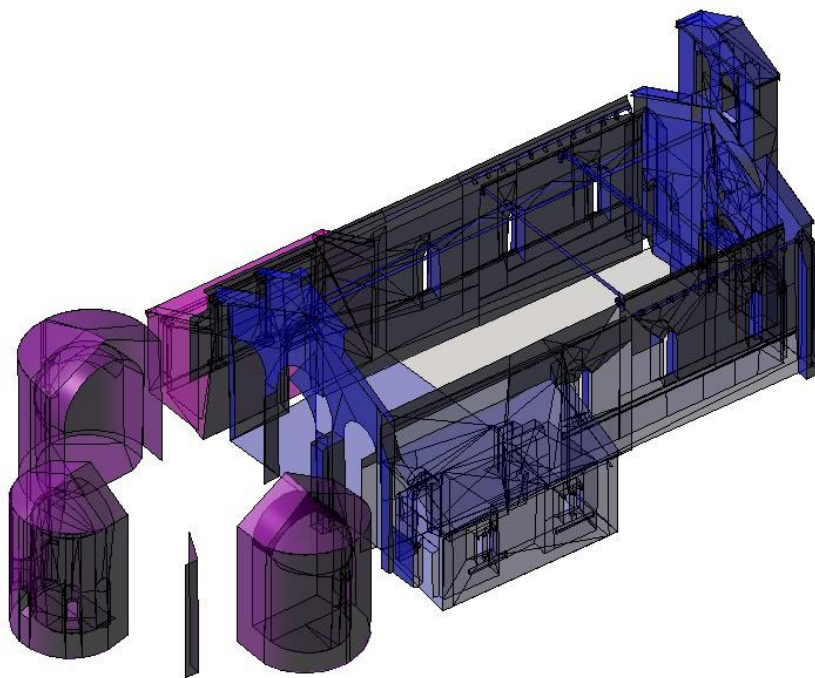


Fig. 80. Germigny-des-Prés. Reconstitutions 3D de la nef, de la façade occidentale, du porche sud, de la sacristie et des absides de l'oratoire. Vue extérieure oblique depuis le nord-est. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)

Une fois les trois absides modélisées (fig. 80), j'ai continué à représenter les murs extérieurs et intérieurs à l'aide des outils utilisés jusqu'ici. Dans un souci de facilité de lecture, j'ai avancé de l'extérieur vers l'intérieur. En accord avec l'objectif visé, les structures sont simplifiées. Je n'ai donc pas tracé les chapiteaux tels qu'ils sont *In situ*.

Dans le reste des représentations du sanctuaire, nous retrouvons aussi bien des arcs que des murs à tracer, le seul élément qui s'ajoute dans l'inventaire des structures représentées, ce sont les coupoles à pendentifs (fig. 81). On en rencontre quatre petites aux angles du sanctuaire et une plus conséquente au sommet de la tour.

j) Tracer une coupole à pendentifs (fig. 81) :

- 1) avec les outils précédemment utilisés, tracer les 4 arcs qui bordent la coupole.
- 2) à l'aide de l'outil « interpolation des arcs », tracer un arc coupant en deux la coupole.
- 3) réitérer l'étape 2 pour couper la coupole en quatre parties, les deux arcs se croisant au centre de la coupole.
- 4) avec l'outil « interpolation des arcs », retracer les arcs modélisés durant l'étape 1.
- 5) avec l'outil « interpolation des arcs », retracer les arcs modélisés durant l'étape 2 et 3 mais de manière à diviser l'arc en deux (tracer l'arc de la base du pendentif jusqu'au centre de la coupole).
- 6) sélectionner l'outil « surface par profils » de sommets ».
- 7) sélectionner un arc tracé durant l'étape 5.
- 8) sélectionner un second arc tracé durant l'étape 5. Le logiciel forme alors $\frac{1}{4}$ de la coupole.
- 9) Réitérer l'étape 6-8 pour compléter la coupole.

Durant la modélisation du sanctuaire, il n'a pas été possible de tracer les arcatures de la tour ainsi que les baies qui percent la tour. Ces parties n'étaient pas très claires dans le nuage de points. Il semble donc pertinent dans un second temps de remodeler ces parties dans un projet futur. Néanmoins, le reste de la modélisation du sanctuaire est assez convaincante (fig. 82). Les coupoles sont rendues correctement et le reste des éléments, plus classiques, également. Le travail de modélisation se termine avec les sols et les toitures (fig. 83).



Fig. 81. Germigny-des-Prés. Reconstitution 3D de la coupole sur pendentif à l'angle nord-ouest du sanctuaire. Vue extérieure oblique depuis le sud-est. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)

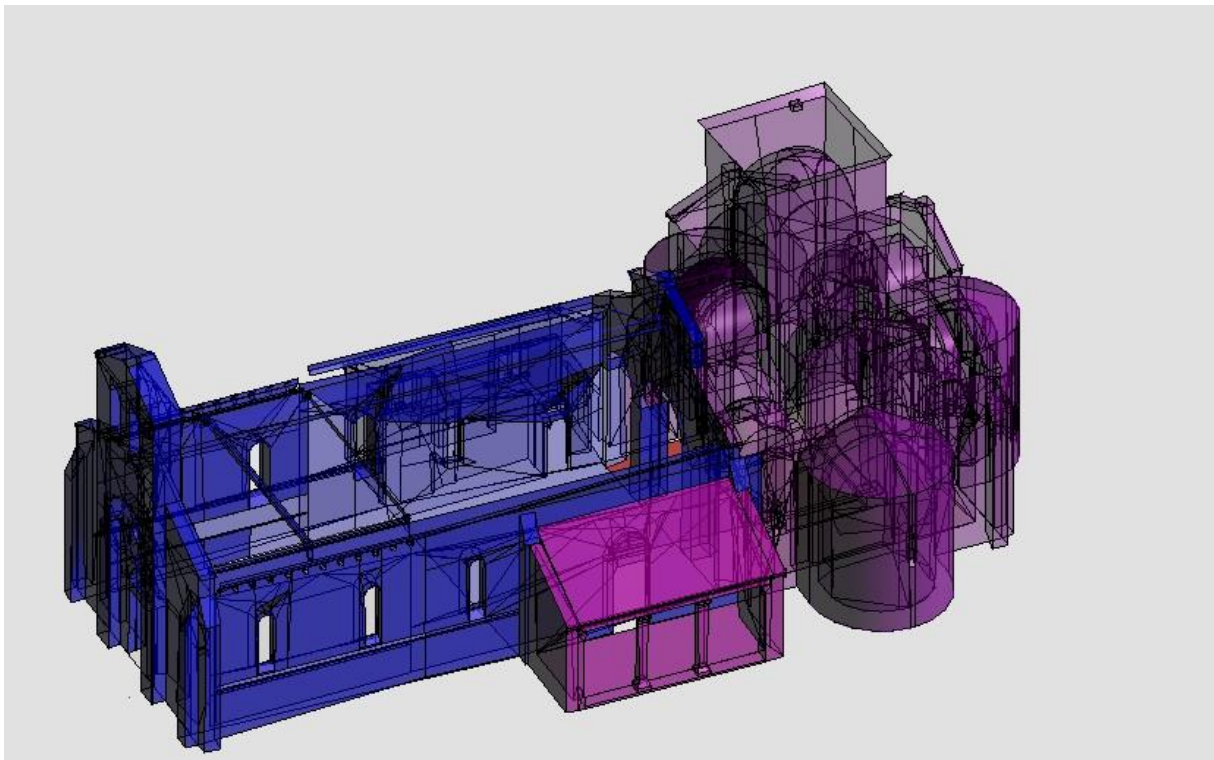


Fig. 82. Germigny-des-Prés. Reconstitutions 3D de la nef, de la façade occidentale, du porche sud, de la sacristie, des absides et du sanctuaire de l'oratoire. Vue extérieure oblique depuis le sud-ouest. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)

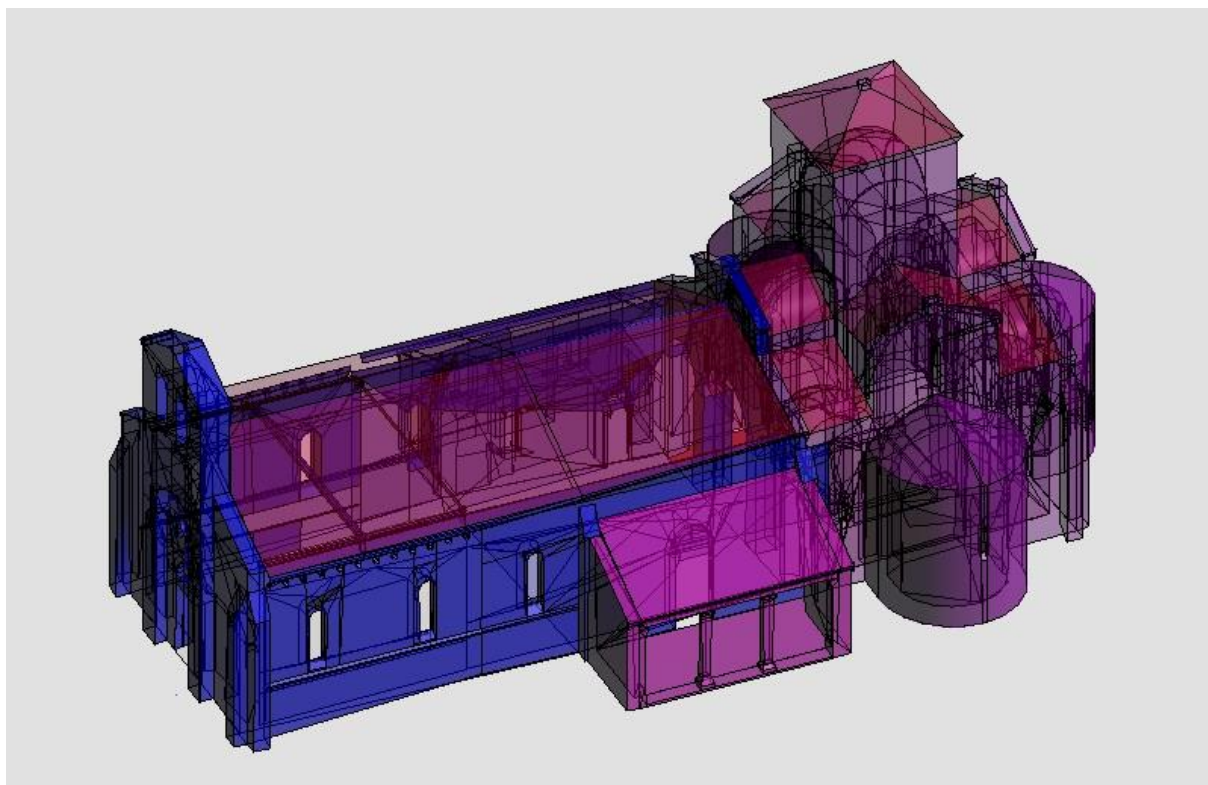


Fig. 83. Germigny-des-Prés. Reconstitution 3D de l'entièreté de l'oratoire. Vue extérieure oblique depuis le sud-ouest. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)

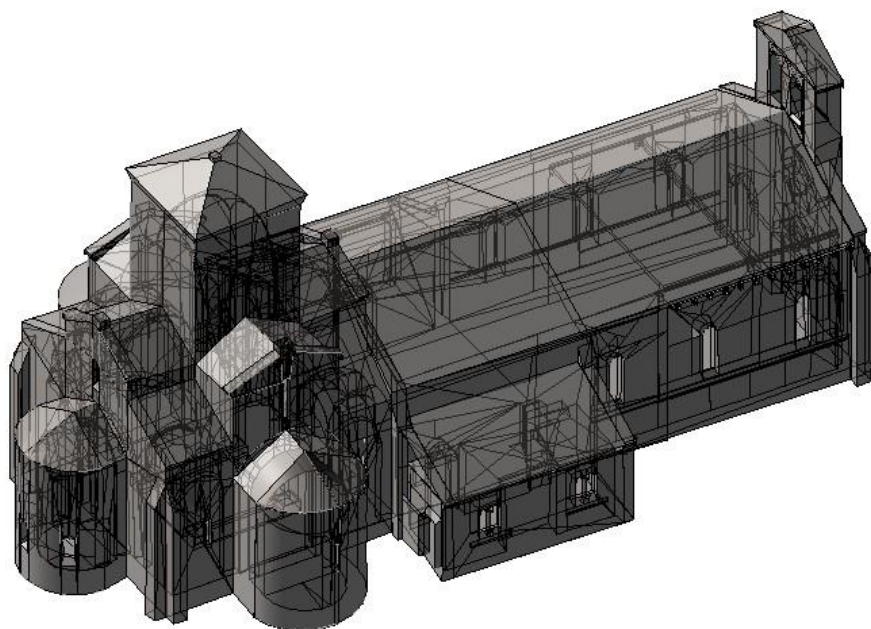


Fig. 84. Germigny-des-Prés. Reconstitution 3D de l'entièreté de l'oratoire avant classification par chantier. Vue extérieure oblique depuis le nord-est. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)

L'ensemble du modèle doit ensuite être mis en couleur selon les chantiers de construction (fig. 84). Dans un souci de compréhension, nous avons représenté chaque élément dans sa période d'origine, sans tenir compte des restaurations ou modifications. Nous n'avons dès lors pas considérés des éléments restaurés au 19^e siècle comme faisant partie de cette période. Par exemple, la tour et l'abside occidentale, qui ont été modifiées par J. Lisch vers 1860, sont classées dans les constructions du 9^e siècle car ces éléments existaient déjà a priori dans le bâtiment primitif. Comme déjà spécifié, les éléments de décors ont également été laissés de côté. Par exemple, les arcatures aveugles présentes dans l'abside orientale et dans la tour n'ont pas été modélisées ainsi que la chaire de vérité.

Les états peuvent être utilisées séparément pour mettre en avant les éléments propres à chaque chantier. Mais ils peuvent également être représentés ensemble pour exprimer l'état du bâtiment à une époque donnée (fig. 85 et 86). Il est donc possible en combinant les éléments carolingiens et romans d'avoir l'état a priori de l'époque romane. Dans un souci de clarté, ici les éléments seront exprimés séparément, pour mettre en avant les éléments connus ajoutés à chaque chantier.

Pour la période carolingienne, les parties ont été mises en bleu foncé (fig. 87). Sur base du nuage de points, il a donc été possible de représenter une grande partie de l'état primitif du bâtiment. Les trois absides ont pu être représentées ainsi que la tour et les coupoles d'angles. Concernant, la coupole de la tour étant donné que son existence au 9^e siècle est encore fortement débattue, elle est considérée comme faisant partie de la phase du 19^e siècle même si cela n'est pas affirmée pour le moment. De plus, les contreforts qui jalonnent le chœur n'ont pas été compris dans cette partie. En effet, à ce jour, il n'a pas été possible de prouver l'existence de ces éléments avant l'époque romane. En résumé, l'entièreté du sanctuaire est considérée comme représentant un état proche de l'état primitif. Néanmoins, il manque quand même l'abside occidentale et les absidioles à cet état. Leur ajout futur peut être un complément pour le modèle de Germigny. Durant la modélisation de la tour, le nuage ne permettait pas de positionner correctement les quatre baies qui la percent. Il a donc été choisi de ne pas les représenter. L'ajout de ces baies peut également s'avérer intéressant dans une seconde version du modèle, notamment pour l'étude de la lumière dans le bâtiment.

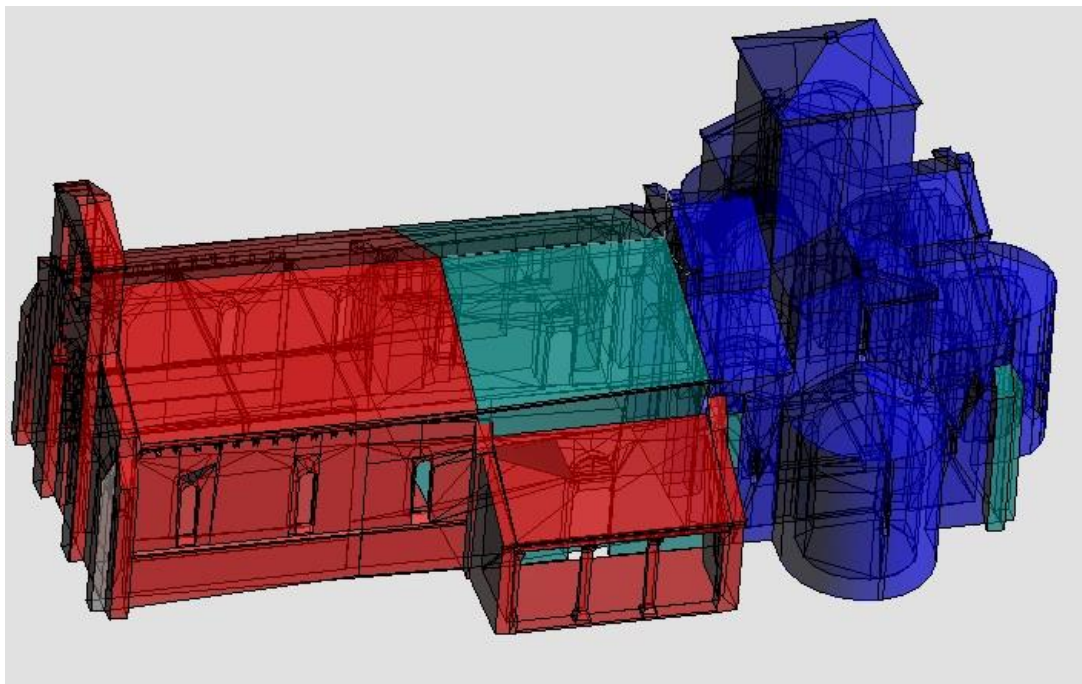


Fig. 85. Germiny-des-Prés. Reconstitution 3D de l'entièreté de l'oratoire avec classification par chantier. Vue extérieure oblique depuis le sud-ouest. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)

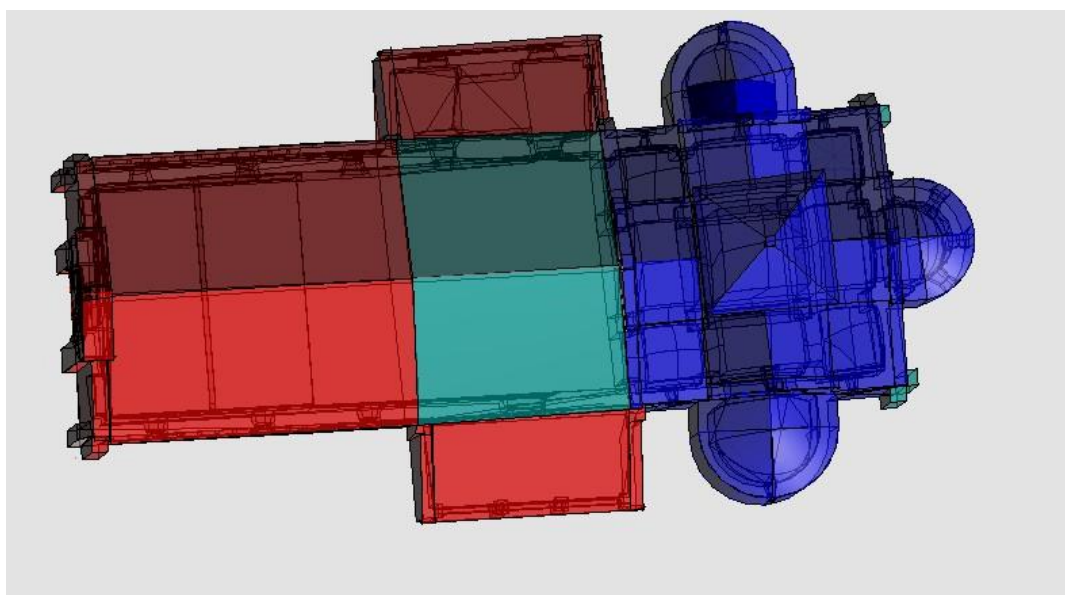


Fig. 86. Germiny-des-Prés. Reconstitution 3D de l'entièreté de l'oratoire avec classification par chantier. Vue zénithale. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)

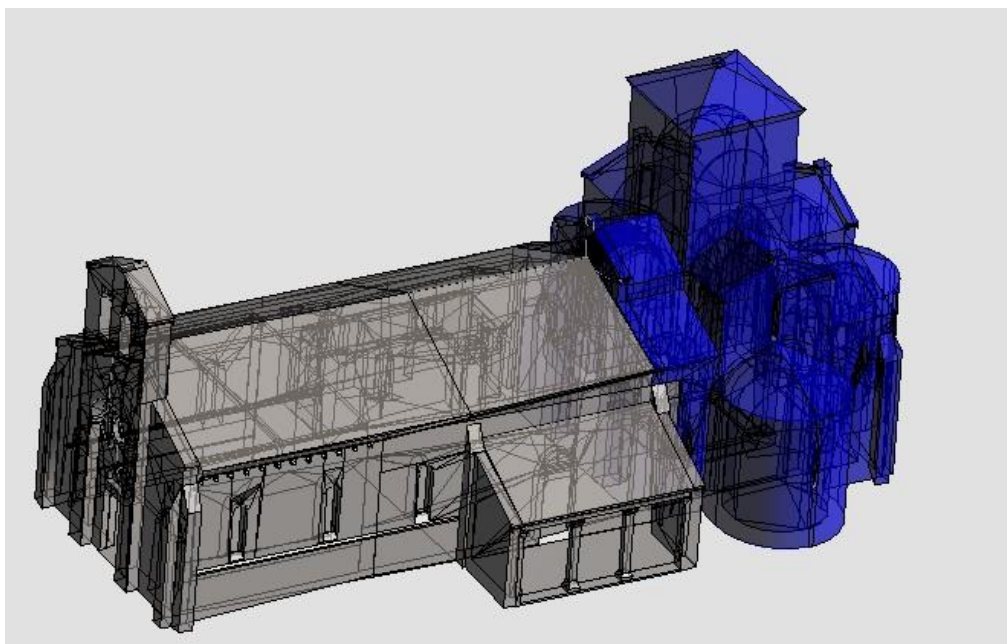


Fig. 87. Germiny-des-Prés. Reconstitution 3D de l'entièreté de l'oratoire avec mise en avant des parties existantes à l'époque carolingienne (en bleu). Vue extérieure oblique depuis le sud-ouest. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)

Pour la période romane, un bleu clair a été utilisé (fig. 88). Étant donné que cette phase consiste en l'agrandissement de la structure et la construction de certaines extensions détruites aujourd'hui comme l'ancienne sacristie ou le porche en « L », les éléments romans sont peu nombreux. On peut considérer les deux premières travées est de la nef comme correspondant à l'état romane. Ensuite, selon les représentations du 19^e siècle, les contreforts étaient également présents avant restauration. Malgré leur restauration par Juste Lisch, on peut donc les considérer comme faisant parti de cette phase. Si l'on combine ces éléments aux éléments carolingiens développés dans le paragraphe précédent, on obtient un modèle proche de l'état romane (fig. 89). Sur ce modèle, il pourrait être pertinent d'ajouter dans un second temps le porche en « L », l'ancienne sacristie et l'ancienne façade occidentale. Ces éléments n'existent plus de nos jours mais grâce aux fouilles archéologiques et aux différents sondages, leur emplacement et leur disposition au sol sont connus.

Pour les parties ajoutées au 19^e siècle, elles ont été représentées en rouge (fig. 90). Comme développé précédemment, l'état actuel du bâtiment est dû à l'ajout de ces restaurations. Outre les modifications dans les baies et la tour, on peut mettre en avant l'ajout de l'actuelle sacristie au nord du bâtiment, du porche au sud, le prolongement de la nef ainsi que l'ajout de la façade occidentale. Une fois, ces éléments ajoutés à ceux des autres phases, on obtient l'état actuel du bâtiment (fig. 85).

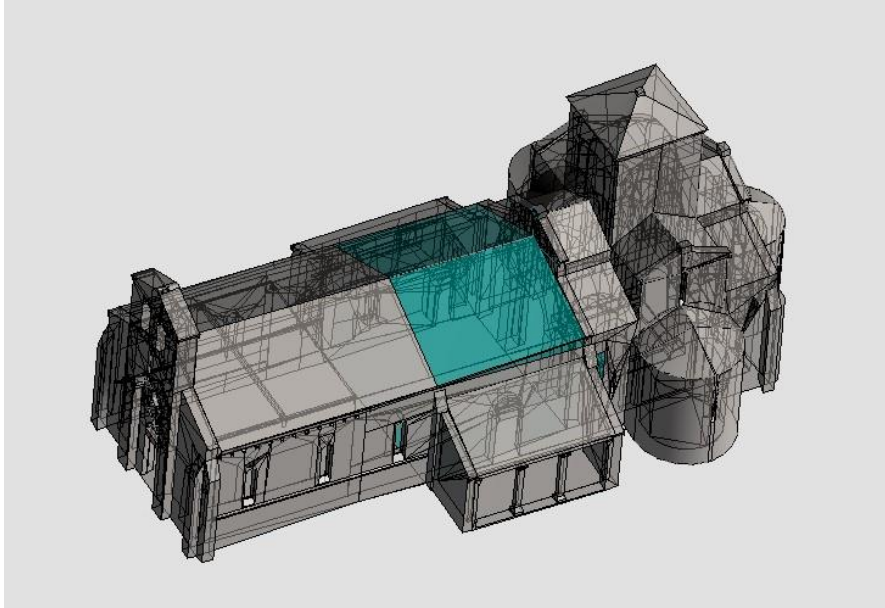


Fig. 88. Germigny-des-Prés. Reconstitution 3D de l'entièreté de l'oratoire avec mise en avant des parties ajoutées à l'époque romane (en turquoise). Vue extérieure oblique depuis le sud-ouest. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)

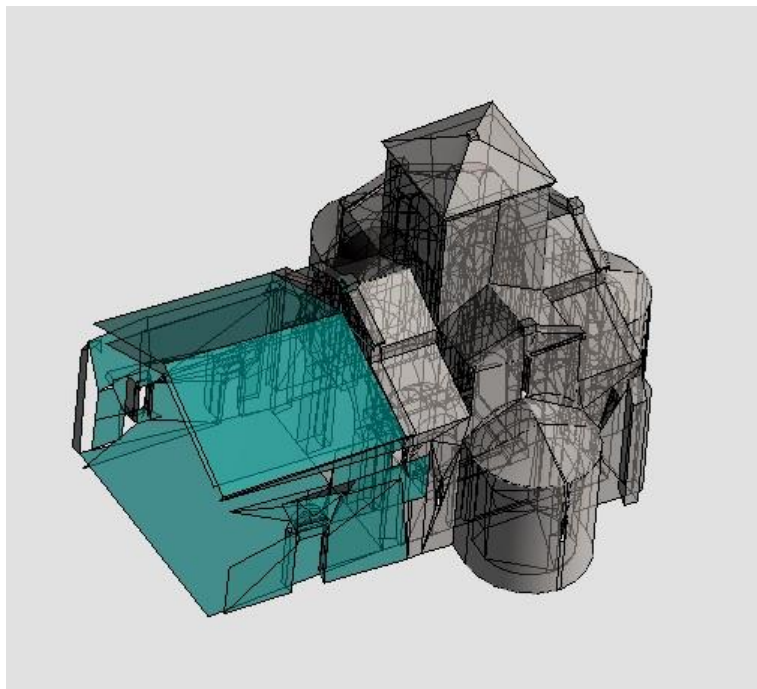


Fig. 89. Germigny-des-Prés. Reconstitution 3D de l'état supposé roman sur base des éléments conservés. Vue extérieure oblique depuis le sud-ouest. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)

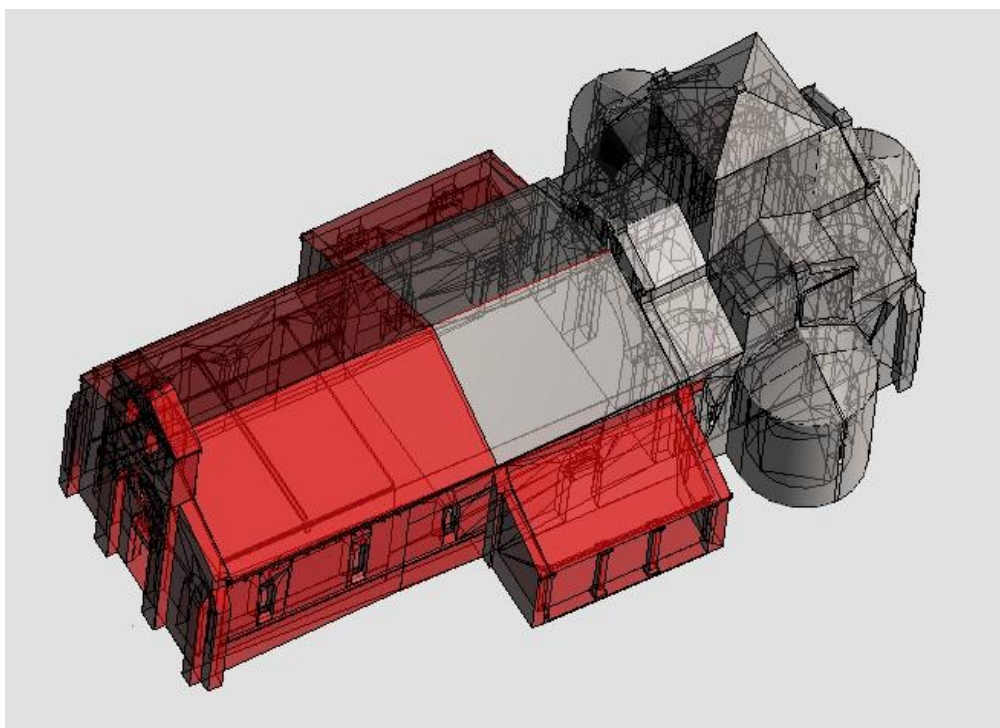


Fig. 90. Germigny-des-Prés. Reconstitution 3D de l'entièreté de l'oratoire avec mise en avant des parties ajoutées au 19^e siècle (en rouge). Vue extérieure oblique depuis le sud-ouest. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)

Au terme de cette modélisation, un modèle convaincant et utile a donc pu être mis au point. Dans ce dernier, il est possible d'isoler les éléments de chaque chantier (fig. 87, 88 et 90). Mais il est également possible de représenter l'entièreté du bâtiment en mettant en avant les différents chantiers qui le composent (fig. 85). L'objectif de fournir un modèle représentant les trois états est donc complété.

L'ensemble du modèle produit est composé de 2569 éléments (lignes, arcs et surfaces). Aux termes de cet expérimentation, outre les résultats convainquants, il a été possible d'identifier les désavantages et les avantages d'une modélisation avec Microstation 3D. Ces conclusions sont purement personnelles.

Les avantages de Microstation 3D :

- *L'intégration des fichiers* : tous les fichiers, peu importe leur format, sont intégrables dans le logiciel. C'est un avantage certain.
- *La personnalisation de l'interface* : il est très pratique de pouvoir avoir à portée de main une option qui est utilisée régulièrement. Dans notre cas, étant donné l'utilisation régulière des outils de création de surface, d'arcs ou de lignes, ceux-ci ont été directement mis en avant dans notre interface.
- *La possibilité d'avoir plusieurs points de vue* : le logiciel offre la possibilité d'avoir différents points de vue affichés dans des fenêtres cotes à cotes. C'est une option intéressante pour situer les objets tracés. Même si, en général, une seule fenêtre est nécessaire pour travailler. De plus, comme expliqué précédemment, grâce à la possibilité d'implémenter des caméras à tout endroit, il est très facile d'adapter son point de vue.
- *Les options d'accrochages* : il est possible de sélectionner des options d'accrochages diverses. Celles-ci comprennent notamment l'accrochage des points de nuage mais également les surfaces ou lignes perpendiculaires/ parallèles ou encore les centres des figures. Cela permet de s'adapter à chaque situation.
- *Le système de classification* : comme expliqué précédemment, cela permet un gain de fluidité et de compréhension pour la modélisation. Cette option permet une meilleure organisation du nuage de points et de la modélisation.
- *Les possibilités d'affichages* : il y a de nombreuses possibilités d'affichages permettant de voir les surfaces opaques ou translucides ou encore d'avoir un fond d'une couleur plus agréable pour travailler.
- *La langue* : cela semble être un atout très secondaire pourtant il est possible d'avoir le logiciel en français. Pour comparer à Blender, celui-ci n'est disponible qu'en anglais.
- *Les raccourcis* : il ne s'agit pas d'un élément propre à MicroStation, la majorité des logiciels ont des raccourcis. Dans le cas de MicroStation, d'un point de vue purement personnel, je trouve leur fonctionnement rapide et claire. Chaque manipulation peut avoir un raccourci, je n'ai pas utilisé l'entièreté des possibilités offerts par le logiciel. Les manipulations de base comme la modification d'un élément, le déplacement d'un élément, les outils de mesure, etc sont accessibles à partir de la barre espace (ouvre un menu de raccourci) suivi d'une lettre pour chaque élément. A force, ces raccourcis sont connus et rendent la manipulation plus rapide.

- *La personnalisation* : C'est un élément qui ressort déjà dans certains points ci-dessus mais le logiciel offre l'opportunité de tout personnaliser. Cela permet de s'approprier le logiciel.

Les inconvénients de Microstation 3D :

- *La perspective d'accrochage* : dans le logiciel, les points sont plus clairs ou plus sombres selon leur position dans l'espace. Cela est censé permettre de percevoir les distances. Il est récurrent qu'un point semble être à l'avant-plan alors qu'il se trouve à l'arrière-plan. Cela peut rendre la modélisation frustrante mais avec l'expérience, la perspective devient plus lisible.
- *L'optimisation* : il est impossible de savoir d'où vient le problème. Il vient peut-être de ma configuration ou du logiciel en lui-même, mais il est récurrent de perdre en fluidité en travaillant. Cela est peut-être dû à la densité du nuage de points mais cela rend la modélisation difficile. A cela, il est possible de rajouter que dans certains cas, les figures affichées disparaissent lors des zooms, sans raison. Ce sont peut-être des problèmes récurrents dans un logiciel de modélisation, mon inexpérience ne me permet pas de le savoir.
- *Les outils qui restent actifs* : il s'agit d'une particularité propre à Bentley et qui doit sûrement être un avantage dans d'autres cas, mais les outils sélectionnés restent actifs même après emploi. Si, par exemple, je trace un rectangle et que par inattention je clique à côté une fois le travail terminé, le logiciel recommence à tracer un élément. Cela devient très frustrant lorsque vous voulez sélectionner un objet dans le but de le modifier et que vous avez mal saisi l'outil de sélection. Il faut constamment être conscient que les outils restent actifs.
- *Le temps* : sans formation, le logiciel prend du temps à être pris en main. Une fois celui-ci pris en main, la modélisation devient plus simple. Néanmoins, le travail effectué ici aurait peut-être été réalisé plus rapidement par un professionnel.
- *L'interface de base* : cela est propre à beaucoup de logiciels de modélisation mais pour un néophyte l'interface de base est « brutale ». Il y a différents modes de travail (« modélisation de réalité », « modélisation », « visualisation », « dessin », « navigation dans les tâches ») qui chacun regroupe différents menus avec différentes options. Cela en fait un logiciel très complet mais qui, pour un néophyte, est difficile à appréhender. Il

est certain que si l'on compare à Blender, le problème est le même : l'interface est complexe.

- *La nécessité de couper le logiciel pour utiliser certains outils* : certains outils comme « surface par arêtes » ne semblent pas toujours être disponibles dans le logiciel. Il est quelque fois nécessaire de couper celui-ci et de le relancer pour pouvoir tracer correctement.
- *Les « crashes »* : Pour une raison inconnue, le logiciel se ferme en plein travail. Ces crashes s'expliquent peut-être par des calculs trop compliqués pour le logiciel ou par mon installation qui ne convient pas totalement. N'étant pas informaticien, je ne peux identifier le problème. Je n'ai pas tenu de compte des crashes mais sur une journée complète de travail (8h de travail), le logiciel peut planter jusqu'à 3-4 fois. Dans certains cas, cela a entraîné une perte de 30 min de travail.

Les éléments décrits plus haut sont personnels et surement justifiables par un professionnel. Dans ce travail, l'objectif était d'appréhender un logiciel peu connu du milieu archéologique pour savoir s'il semblait abordable pour un cas concret dans le domaine.

Microstation étant un logiciel d'architecture, l'attention apportée par les archéologues n'a surement pas été considérée durant la création du logiciel. La régularité des bâtiments modernes ne se retrouvent pas toujours dans les bâtiments anciens. Dès lors, certaines demandes propres aux archéologues ne semblent pas avoir été considérées dans le logiciel. Par exemple, pour un archéologue, ne pas pouvoir directement représenter une voûte en cul-de-four peut s'avérer gênant dans la construction d'un bâtiment ancien. Cependant, grâce aux nombreux outils disponibles dans le logiciel, des options existent pour créer ce qui est désiré. Ces solutions doivent néanmoins être découvertes en cours de travail.

Il a été décidé de tenter cette expérience sans formation dans le but de savoir s'il était possible de maîtriser le logiciel en autodidacte. La réponse est nuancée. Il est possible de maîtriser les bases de Microstation après des heures d'essais. Néanmoins, cette maîtrise basique prend beaucoup de temps. Avoir une formation sur Microstation pourrait accélérer l'acquisition des bases. De plus, il est certain que tout le potentiel du logiciel n'a pas été utilisé lors de ce travail. Ce potentiel peut être découvert et développé durant les formations proposées par Bentley ou leur collaborateur. Certaines formations en ligne sont proposées par Bentley à la suite de l'achat du logiciel, d'autres sont payantes. Pour deux jours de formation sur

Microstation dispensés par BeCad (spécialiste des licences Bentley), il faut compter 690 € HTVA²¹³.

Nous pouvons également nous demander si les efforts fournis en formation et en pratique ont un intérêt pour l'archéologue. A mon sens, Microstation offre des applications intéressantes pour les chercheurs et le public. Grâce à la texturation, il est possible de joindre ce travail avec des photographies permettant ainsi un résultat réaliste. Ensuite, les options de section et de découpe du logiciel permettent de fournir des coupes (fig. 91), des plans d'élévations (fig. 92) et des plans au sol (fig. 93) tout aussi précis et convainquants que des plans en 2D. Ces coupes permettent de fournir les mesures du site mais également les altitudes de celui-ci.



Fig. 91. Germigny-des-Prés. Coupe mettant en avant l'arc triple séparant le sanctuaire et la nef de l'oratoire. Vue intérieure depuis l'ouest. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)

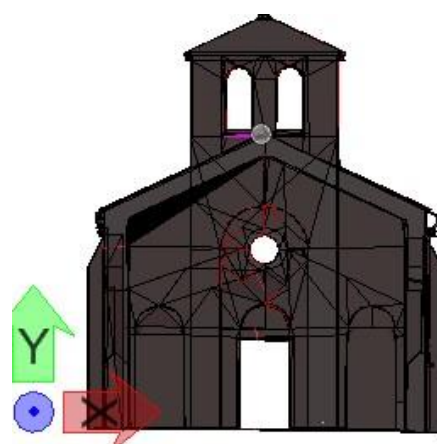


Fig. 92. Germigny-des-Prés. Elévation de la façade occidentale de l'oratoire. Vue extérieure depuis l'ouest. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)

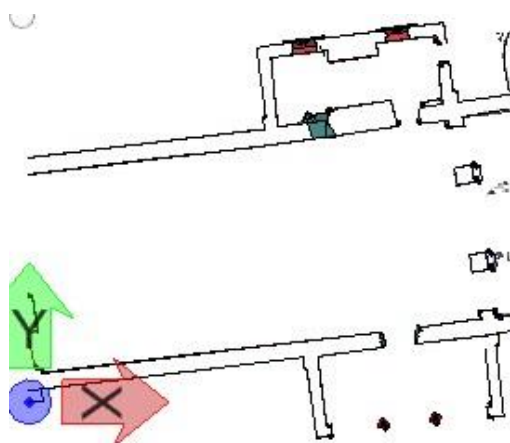


Fig. 93. Germigny-des-Prés. Plan au sol d'une partie de la nef, de la sacristie et du porche de l'oratoire. Vue zénithale. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)

²¹³ <https://www.becad.net/index.php/formation-a-microstation-connect-edition/>, consulté le 8 Août 2020.

Comme présenté plus haut, Microstation permet de directement fournir des éléments de classification de phase. Il est possible de mettre en avant, par des couleurs, des éléments d'une période, comme dans ce travail. Cette classification peut être également utilisée pour d'autres données comme par exemple le travail d'un architecte ou d'un artiste dans le bâtiment. Cette option peut aussi être utilisée pour éclairer les parties d'un bâtiment dans un certain matériau. Microstation, comme d'autres logiciels de modélisation, fournit les mêmes représentations qu'un plan en 2D, des résultats similaires aux logiciels de DAO tout en permettant d'utiliser la 3D si nécessaire. Cette 3D est également un atout pour le grand public. Si le modèle est utilisé dans un logiciel de visualisation 3D comme PDF 3D ou intégré dans une vidéo de présentation, cela permettrait de visualiser l'édifice et les différentes phases dont il est issu. Avec ce format, l'évolution du site est plus compréhensible durant une visite.

Microstation semble donc être un logiciel qu'il faut appréhender avec une expérience ou en combinaison avec une formation complémentaire. Il est certes complexe, coûteux en installation mais peut sûrement permettre des résultats utiles même pour une personne sans formation. A la sortie de cette expérience, Microstation semble également offrir plusieurs opportunités de représentations dans un même logiciel.

Aux termes de cette expérience, un modèle filaire, permettant de visualiser les différents états du bâtiment a bien été réalisé. Cet objectif est complété grâce à Microstation. Cependant, dans un travail ultérieur, un approfondissement pourrait être envisagé pour approfondir les détails du décor ou pour ajouter une texturation à l'ensemble. Il peut être intéressant de tester la combinaison de ce modèle avec des photographies.

6) Conclusion :

L'objectif de cet écrit était de produire une modélisation 3D de Germigny-des-Prés. Par la même occasion, il était question de tester un logiciel peu courant en archéologie. Cette expérimentation permettait également d'appréhender l'état de la modélisation 3D dans le patrimoine et d'observer si les constats tirés des expériences précédentes se retrouvent également dans notre analyse personnelle. Pour permettre d'atteindre cet objectif nous avons abordé différentes thématiques tout au long de ce mémoire.

Premièrement, il était essentiel de revenir sur le site, son histoire et les informations qui entourent son installation. Germigny-des-Prés est un site alto-médiéval redécouvert au 19^e siècle. Il est étudié dès l'époque par plusieurs érudits. Au 20^e siècle, le site accueillera sa première campagne de fouilles. Ensuite, tout au long du 20^e siècle, différentes études sporadiques seront produites sur le site. En 2016, un projet collaboratif entre des universités belges (UCL et Uliège) et des institutions françaises (DRAC Val-de-Loire et CEM) amorcera une campagne d'études systématiques de l'entièreté du site. Depuis, le site est fouillé régulièrement, des prospections radars sont réalisées ainsi que des analyses physico-chimiques, des carottages, ... mais également un relevé 3D.

Germigny-des-Prés s'implante dans le Loiret ou plus précisément dans l'ancien Orléanais, une région riche, occupée entre le Paléolithique et le Néolithique. Tout autour de Germigny, différents sites rupestres confirment l'occupation ancienne de la région. Cependant, le Loiret prend surtout de l'ampleur avec l'époque gallo-romaine. Les sites se multiplient et grossissent dans la région. A Germigny-même, on ne connaît pas d'occupations avant le 9^e siècle. À ce jour, malgré des fragments de céramiques antiques retrouvées en fouilles, il n'a pas été possible d'affirmer une occupation antique. Pourtant, selon certains écrits anciens, l'implantation de Germigny est motivée par l'existence d'une villa ou d'un palais sur le site. Les prospections radars et les fouilles récentes n'ont pas permis de trouver des artefacts prouvant cette occupation.

Au 9^e siècle, le site est investi par Théodulf d'Orléans. Il y fait construire un édifice de plan centré. Celui-ci prend la forme de deux carrés imbriqués traversés par une croix grecque dont les bras se terminent par une abside au quatre points cardinaux. L'ensemble est surmonté en son centre par une tour. Ce premier état correspond à peu près au sanctuaire actuel. Après le 9^e siècle, les mentions de Germigny dans les écrits sont rares. Il faudra attendre le 11^e siècle

pour que l'église réapparaisse de manière significative dans les écrits avec notamment l'intérêt de l'Abbé Hughes pour le site. Durant l'époque romane, le bâtiment sera une première fois remanié avec, notamment, l'ajout d'une nef courte à l'ouest à la place de l'abside occidentale, l'ajout d'une sacristie sur l'angle nord-est du bâtiment et la modification des baies de l'abside orientale. Entre l'époque romane et les Temps Modernes, l'église est à nouveau peu présente dans les écrits. Lors de sa redécouverte au début du 19^e siècle, elle est élevée au statut d'église la plus ancienne de France et elle intéresse des intellectuels de l'époque. Selon les témoignages de l'époque, l'église est proche de l'état de ruines. Des travaux de stabilisation seront donc lancés durant la première moitié du 19^e siècle. Les chantiers de stabilisation vont se diriger vers des travaux de restauration. À l'époque, les chercheurs visent à revenir à l'état primitif du bâtiment. Un état qu'ils pensent inspiré de l'art byzantin. On sait aujourd'hui que ces conclusions étaient fausses. Malgré ces mauvaises interprétations, les modifications sont entamées durant la seconde moitié du 19^e siècle. M. Lisch et M. Millet vont, notamment, agrandir la nef, modifier la tour, modifier l'abside orientale, détruire la sacristie romane ainsi que construire une nouvelle sacristie au nord et un porche au sud. L'état actuel du bâtiment découle de ces dernières manipulations.

Il était également intéressant de se pencher sur le commanditaire de cet édifice : Théodulf d'Orléans. Ce personnage emblématique de la période carolingienne est, à l'origine un espagnol formé à la théologie dans son pays. Il rejoint ensuite la cour de Charlemagne aux alentours de 790. Connus par ses écrits essentiellement, il participe à l'écriture de la position des Francs au second concile de Nicée en 791, produit différents poèmes traitant de la cour carolingienne et s'essaye à des réflexions sur la société, sur les devoirs des prêtres dans une paroisse, par exemple. Théodulf est un érudit proche de Charlemagne ayant tout autant œuvré à la *Renaissance Carolingienne* qu'Alcuin. Son érudition et sa proximité avec Charlemagne entraînent sa nomination à différents titres. Il devient évêque d'Orléans et abbé de l'abbaye de Fleury, de Saint-Aignan, de Saint-Liphard et de Micy entre 796 et 798, mais aussi archevêque à titre honorifique en 800. Nous avons pu voir tout l'ampleur de ce personnage grâce aux recherches récentes de Claire Tigolet.

Au vu du parcours de Théodulf, il semblait également pertinent de se demander si un tel personnage avait eu de l'influence sur la construction de Germigny-des-Prés. D'après les recherches de Claire Tigolet et de Pascale Chevalier, on peut affirmer qu'il est impossible d'interpréter l'influence de Théodulf avec certitude. Cependant, en raison de la ressemblance

de Germigny avec la chapelle palatine d'Aix mais aussi de bâtiments arméniens, certains chercheurs se demandaient si, étant donné la place de Théodulf à la cour, il n'avait pas demandé l'intervention du même architecte que Charlemagne : Eudes de Metz (arménien d'origine). Cette hypothèse a néanmoins été écartée en raison des grandes différences architecturales avec Aix et les bâtiments arméniens. Une seconde hypothèse voulait qu'en raison des origines hispaniques de Théodulf, il se soit inspiré des bâtiments rencontrés avant sa venue en France. A nouveau, les différences architecturales rendent peu probables une inspiration pareille. Finalement, l'inspiration la plus pertinente semble être tirée des traditions tardo-antiques de la région. L'oratoire rassemble en effet plusieurs ressemblances avec les *Fanum* et les *Tholos* antiques. Il semblerait donc que l'architecture de Germigny est plutôt induite par des inspirations régionales et antiques. Influencés ou non par Théodulf, cela reste encore difficile à déterminer.

Après avoir compris les origines du site, la région dans laquelle elle s'inscrivait et l'histoire de son commanditaire, il était essentiel d'identifier les différentes phases de constructions et les éléments qui les composent. Généralement, les scientifiques identifiaient trois chantiers différents : un chantier primitif, un chantier roman et un chantier 19^e. C'est donc le schéma qui a été décidé de suivre pour la modélisation. Pour chaque chantier, tous les éléments ont été identifiés. En définissant clairement, les différents états du bâtiment, il était possible de fournir une modélisation de qualité. Dans cette partie, une confusion subsiste avec le chantier roman que certains chercheurs considèrent comme étant du 15^e siècle. Au vu des dernières recherches, il semble néanmoins que les éléments identifiés comme étant du 15^e seraient bien romans.

Nous nous sommes ensuite penchées sur la modélisation et sa place en archéologie. Nous avons identifié deux manières communément utilisées dans le patrimoine : la photogrammétrie et la lasergrammétrie.

La photogrammétrie est une méthode que l'on rencontre régulièrement en archéologie. A l'origine étant une méthode de production de relevé 2D, la méthode a évolué pour permettre aujourd'hui de fournir des modèles 3D. La technique se base sur l'utilisation de photographies pour reformer les bâtiments ou les objets à l'aide de logiciels performants. La méthode est généralement appréciée pour son accessibilité et son moindre coût. Néanmoins, elle requiert

quand même un investissement personnel pour acquérir la maîtrise des logiciels et peut dans certains cas demander énormément de temps.

La seconde méthode, plus récente, nous concernait plus directement car elle se base sur l'utilisation de relevés laser pour fournir le squelette d'une reconstruction 3D. Une fois un relevé laser réalisé grâce à un scanner laser, on obtient un nuage de points. Ce nuage de points étant généralement composé de différents nuages et de points parasites, il doit être retravaillé dans un logiciel d'édition de nuage. Il est ensuite utilisé tel quel ou repassé dans un second logiciel de *Modelling* pour qu'une modélisation 3D soit réalisée. Dans le cas de la lasergrammétrie, il ressort que son utilisation demande l'acquisition de la maîtrise de matériels et de logiciels spécifiques. En raison de la complexité des logiciels et du coût du matériel, la méthode est souvent moins valorisée que la photogrammétrie sur des chantiers d'archéologie. Néanmoins, des collaborations sont de plus en plus nombreuses fournissant des modèles convaincants.

La combinaison des deux méthodes existe également. Elle est de plus en plus mise en avant permettant d'avoir la précision des relevés laser mais également le rendu réaliste de la photogrammétrie. Cependant, cette combinaison demande le matériel et la maîtrise des deux techniques. Pour le moment, ses utilisations ne sont donc que sporadiques. Néanmoins, de plus en plus de scanners laser sont développés avec des appareils photos performants, permettant la combinaison de la photogrammétrie et de la lasergrammétrie plus facilement. Ces évolutions annoncent un futur certain pour cette approche.

Nous avons pu constater que ces trois approches avaient des inconvénients. Ceux-ci concernent souvent la difficulté d'acquisition pour la maîtrise de la technique, le temps du travail post-capture ainsi que le coût du matériel. Néanmoins, il en ressort également des qualités indéniables. Régulièrement, les recherches démontrent que les trois méthodes capturent rapidement les données, que les données collectées sont nombreuses, mais également que les rendus sont très convaincants. De plus, nous avons constaté que ces méthodes fournissent différents résultats. Il est possible de tirer de ces relevés des observations concernant des restaurations potentielles, de mettre au point des typologies, de réaliser des relevés dans des endroits difficiles d'accès ou encore de sauvegarder des états menacés de bâtiments. A ces résultats s'ajoutent la possibilité de fournir un support visuel en 3D mais également de fournir exactement les mêmes supports 2D que les techniques traditionnelles de dessin ou de relevés d'élévations.

À la suite de ces constats, l'utilisation d'un logiciel tel que Microstation 3D semblait pertinent. Il pourrait permettre de voir si ces observations étaient les mêmes avec un logiciel différent. Grâce aux chapitres développés précédemment, toutes les informations nécessaires pour la modélisation étaient acquises.

Après intégration du nuage de points, la modélisation a été réalisée depuis la façade ouest vers l'abside occidentale. Une fois la façade ouest et la nef réalisés, le logiciel semblait pris en main. Il a donc été entrepris de réaliser le sanctuaire en commençant d'abord les absides et ensuite la tour. L'ensemble a été terminé par la construction des sols et des toits.

En cours de modélisation, il avait été décidé de fournir un unique modèle mettant en avant les différents états du bâtiment. Pour cela, les éléments ont été mis dans des couleurs différentes : bleu foncé pour l'état primitif, bleu clair pour les éléments romans et rouge pour les éléments du 19^e siècle.

Au terme de cette modélisation, il est possible de tirer plusieurs conclusions. Premièrement, Microstation n'est pas pensé pour des archéologues et cela se ressent dans l'absence de certains outils qui, pour un archéologue, sont primordiaux. Cependant, cette absence peut être compensée par l'utilisation des autres outils. En expérimentant, il est possible de représenter l'entièreté des éléments du bâtiment. Toutefois, en travaillant de la sorte, la modélisation prend du temps, confirmant une critique émise régulièrement sur la technique. Néanmoins, il nous semble possible qu'en suivant des formations, cette perte de temps pourrait être évitée.

Concernant la complexité reprochée au logiciel de modélisation, en effet, au premier abord, Microstation est complexe. Toutefois, avec l'expérience, le logiciel devient plus simple à maîtriser et offre des opportunités de raccourcis rapides.

D'autres qualités et défauts ont pu être mis en avant à la suite de cette modélisation. Cependant, la question principale qu'il faut se poser au terme de cette expérimentation est : Microstation 3D est-il un logiciel adapté pour les archéologues ? D'un point de vue personnel, je pense que Microstation 3D sans formations adéquates n'est pas le logiciel à conseiller pour les archéologues. Malgré une production très correcte qui pourra être utilisée dans les recherches futures sur Germigny, le temps dépensé pour fournir des résultats est important. Cependant, je suis persuadé que pour un professionnel de la modélisation ou un archéologue ayant suivi les formations, Microstation offre de nombreuses possibilités.

Malgré les remarques précédentes, le constat de ce mémoire est le suivant : il est possible pour un néophyte de modéliser avec Microstation 3D. Certes, la modélisation est longue et l'entière des possibilités du logiciel n'est pas connu pourtant, il est possible de fournir un modèle convaincant.

Pour poursuivre les observations entamées durant ce travail, il pourrait être pertinent d'expérimenter le logiciel à nouveau avec l'aide d'un professionnel ou d'une personne formée dans le but de voir si les problèmes rencontrés durant ce travail seront les mêmes.

Ensuite, un second modèle pourrait être fourni pour représenter les détails qui n'ont pas été modélisés comme, notamment, les éléments de décors. Il serait également intéressant de représenter les parties détruites mais dont nous connaissons l'emplacement comme l'ancienne sacristie romane ou encore les absidioles. Par la même occasion, l'intégration de photographies ou de métadonnées pourrait être intéressante. La combinaison de ces informations fournirait un modèle précis dans sa représentation mais qui permettrait également d'avoir accès aux informations des recherches sur le site.

Dans les autres possibilités de recherche qui avaient été avancées également au début de ce travail, nous avons émis la possibilité d'un modèle permettant d'étudier le comportement de la lumière dans le bâtiment. Il pourrait en effet être intéressant de se pencher sur cet aspect du bâtiment. Néanmoins, pour cela, il faudra à nouveau modéliser un modèle plus précis. Des éléments qui n'ont pas pu être modélisés seraient importants dans ce cas d'étude, notamment, les baies de la tour.

La méthode 3D est une technologie nouvelle pour le patrimoine. Elle est complexe, mais elle est également intéressante. Les reproches qui lui sont régulièrement adressés sont justifiés. Cependant, ces défauts peuvent être contournés. Pour moi, malgré les difficultés que représentent cette technique pour un archéologue, elle n'en reste pas moins une technique pleine de potentiels. Il semble important de continuer à expérimenter le domaine, à se former et à montrer de l'intérêt pour la tri-dimension dans le patrimoine.

Je terminerais ce mémoire par remercier M. Hallot pour son soutien technique. Je remercie également M. Halet pour son aide apporté dans la compréhension du logiciel. Je tenais également à surtout remercier Mme Van Wersch pour son soutien inébranlable pendant ces deux années de recherches. Grâce à son aide, j'ai pu découvrir un site exceptionnel, rencontrer des professionnels d'autres institutions inspirants et expérimenter une technique peu représentée dans des travaux de fin d'études en archéométrie. Je tenais également à remercier William Colemonts pour ses conseils méthodologiques, Nathalie Magain pour ses conseils orthographiques et ma famille pour leur soutien durant ces dernières années.

7) Bibliographie :

- ADAMOPOULOS, E. et RINAUDO, F., 2019, *3D interpretation and fusion of multidisciplinary data for heritage science. A review*, actes du colloque *International Committee of Architectural Photogrammetry*, XLII-2/W15, Avila, p. 17-24.
- AGUSTIN, L. ET QUINTILLA, M., 2019, *Virtual reconstruction in BIM technology and Digital inventories of Heritage*, actes du colloque *International Committee of Architectural Photogrammetry*, XLII-2/W15, Avila, p. 25-31.
- ALBY, E., VIGOUROUX, E. et ELTER, R., 2019, *Implementation of survey and three-dimensional monitoring of archaeological excavations of the Khirbat Al Dusaq site, Jordan*, actes du colloque *International Committee of Architectural Photogrammetry*, XLII-2/W15, Avila, p. 41-47.
- ALIBERTI, L. et IGLESIAS PICAZO, P., 2019, *Close-Range photogrammetry practice. Graphic documentation of the interior of the walls of Avila (Spain)*, actes du colloque *International Committee of Architectural Photogrammetry*, XLII-2/W15, Avila, p. 49-53.
- AL KHALIL, O. et GRUSSENMEYER, P., 2019, *2D & 3D reconstruction workflows from archive images, case study of damaged monuments in Bosra Al-Sham City (Syria)*, actes du colloque *International Committee of Architectural Photogrammetry*, XLII-2/W15, Avila, p. 55-62.
- ALLESSANDRI, L., BAIOCCHI, V., DEL PIZZO, S., DI CIACCIO, F., ONORI, M., ROLFO, M.-F. et TROISI, S., 2019, *Three-dimensional survey of Guattari cave with traditional and mobile phone cameras*, actes du colloque *2nd International conference of geomatics and restoration*, Volume XLII-2/W11, Milan, p. 37-41.
- ALTUNTAS, C., MERT, S., YAMAN, G., CENGIZ, Y. et SONMEZ, M., 2019, *Photogrammetric wireframe and dense point cloud 3D modelling of historical structures. The study of sultan Selim mosque and Yusuf Aga library in Konya. Turkey*, actes du colloque *2nd International conference of geomatics and restoration*, Volume XLII-2/W11, Milan, p. 77-82.
- BACCI, G., BERTOLINI, F., e.a, 2019, *HBIM methodologies for the architectural restoration. The case of the ex-curch of San Quirico all'Olivo in Lucca, Tuscany*, Actes

du colloque 2nd *International conference of geomatics and restoration*, Volume XLII-2/W11, Milan, p. 121-126.

- BERTHOLON, B., 2019, *le décor de stucs à Germigny-des-prés. Une étude technique des vestiges*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre.
- BREPOLS PUBLISHERS, 2004, *L'oratoire de Germigny-des-Prés*, dans *Lumières de l'an Mil en Orléanais. Autour du millénaire d'Abbon de Fleury*, Turnhout, p. 120-128.
- BUCHSENSCHUTZ, O. et GRUEL, K., 1994, *Le relevé de terrain en archéologie. Le système Arkéoplan*, dans *Histoire & mesure*, volume 9, n°3-4, Paris, p. 231-237.
- CAMERLYNCK, CH., SAPIN, CH. et VAN WERSCH, L., 2019, *Prospection géophysique sur le site de Germigny-des-Prés*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre.
- CHEVALIER, P., 2019, *Germigny, une architecture originale ?*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre.
- COLLARD, A. et MONBALLIN, M., 2014, *Référentiel pour l'élaboration et la rédaction d'un travail scientifique en sciences humaines*, 3^e ed., Presses universitaires de Namur, Namur.
- CRIBELLIER, CH., 1999, *Bonnée*, dans *Agglomérations secondaires antiques en Région Centre*, Volume 1, Tours : Fédération pour l'édition de la Revue archéologique du Centre de la France, p. 195-197.
- CRIBELLIER, CH. 1999, *Pithiviers-le-Vieil*, dans *Agglomérations secondaires antiques en Région Centre*, Volume 1, Tours : Fédération pour l'édition de la Revue archéologique du Centre de la France, p. 205-210.
- CROUTELLE, J., 2019, *Regard sur une construction fameuse. L'église de Germigny-des-Prés à l'épreuve des sources*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre.
- DESHOULIÈRES, F., 1929, *L'église carolingienne de Germigny-des-Prés*, dans *Bulletin monumental*, Tome 88, Paris, p. 332-333.
- DESHOULIÈRES, F., 1932, *Les fouilles de Germigny-des-prés (Loiret)*, dans *bulletin monumental*, Tome 91, Paris, p. 140-141.
- EGELS, Y., 2011, *La photogrammétrie. Principes généraux et terminologie*, dans *Collection EDYTEM. Cahier de géographie*, n° 12, s.l. (Paris ?), p. 41-50.
- HEBER-SUFFRIN, F., 2019, *Germigny, le décor sculpté. La pierre*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre.

- HÉNO, R. et CHANDELIER, L., 2014, *Numérisation 3D de bâtiments. Cas des édifices remarquables*, « Collection SIG et intelligence territoriale », Londres.
- HUBERT, J., 1931, *Germigny-des-Prés*, extrait du *Congrès archéologique de France de 1930*, Paris, p. 534-568.
- HUNOT, J.-Y., 2004, *L'évolution de la charpente de comble en Anjou : XIIe - XVIIIe siècles*, dans *Revue archéologique de l'ouest*, tome 21, p. 225-245.
- IONA-PARAT, D., 2003, *Les Carolingiens et les origines chrétiennes*, *Temps et lieux*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, 7/2003, Auxerre.
- JANVIER-BADOSA, S., STEFAN, CH., BRUTENAUD, X., BECK, K., DE LUCA, L. et AL-MUKHTAR, M., 2013, *Documentation and analysis of 3D mappings for monument diagnosis*, Marseille, p. 710-718.
- KOBE, A., RISTOW, S. ET VASÁROS, Z., *Modell der Pfalz Karls des Großen in Aachen*, dans STIEGEMANN, CH., dir., 2017, *Wunder Roms Im Blick des Nordens Von der Antike bis zur Gegenwart*, Catalogue II, Paderborn, p. 328-329.
- LANDES, T., GRUSSENMEYER, P. et BOULAASSAL, H., 2011, *Les principes fondamentaux de la lasergrammétrie terrestre. Acquisition, traitement des données et applications (partie 2/2)*, dans *Revue XYZ*, n°129, 4^{ème} trimestre, s.l., p. 25- 38.
- LEROI-GOURHAN, A., 2002, *Le temps de l'Aurignacien à Arcy-sur-Cure*, dans *Gallia préhistoire. Suppléments*, supplément 34, p. 45-47.
- LIGER J.-C., 1995, *Concrétionnement et archéologie aux grottes d'Arcy-sur-Cure (Yonne)*, dans *Bulletin de la Société préhistorique française*, tome 92, n°4, p. 445-450.
- MAUMONT, M., 2010, *L'espace 3D. de la photogrammétrie à la lasergrammétrie*, dans *in situ*, 13/ 2010, Paris.
- MITALAITÉ, K., 2019, *l'arche d'Alliance et les chérubins dans la controverse iconoclaste. L'apport de Théodulf d'Orléans*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre.
- NICCOLUCCI, F., FELICETTI, A., AMICO, N. et D'ANDREA, A., 2013, *Quality control in the production of 3D documentation of monuments*, actes du colloque *Built heritage 2013 : Monitoring Conservation Management*, Milan, p. 864-873.
- PÉROUSE DE MONTCLOS, J.-M., 2011, *Architecture. Description et vocabulaire méthodiques*, Paris.
- POILPRÉ, A.-O., 2019, *le décor intérieur de l'oratoire de Germigny-des-Prés et son iconographie*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre.

- POILPRÉ, A.-O., 1998, *Le décor de l'oratoire de Germigny-des-Prés. L'authentique et le restauré*, dans *les cahiers de civilisation médiévale*, 41^e année, Poitiers, p. 281-297.
- POULAIN, G., dir., 2019, *Rapport de forages géo-archéologique. Site : Oratoire carolingien...*, dans VAN WERSCH, L., HENRION F., POULAIN G., HOCQUET F.-P. et SAPIN, CH., 2019, *Germigny-des-Prés (45-Loiret). Oratoire. Rapport d'intervention*, s.l..
- POUX, F., NEUVILLE, R., BILLEN, R., 2017, *Point cloud classification of tesserae from terrestrial laser data combined with dense image matching for archaeological information extraction*, Actes du colloque *International Committee of Architectural Photogrammetry*, Volume IV-2/W2, Ottawa, p. 203- 211.
- POUX, F., NEUVILLE, R., HALLOT, P., VAN WERSH, L., LUCZFALVY JANCSÓ, A. et BILLEN, R., 2017, *Digital investigations of an Archeological smart point cloud. A real time web-based platform to manage the visualisation of semantical queries*, Actes du colloque *International Committee of Architectural Photogrammetry*, Volume XLII-5/W1, Florence, p. 581-588.
- POUX, F., NEUVILLE, R., VAN WERSCH, L., NYS, G.-A., et BILLEN, R., 2017, *3D point clouds in archeology. Advances in acquisition, processing and knowledge integration applied to quasi-planar objects*, dans *Geosciences*, 7 (96), Orléans.
- ROUQUETTE, E., 2019, *Les poèmes de Théodulf. Témoins de leur époque ?*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre.
- *Saint-Benoit-Sur-Loire ; Germigny-des-Prés*. 1970, La France illustrée, Paris.
- SALET, F., 1955, *L'église de Germigny-des-Prés*, dans *Bulletin monumental*, Tome 113, Paris, p. 127-128.
- SAPIN, CH., BÜTTNER, S. et AUMARD, S., 2019, *Germigny-des-Prés. Nouvelles observations archéologiques sur le bâti*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre.
- SAPIN, CH., 2016, *Oratoires et chapelles, domus et villae. Une origine des monastères*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°10/ 2016, Auxerre.
- SAPIN, CH., (dir.), 2019, *Germigny-des-Prés (Loiret). L'oratoire carolingien*, Auxerre.
- SAPIN, CH., 2019, *Germigny-des-Prés. Un nouveau regard*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre.
- SHOTT, M., 2014, *Digitizing archaeology. A subtle revolution in analysis*, dans *World Archaeology*, Vol. 46 (1), London.

- TEMIZER, T., NEMLI, G., EKIZCE, E., DEMIR, S., BAYRAM, B., ASKIN, F.-H., COBANOGLU, A.-V. ET YILMAZ, H.-F., 2013, *3D Documentation of a historical monument using terrestrial laser scanning case study. Byzantine Water Cistern, Istanbul*, Actes du colloque *International Committee of Architectural Photogrammetry*, Volume XL-5/W, Strasbourg, p. 623-628.
- TIGNOLET, C., 2019, *Théodulf et Orléans*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre.
- TREFFORT, C., 2019, *Les inscriptions de Germigny et la production épigraphique de Théodulf d'Orléans*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre.
- VAN WERSCH, L., KRONZ, A., SIMON, K., HOCQUET, F.-P. et STRIVAY, D., 2019, *les matériaux des mosaïques de Germigny-des-Prés*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre.
- VAN WERSCH, L., HENRION F., POULAIN G., HOCQUET F.-P. et SAPIN, CH., 2019, *Germigny-des-Prés (45-Loiret). Oratoire. Rapport d'intervention*, s.l.
- WEISSBERG J.-L., 1998, *Le déplacement virtuel de Lascaux*, dans *Publics et Musées*, n°13, « nouvelles technologies, musées », Avignon, p. 129-145.

8) Webographie :

- <https://all3dp.com/fr/1/meilleur-logiciel-architecture-3d/>, consulté le 13 Juillet 2020.
- <https://www.becad.net>, consulté le 22 Juillet 2020.
- <https://www.becad.net/index.php/formation-a-microstation-connect-edition/>, consulté le 8 Août 2020.
- <https://www.bentley.com/fr/products/brands/pointools>, consulté le 22 Juillet 2020.
- <https://www.bentley.com/fr/products/product-line/modeling-and-visualization-software/microstation>, consulté le 22 Juillet 2020.
- <https://www.bentley.com/fr/products/product-line/reality-modeling-software/bentley-descartes>, consulté le 22 Juillet 2020.
- <http://biblus.accasoftware.com/fr/quest-ce-que-cest-le-hbim-le-bim-applique-aux-batiments-existants/>, consulté le 20 Juillet 2020.
- <https://cordis.europa.eu/article/id/413514-3d-models-explore-our-built-cultural-heritage-through-time-onsite-and-remotely/fr>, consulté le 15 Juillet 2020.
- http://foto.insa.free.fr/Ressources/Stéréo_parisel.pdf, consulté le 1^{er} Juillet 2020.
- <https://www.geo-plus.com/visionlidar365/?lang=fr>, consulté le 15 Juillet 2020.
- <http://www.grottesdufoulon.sitew.com>, consulté le 27 juillet 2019.
- <https://www.imag-ing.com/le-laser-scanning-3d-ou-lasergrammetrie>, consulté le 3 Juillet 2020.
- <https://www.inception-project.eu/en/results/3d-models>, consulté le 15 Juillet 2020.
- <https://knowledge.autodesk.com/fr/support/autocad/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/FRA/AutoCAD-Core/files/GUID-84E193D7-A18D-4EE2-B978-19E4AFBCAEEC-htm.html>, consulté le 7 août 2020.
- <https://leica-geosystems.com/fr-fr/products/laser-scanners/software/leica-cyclone>, consulté le 22 Juillet 2020
- <https://leica-geosystems.com/fr-be/products/laser-scanners/scanners/blk360>, consulté le 13 Juillet 2020.
- <https://leica-geosystems.com/fr-fr/products/laser-scanners/scanners/leica-scanstation-p40--p30>, consulté le 22 Juillet 2020.
- http://www.map.cnrs.fr/?portfolio_page=pavage-3-3-22-2-2, consulté le 15 Juillet 2020.
- https://raan.hypotheses.org/files/2016/02/Photoscan_ModeEmploi_2015.pdf, consulté le 15 juillet 2020.
- <https://www.topographie-laser.eu/scanner-laser-scanner-3d-leica-blk360.html>, consulté le 13 Juillet 2020.
- <https://3dwarehouse.sketchup.com>, consulté le 15 juillet 2020.

9) Table des figures :

- **Fig. 1.** France. Carte actuelle du territoire. (<http://www.cartesfrance.fr/Germigny-des-Prés-45110/carte-Germigny-des-Prés.html>, téléchargé le 10 août 2020.) _____ **p. 5.**
- **Fig. 2.** Saint-Benoit-sur-Loire. Abbaye bénédictine de Fleury. Vue extérieure de la tour-porche depuis l'ouest. 11ème siècle. (LAMBRIGTS, R., 2019) _____ **p. 5.**
- **Fig. 3.** Sully-sur-Loire. Château de Sully-sur-Loire. Vue de la cour intérieure depuis l'ouest. 12ème siècle. (LAMBRIGTS, R., 2019.) _____ **p. 6.**
- **Fig. 4.** Germigny-des-Prés. Oratoire de Théodulf. Vue extérieure depuis le sud-ouest. Fin 8^e- début 9^e siècles. (LAMBRIGTS, R., 2019.) _____ **p. 7.**
- **Fig. 5.** Châteaudrun. Grotte de Foulon, Vue intérieure. (<http://www.grottesdufoulon.siteweb.com>, téléchargé le 28 juillet 2020.) _____ **p. 9.**
- **Fig. 6.** Arcy-sur-Sure. Grotte du sanctuaire. Vue intérieure du sud-est. (BUTAEYE, D., <https://www.bourgogne-tourisme.com/a-voir-a-faire/nature/sites-naturels/PCUBOU0890000169/detail/arcy-sur-cure/grottes-d-arcy-sur-cure>, téléchargé le 27 juillet 2020.) _____ **p. 9.**
- **Fig. 7.** Pithiviers-la-Vieille. Thermes. Vue extérieure. (FONTAINE, A., <https://www.inrap.fr/se-baigner-travailler-prier-pithiviers-le-vieil-4290>, téléchargé le 8 août 2020.) _____ **p. 10.**
- **Fig. 8.** Germigny-des-Prés. Chapiteau nord à l'entrée du chœur. Vue du sol depuis le nord-ouest. s.d. (TREFFORT, C., 2019, *Les inscriptions de Germigny et la production épigraphique de Théodulf d'Orléans*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 2.) _____ **p. 11.**
- **Fig. 9.** Germigny-des-Prés. Relevé d'un modillon du Haut-Moyen-Age. Fin 8^e- début 9^e siècles. (Réalisé par le CEM d'Auxerre) (VAN WERSCH, L. et al., 2019, *Germigny-des-Prés (45-Loiret). Oratoire. Rapport d'intervention*, s.l., p. 66) _____ **p. 14.**
- **Fig. 10.** Aix-la-Chapelle. Chapelle palatine. Vue extérieure depuis le nord, Fin 8^e-début 9^e siècles. (SHRÖDER, B., <https://www.aachen-tourismus.de/fr/decouvrir/sites-incontournables/la-cathedrale-daix-la-chapelle/>, téléchargé le 8 août 2020.) _____ **p. 15.**
- **Fig. 11.** Germigny-des-Prés. Relevé d'un modillon du Haut-Moyen-Age. Fin 8^e- début 9^e siècles. (Réalisé par le CEM d'Auxerre) (VAN WERSCH, L. et al., 2019, *Germigny-des-Prés (45-Loiret). Oratoire. Rapport d'intervention*, s.l., p. 90) _____ **p. 16.**

- **Fig. 12.** Germigny-des-Prés. Résultats des prospections radars de l'église. (CAMERLYNCK, CH., SAPIN, CH. et VAN WERSCH, L., 2019, *L'archéologie à Germigny. Des sondages aux prospections*, dans SAPIN, CH., (dir.), 2019, *Germigny-des-Prés (Loiret). L'oratoire carolingien*, Auxerre, p. 25.) _____ **p. 17.**
- **Fig. 13.** Germigny-des-Prés. Plan de l'église de Germigny-des-Prés de 1930 d'après Jean Hubert. Congrès archéologique de France de 1930. Fin 8e-début 9e siècles. (CHEVALIER, P., 2019, *Une architecture originale ?*, dans SAPIN, CH., (dir.), 2019, *Germigny-des-Prés (Loiret). L'oratoire carolingien*, Auxerre, p. 24.) _____ **p. 18.**
- **Fig. 14.** Aix-la-Chapelle. Plan de la chapelle palatine d'Aix-la-Chapelle. Début 8e-fin 9e siècles. (Encyclopaedia Britannica, 1911, 11e éd., vol. 2, Londres, p. 405.) _____ **p. 19.**
- **Fig. 15.** Baragan. Plan de l'église Saint-Jean. 7e siècle. (CHEVALIER, P., 2019, *Germigny, une architecture originale ?*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 8) _____ **p. 20.**
- **Fig. 16.** Vagarchapat. Plan de la cathédrale Sainte-Etchmiadzine. 5e siècle. (CHEVALIER, P., 2019, *Une architecture originale ?*, dans SAPIN, CH., (dir.), 2019, *Germigny-des-Prés (Loiret). L'oratoire carolingien*, Auxerre, p. 22.) _____ **p. 20.**
- **Fig. 17.** Mambrillas de Lara. Plan de l'église Sainte-Marie de Quintanilla de Las Vinas. 8e siècle. (<https://www.wga.hu/support/plans/zzzarchi/08c/5/vinas.html>, téléchargé le 7 août 2020.) _____ **p. 21.**
- **Fig. 18.** El Campillo. Plan de l'église de San Pedro la Nave. 8e siècle. (<https://www.wga.hu/support/plans/zzzarchi/08c/5/campillo.html>, téléchargé le 7 août 2020.) _____ **p. 21.**
- **Fig. 19.** Thessalonique. Plan de l'Hosios de David. 6e siècle. (CHEVALIER, P., 2019, *Germigny, une architecture originale ?*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p.10.) _____ **p. 22.**
- **Fig. 20.** Terrassa. Plan de l'église Sant-Miguel. 9e siècle. (CHEVALIER, P., 2019, *Germigny, une architecture originale ?*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p.12.) _____ **p. 22.**
- **Fig. 21.** DELTON, A., *Eglise de Germigny-des-Prés*, 1841, Charenton-le-pont, Médiathèque de l'architecture et du patrimoine, Aquarelle, 82/45, vue générale. (CROUTELLE, J., 2019, *Regard sur une construction fameuse. L'église de Germigny-des-Prés à l'épreuve des sources*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p.12.) _____ **p. 24.**

- **Fig. 22.** Germigny-des-Prés. Sondage 2. Articulation entre l'abside orientale et l'absidiole nord. Fin 8e- début 9e siècles. Vue extérieure depuis l'est. (Réalisé par le CEM d'Auxerre) (VAN WERSCH, L. et al., 2019, *Germigny-des-Prés (45-Loiret). Oratoire. Rapport d'intervention*, s.l., p. 43)_____ **p. 32.**
- **Fig. 23.** Germigny-des-Prés. Relevé du sondage 2. Fin 8e- début 9e siècles. (VAN WERSCH, L. et al., 2019, *Germigny-des-Prés (45-Loiret). Oratoire. Rapport d'intervention*, s.l., p. 39.)_____ **p. 33.**
- **Fig. 24.** DELTON, A., *Eglise de Germigny-des-Prés*, 1841, Charenton-le-pont, Médiathèque de l'architecture et du patrimoine, crayon, 82/45, vue du sud-ouest. (CROUTELLE, J., 2019, *Regard sur une construction fameuse. L'église de Germigny-des-Prés à l'épreuve des sources*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 11.)_____ **p. 35.**
- **Fig. 25.** Germigny-des-Prés. Orthophotographie du chevet oriental de l'oratoire et du sondage ouvert en 2019. Fin 8e- début 9e siècles. (VAN WERSCH, L. et al., 2019, *Germigny-des-Prés (45-Loiret). Oratoire. Rapport d'intervention*, s.l., p. 26).____ **p. 36.**
- **Fig. 26.** Germigny-des-Prés. Fragments de tegulae du Haut-Moyen-Age. Fin 8e- début 9e siècles. (Réalisé par le CEM d'Auxerre) (VAN WERSCH, L. et al., 2019, *Germigny-des-Prés (45-Loiret). Oratoire. Rapport d'intervention*, s.l., p. 55)_____ **p. 37.**
- **Fig. 27.** Germigny-des-Prés. Fragment d'imbrex du Haut-Moyen-Age. Fin 8e- début 9e siècles. (Réalisé par le CEM d'Auxerre) (VAN WERSCH, L. et al., 2019, *Germigny-des-Prés (45-Loiret). Oratoire. Rapport d'intervention*, s.l., p. 46)_____ **p. 37.**
- **Fig. 28.** Germigny-des-Prés. Arc en mitre retrouvé sous les enduits extérieurs du mur sud. c.a. 11e siècle. (SAPIN, CH. et BÜTTNER, S., 2019, *Une construction de pierre*, dans SAPIN, CH., (dir.), 2019, *Germigny-des-Prés (Loiret). L'oratoire carolingien*, Auxerre, p. 31.)_____ **p. 38.**
- **Fig. 29.** LISCH, J., *Projet de restauration de l'abside occidentale de Germigny-des-Prés*, 1873, Charenton-le-Pont, Médiathèque de l'architecture et du patrimoine, aquarelle, 45/59, vue de l'ouest. (CROUTELLE, J., 2019, *Regard sur une construction fameuse. L'église de Germigny-des-Prés à l'épreuve des sources*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p.9.)_____ **p. 39.**
- **Fig. 30.** BOUET, G., *vue intérieure depuis l'est de l'église de Germigny-des-Prés*, 1868, dessin publié dans « L'église de Germigny-des-Prés », dans 59e Congrès archéologique de France, 1894, Paris, p. 254-271. (CROUTELLE, J., 2019, *Regard sur une construction*

- fameuse. L'église de Germigny-des-Prés à l'épreuve des sources*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 15.)_____ **p. 40.**
- **Fig. 31.** Germigny-des-Prés. Mosaïque du cul-de-four de l'abside orientale. Vue depuis le sol. Fin 8e-début 9e siècles. (POILPRÉ, A.-O, 2019, *le décor intérieur de l'oratoire et son iconographie*, dans SAPIN, CH., (dir.), 2019, *Germigny-des-Prés (Loiret). L'oratoire carolingien*, Auxerre, p. 43.)_____ **p. 41.**
 - **Fig. 32.** FOURNIER LE JEUNE, *mosaïque E*, 1869, Orléans, Musée historique et archéologique de l'Orléanais. Aquarelle (?). (CROUTELLE, J., 2019, *Regard sur une construction fameuse. L'église de Germigny-des-Prés à l'épreuve des sources*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 23.)_____ **p. 42.**
 - **Fig. 33.** Germigny-des-Prés. Détails de l'arcature aveugle de l'abside occidentale de l'oratoire. Vue depuis le sol. Fin 8e-début 9e siècles. (BERTHOLON, B., 2019, *le décor sculpté. Le stuc*, dans SAPIN, CH., (dir.), 2019, *Germigny-des-Prés (Loiret). L'oratoire carolingien*, Auxerre, p. 39.)_____ **p. 42.**
 - **Fig. 34.** Fragment concave d'une niche ou d'une baie. Stuc. Germigny-des-Prés. Musée historique et archéologique de l'Orléanais. Fin 8e- début 9e siècles. (BERTHOLON, B., 2019, *le décor sculpté. Le stuc*, dans SAPIN, CH., (dir.), 2019, *Germigny-des-Prés (Loiret). L'oratoire carolingien*, Auxerre, p. 38.)_____ **p. 43.**
 - **Fig. 35.** Fragments de plaques ornementales. Stuc (en haut) et pierre (en bas). Germigny-des-Prés. Musée historique et archéologique de l'Orléanais. Fin 8e-début 9e siècles. (BERTHOLON, B., 2019, *le décor sculpté. Le stuc*, dans SAPIN, CH., (dir.), 2019, *Germigny-des-Prés (Loiret). L'oratoire carolingien*, Auxerre, p. 41.)_____ **p. 43.**
 - **Fig. 36.** Chapiteau sud authentique du bas-côté est, Pierre. Germigny-des-Prés. Vue depuis le sol. Fin 8e-début 9e siècles. (HEBER-SUFFRIN, F., 2019, *Germigny, le décor sculpté. La pierre*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 9.)_____ **p. 44.**
 - **Fig. 37.** BOUET, G., *Bas-côté sud. Chapiteau est*, s.d. (19e siècle), Orléans, Musée archéologique et historique de l'Orléanais. Vue de face. (HEBER-SUFFRIN, F., 2019, *Germigny, le décor sculpté. La pierre*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p. 12.)_____ **p. 44.**
 - **Fig. 38.** Germigny-des-Prés. Sondage 2. Vue depuis l'est. Fin 8e- début 9e siècles. (Réalisé par le CEM d'Auxerre) (VAN WERSCH, L. et al., 2019, *Germigny-des-Prés (45-Loiret). Oratoire. Rapport d'intervention*, s.l., p. 57)_____ **p. 46.**

- **Fig. 39.** DELTON, A., *Plan de l'église de Germigny-des-prés*, 1841, Charenton-le-Pont, Médiathèque de l'architecture et du patrimoine, encre et crayon sur papier, 82/45. (CROUTELLE, J., 2019, *Regard sur une construction fameuse. L'église de Germigny-des-Prés à l'épreuve des sources*, dans *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre*, Hors-Série n°11, Auxerre, p.13.)_____ **p. 47.**
- **Fig. 40.** Germigny-des-Prés. Sondage 2. Relevé d'un contrefort. Vue depuis le nord. c.a. 11e siècle. (Réalisé par le CEM d'Auxerre) (VAN WERSCH, L. et al., 2019, *Germigny-des-Prés (45-Loiret). Oratoire. Rapport d'intervention*, s.l., p. 42.) ____ **p. 49.**
- **Fig. 41.** LISCH, J., *Plan indiquant les parties à conserver, à détruire ou à reconstruire*, ap. 1866, Charenton-le-Pont, Médiathèque de l'architecture et du patrimoine (?), encre sur papier. (CROUTELLE, J., 2019, *Historiographie et restaurations*, dans SAPIN, CH., (dir.), 2019, *Germigny-des-Prés (Loiret). L'oratoire carolingien*, Auxerre, p. 9.)_ **p. 50.**
- **Fig. 42.** Germigny-des-Prés. Façade occidentale de l'oratoire de Germigny-des-Prés. Vue extérieure aérienne depuis l'ouest. Fin 8e-début 9e siècles. (CHEVALIER, P., 2019, *une architecture originale ?*, dans SAPIN, CH., (dir.), 2019, *Germigny-des-Prés (Loiret). L'oratoire carolingien*, Auxerre, p. 20.)_____ **p. 53.**
- **Fig. 43.** Germigny-des-Prés. Vue du sanctuaire et du chœur depuis la nef. Vue intérieure depuis l'ouest. Fin 8e-début 9e siècles. (HÉBER-SUFFRIN, F., 2019, *Le décor sculpté. La pierre*, dans SAPIN, CH., (dir.), 2019, *Germigny-des-Prés (Loiret). L'oratoire carolingien*, Auxerre, p. 32.)_____ **p. 53.**
- **Fig. 44.** Germigny-des-Prés. Nef depuis le sanctuaire. Vue intérieure depuis l'est. Fin 8e-début 9e siècles. (HÉBER-SUFFRIN, F., 2019, *Le décor sculpté. La pierre*, dans SAPIN, CH., (dir.), 2019, *Germigny-des-Prés (Loiret). L'oratoire carolingien*, Auxerre, p. 32.)_____ **p. 54.**
- **Fig. 45.** Germigny-des-Prés. Vue générale de l'oratoire. Vue aérienne zénithale. Fin 8e-début 9e siècles. (CAMERLYNCK, CH., SAPIN, CH. et VAN WERSCH, L., 2019, *L'archéologie à Germigny. Des sondages aux prospections*, dans SAPIN, CH., (dir.), 2019, *Germigny-des-Prés (Loiret). L'oratoire carolingien*, Auxerre, p. 26.)_____ **p. 55.**
- **Fig. 46.** Germigny-des-Prés. Orthophotographie de la façade sud du sanctuaire de l'oratoire. Vue depuis le sud. Fin 8e- début 9e siècles. (Réalisé par le CEM d'Auxerre) (VAN WERSCH, L. et al., 2019, *Germigny-des-Prés (45-Loiret). Oratoire. Rapport d'intervention*, s.l., p. 86)_____ **p. 56.**
- **Fig. 47.** Germigny-des-Prés. Vue de l'est de l'oratoire. Vue extérieure depuis le nord-est. Fin 8e-début 9e siècles. (CROUTELLE, J., 2019, *Quelle origine pour Germigny ?*,

- dans SAPIN, CH., (dir.), 2019, *Germigny-des-Prés (Loiret). L'oratoire carolingien*, Auxerre, p. 18.)_____ **p. 56.**
- **Fig. 48.** Exemple de chambres métriques. 1972. ICOMOS. (HÉNO, R., et CHANDELLIER, L., 2014, *Numérisation 3D de bâtiments. Cas des édifices remarquables*,« Collection SIG et intelligence territoriale », Londres, p. 33.)_____ **p. 61.**
 - **Fig. 49.** Exemple de poste de traitement photogrammétrique analogique Planimat, Zeiss). S.l.n.d. (HÉNO, R. et CHANDELLIER, L., 2014, *Numérisation 3D de bâtiments. Cas des édifices remarquables*,« Collection SIG et intelligence territoriale », Londres, p. 34.)_____ **p. 62.**
 - **Fig. 50.** Exemple de poste de traitement photogrammétrique analytique (SD 2000, Leica). S.n.l.d. (HÉNO, R. et CHANDELLIER, L., 2014, *Numérisation 3D de bâtiments. Cas des édifices remarquables*,« Collection SIG et intelligence territoriale », Londres, p. 34.) _____ **p. 62.**
 - **Fig. 51.** Exemple de maillage de polygones. 2010. Ministère de la culture et DRAC Aquitaine. (MAUMONT, M., 2010, *L'espace 3D. de la photogrammétrie à la lasergrammétrie*, dans *in situ*, 13/ 2010, Paris, p. 4.)_____ **p. 66.**
 - **Fig. 52.** Exemple de maillage surfacé. 2010. Ministère de la culture et DRAC Aquitaine. (MAUMONT, M., 2010, *L'espace 3D. de la photogrammétrie à la lasergrammétrie*, dans *in situ*, 13/ 2010, Paris, p. 4.)_____ **p. 66.**
 - **Fig. 53.** Exemple de maillage texturé. 2010. Ministère de la culture et DRAC Aquitaine. (MAUMONT, M., 2010, *L'espace 3D. de la photogrammétrie à la lasergrammétrie*, dans *in situ*, 13/ 2010, Paris, p.5.)_____ **p. 66.**
 - **Fig. 54.** Avila. Modèle texturé d'une des sections du mur intérieur de la ville. 2017. (Agisoft Metashape) (ALIBERTI, L. et IGLESIAS PICAZO, P., 2019, *Close-Range photogrammetry practice. Graphic documentation of the interior of the walls of Avila (Spain)*, actes du colloque *International Committee of Architectural Photogrammetry*, XLII-2/W15, Avila, p. 51.)_____ **p. 67.**
 - **Fig. 54.** Bosra Al-Sham. Orthophotographie de la porte ouest de la ville. 2018. (Agisoft Metashape) (AL KHALIL, O. et GRUSSENMEYER, P., 2019, *2D & 3D reconstruction workflows from archive images, case study of damaged monuments in Bosra Al-Sham City (Syria)*, actes du colloque *International Committee of Architectural Photogrammetry*, XLII-2/W15, Avila, p. 59.)_____ **p. 68.**

- **Fig. 55.** Schéma simplifié du fonctionnement d'un scanner laser. 2014. (HÉNO, R. et CHANDELIER, L., 2014, *Numérisation 3D de bâtiments. Cas des édifices remarquables*, « Collection SIG et intelligence territoriale », Londres, p.83.)_____ **p. 73.**
- **Fig. 56.** Schéma simplifié du fonctionnement d'un scanner laser à temps de vol. 2014. (HÉNO, R. et CHANDELIER, L., 2014, *Numérisation 3D de bâtiments. Cas des édifices remarquables*, « Collection SIG et intelligence territoriale », Londres, p.84.)____ **p. 75.**
- **Fig. 57.** Schéma simplifié du fonctionnement d'un scanner laser à décalage de phase. 2014. (HÉNO, R. et CHANDELIER, L., 2014, *Numérisation 3D de bâtiments. Cas des édifices remarquables*, « Collection SIG et intelligence territoriale », Londres, p.84.)_____ **p. 75.**
- **Fig. 58.** Schéma simplifié du fonctionnement d'un scanner laser triangulation optique. 2014. (HÉNO, R. et CHANDELIER, L., 2014, *Numérisation 3D de bâtiments. Cas des édifices remarquables*, « Collection SIG et intelligence territoriale », Londres, p.84.)_____ **p. 75.**
- **Fig. 59.** Aix-la-Chapelle, Reconstitution 3D du complexe palatiale d'Aix-la-Chapelle. 2015. Cologne. (KÖBE, A., RISTOW, S. et VASAROS, Z., 2017, *Modell der Pfalz Karls des GroBen in Aachen*, dans STIEGEMANN, CH., dir., 2017, *Wunder Roms Im Blick des Nordens Von der Antike bis zur Gegenwart*, Catalogue II, Paderborn, p. 328)____ **p. 77.**
- **Fig. 60.** Istanbul. Reconstitution 3D des citernes byzantine de Sarnicli Han. 2013, Istanbul. (Geomagic) (TEMIZER, T., NEMLI, G., EKIZCE, E., DEMIR, S., BAYRAM, B., ASKIN, F.-H., COBANOGU, A.-V. et YILMAZ, H.-F., 2013, *3D Documentation of a historical monument using terrestrial laser scanning case study. Byzantine Water Citerne, Istanbul*, Actes du colloque *International Committee of Architectural Photogrammetry*, Volume XL-5/W, Strasbourg, p. 625.)_____ **p. 78.**
- **Fig. 61.** Germigny-des-Prés. Reconstitution 3D de la mosaïque occidentale. Vue du dessus. 2017. Département de géomatique de l'Université de Liège. Liège. (Context capture) (POUX, F., NEUVILLE, R. et BILLEN, R., 2017, *Point cloud classification of tesserae from terrestrial laser data combined with dense image matching for archaeological information extraction*, Actes du colloque *International Committee of Architectural Photogrammetry*, Volume IV-2/W2, Ottawa, p. 205)_____ **p. 83.**
- **Fig. 62.** Germigny-des-Prés. Nuage de points avec écart de 1cm de l'édifice retravaillé. 2016. Liège. (Retravaillé par HALLOT, P.) (source : LAMBRIGTS, R., 2019)____ **p. 87.**
- **Fig. 63.** Exemple de classification de points. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)_____ **p. 91.**

- **Fig. 64.** Germigny-des-Prés. Reconstitution 3D de la façade occidentale de l'oratoire. Vue extérieure de face. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)_____ **p. 95.**
- **Fig. 65.** Germigny-des-Prés. Détails des reconstitutions 3D des corbeaux du mur sud de l'oratoire. Vue extérieure depuis le sol. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)_____ **p. 96.**
- **Fig. 66.** Germigny-des-Prés. Reconstitutions 3D de la nef et de la façade occidentale de l'oratoire. Vue extérieure oblique depuis le sud-ouest. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)_____ **p. 96.**
- **Fig. 67.** Germigny-des-Prés. Reconstitutions 3D du porche sud de l'oratoire. Vue extérieure oblique depuis le sud-ouest. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)_____ **p. 97.**
- **Fig. 68.** Germigny-des-Prés. Reconstitutions 3D de la nef, de la façade occidentale et du porche sud de l'oratoire. Vue extérieure oblique depuis le sud-ouest. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)_____ **p. 97.**
- **Fig. 69.** Germigny-des-Prés. Encombrement de la sacristie présent dans le nuage de points. Vue intérieure depuis le nord. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)_____ **p. 98.**
- **Fig. 70.** Germigny-des-Prés. Reconstitutions 3D simplifié de l'accès à la chaire de vérité depuis la sacristie. Vue intérieure depuis le nord. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)_____ **p. 98.**
- **Fig. 71.** Germigny-des-Prés. Reconstitutions 3D du mur nord de la nef au niveau de la sacristie avec l'accès à la pièce (à droite) et l'accès à la chaire de vérité (à gauche). Vue intérieure depuis le sud. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)_____ **p. 99.**
- **Fig. 72.** Germigny-des-Prés. Reconstitutions 3D de la baie ouest de la sacristie. Vue extérieure oblique depuis le nord. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)_____ **p. 99.**
- **Fig. 73.** Germigny-des-Prés. Reconstitutions 3D de la nef, de la façade occidentale, du porche sud et de la sacristie de l'oratoire. Vue extérieure zénithale depuis le nord-est. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)_____ **p. 100.**
- **Fig. 74.** Germigny-des-Prés. Reconstitutions 3D de la nef, de la façade occidentale, du porche sud et de la sacristie de l'oratoire. Vue extérieure oblique depuis le nord-est. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)_____ **p. 100.**

- **Fig. 75.** Germigny-des-Prés. Reconstitution 3D de l'abside septentrionale. Vue extérieure depuis le nord-est. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)___ **p. 102.**
- **Fig. 76.** Germigny-des-Prés. Reconstitution 3D de l'abside méridionale. Vue extérieure depuis le sud-ouest. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)_____ **p. 102.**
- **Fig. 77.** Germigny-des-Prés. Reconstitution 3D de l'abside orientale. Vue extérieure depuis l'est. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)_____ **p. 102.**
- **Fig. 78.** Germigny-des-Prés. Reconstitution 3D de l'abside septentrionale. Détails de la voûte en cul-de-four. Vue intérieure depuis le sud. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)_____ **p. 105.**
- **Fig. 79.** Germigny-des-Prés. Reconstitution 3D de l'abside orientale. Détail de la voûte en cul-de-four. Vue intérieure oblique depuis l'ouest. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)_____ **p. 106.**
- **Fig. 80.** Germigny-des-Prés. Reconstitutions 3D de la nef, de la façade occidentale, du porche sud, de la sacristie et des absides de l'oratoire. Vue extérieure oblique depuis le nord-est. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)_____ **p. 106.**
- **Fig. 81.** Germigny-des-Prés. Reconstitution 3D de la coupole sur pendentif à l'angle nord-ouest du sanctuaire. Vue extérieure oblique depuis le sud-est. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)_____ **p. 108.**
- **Fig. 82.** Germigny-des-Prés. Reconstitutions 3D de la nef, de la façade occidentale, du porche sud, de la sacristie, des absides et du sanctuaire de l'oratoire. Vue extérieure oblique depuis le sud-ouest. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)___ **p. 108.**
- **Fig. 83.** Germigny-des-Prés. Reconstitution 3D de l'entièreté de l'oratoire. Vue extérieure oblique depuis le sud-ouest. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)_____ **p. 109.**
- **Fig. 84.** Germigny-des-Prés. Reconstitution 3D de l'entièreté de l'oratoire avant classification par chantier. Vue extérieure oblique depuis le nord-est. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)_____ **p. 109.**
- **Fig. 85.** Germigny-des-Prés. Reconstitution 3D de l'entièreté de l'oratoire avec classification par chantier. Vue extérieure oblique depuis le sud-ouest. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)_____ **p. 111.**
- **Fig. 86.** Germigny-des-Prés. Reconstitution 3D de l'entièreté de l'oratoire avec classification par chantier. Vue zénithale. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)_____ **p. 111.**

- **Fig. 87.** Germigny-des-Prés. Reconstitution 3D de l'entièreté de l'oratoire avec mise en avant des parties existantes à l'époque carolingienne (en bleu). Vue extérieure oblique depuis le sud-ouest. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)____ **p. 112.**
- **Fig. 88.** Germigny-des-Prés. Reconstitution 3D de l'entièreté de l'oratoire avec mise en avant des parties ajoutées à l'époque romane (en turquoise). Vue extérieure oblique depuis le sud-ouest. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)_____ **p. 113.**
- **Fig. 89.** Germigny-des-Prés. Reconstitution 3D de l'état supposé roman sur base des éléments conservés. Vue extérieure oblique depuis le sud-ouest. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)_____ **p. 113.**
- **Fig. 90.** Germigny-des-Prés. Reconstitution 3D de l'entièreté de l'oratoire avec mise en avant des parties ajoutées au 19^e siècle (en rouge). Vue extérieure oblique depuis le sud-ouest. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)_____ **p. 114.**
- **Fig. 91.** Germigny-des-Prés. Coupe mettant en avant l'arc triple séparant le sanctuaire et la nef de l'oratoire. Vue intérieure depuis l'ouest. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)_____ **p. 118.**
- **Fig. 92.** Germigny-des-Prés. Elévation de la façade occidentale de l'oratoire. Vue extérieure depuis l'ouest. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)____ **p. 118.**
- **Fig. 93.** Germigny-des-Prés. Plan au sol d'une partie de la nef, de la sacristie et du porche de l'oratoire. Vue zénithale. 2019. (Microstation 3D) (LAMBRIGTS, R., 2019)_____ **p. 118.**

10) Table des matières

1) Introduction :	_____	p. 1.
2) Contexte :	_____	p. 5.
<i>a. Germigny-des-Prés : Contexte géographique :</i>	_____	p. 5.
<i>b. Contexte historique du site :</i>	_____	p. 8.
<i>c. L'oratoire : de sa construction à aujourd'hui</i>	_____	p. 13.
<i>d. Théodulf : Un personnage emblématique</i>	_____	p. 26.
3) Identification des différentes phases de construction :	_____	p. 31.
<i>a. Bâtiment primitif : 9e siècle :</i>	_____	p. 31.
<i>b. Bâtiment roman : 11e siècle :</i>	_____	p. 45.
<i>c. Bâtiment moderne : 19e siècle :</i>	_____	p. 51.
4) Modélisation : Généralités :	_____	p. 58.
<i>a. La photogrammétrie :</i>	_____	p. 61.
<i>b. La lasergrammétrie :</i>	_____	p. 71.
<i>c. La combinaison de la photogrammétrie et de la lasergrammétrie :</i>	_____	p. 82.
<i>d. Discussion :</i>	_____	p. 83.
5) Application : propositions des différentes phases de constructions :	_____	p. 86.
<i>a. Préparation :</i>	_____	p. 86.
<i>b. Application :</i>	_____	p. 91.
6) Conclusion :	_____	p. 120.
7) Bibliographie :	_____	p. 127.
8) Webographie :	_____	p. 132.
9) Table des figures :	_____	p. 133.