HAL
open science

“ Lasergrammétrie et photogrammétrie appliquées à l’étude des châteaux médiévaux : le programme franco-italien AVER – des montagnes de châteaux ”

Laurent d’Agostino, Christophe Guffond, Gabriele Sartorio, Olivier Veissière, Andréa Bryer

▶ **To cite this version:**

Laurent d’Agostino, Christophe Guffond, Gabriele Sartorio, Olivier Veissière, Andréa Bryer. “ Lasergrammétrie et photogrammétrie appliquées à l’étude des châteaux médiévaux : le programme franco-italien AVER – des montagnes de châteaux ”. Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection, 2013, 201, pp.13-26. hal-02023969

HAL Id: hal-02023969

https://hal.science/hal-02023969v1

Submitted on 23 Sep 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L’archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d’enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection, n° 201, 2013, p. 13-26.

LASERGRAMMETRIE ET PHOTOGRAMMETRIE APPLIQUEES A L'ETUDE ARCHEOLOGIQUE DES CHATEAUX MEDIEVAUX : LE PROGRAMME FRANCO-ITALIEN AVER – DES MONTAGNES DE CHATEAUX

Laurent d'Agostino[1], Christophe Guffond[2], Gabriele Sartorio[3], Olivier Veissiere[4], Andréa Bryer[5]

1: HADES Rhône-Alpes
3bis rue Gustave Eiffel, 74600 Seynod, France
laurent.dagostino@hades-archeologie.com

2: Service archéologique de la Direction des Affaires Culturelles de la Haute-Savoie
18 avenue du Trésum, 74000 Annecy, France
christophe.guffond@cg74.fr

3: Surintendance des activités et des biens culturels, Région Autonome de la Vallée d'Aoste
12 place Roncas, 11100 Aoste, Italie
g.sartorio@regione.vda.it

4: Olivier Veissière – Patrimoine numérique
414 avenue de Bonatray, 74370 Villaz, France
olivier.veissiere@laposte.net

5: GeoForm sièclea.
Localité Borgnalle 10/L, 11100 Aoste, Italie
bryer@geoform.it

Résumé

Le programme européen **AVER – des montagnes de châteaux (2010-2012)** porte sur le processus d'étude, de restauration et de valorisation des châteaux médiévaux, en particulier les sites en ruine. Des relevés lasergrammétriques et photogrammétriques sont mis en oeuvre sur deux châteaux, l'un en Haute-Savoie (France) et l'autre en Vallée d'Aoste (Italie), dans le but à la fois de réaliser un état des lieux des sites, de servir de support à l'analyse archéologique et, enfin, de préparer des restitutions des bâtiments. Les projets menés de part et d'autre de la frontière franco-italienne sont l'occasion de mettre en parallèle les approches respectives des équipes, confrontées à des environnements et à des états de conservation différents pour chaque site. De fait, cette expérience met en exergue les différences de mise en oeuvre entre les relevés manuels traditionnels et les relevés automatisés, ainsi que les modalités de la collaboration entre archéologues et spécialistes des relevés.

Mots clés : Lasergrammétrie, photogrammétrie, châteaux, archéologie, Moyen Âge, ALCOTRA, modélisation 3D.

Abstract

The European research program AVER – des montagnes de châteaux (2010-2012) focuses on the process of architectural and archaeological survey, restoration and enhancement of medieval castles. 3D-scanning and photogrammetry are used to plot two castles from Haute-Savoie (France) and Aosta Valley (Italy) in order to point the current situation of the sites, to serve for archaeological survey and, at last, to produce images of the former state of the buildings. The projects led on both sides of Franco-Italian border are the opportunity to compare the respectives approaches of the teams, confronted with different environments and states of preservation for each site. As a matter of fact, this experiment gives rise to the execution differences between traditional hand plotting and automatic plotting, as well as the specificity of the collaboration between archaeologists and surveyors.

Keywords : *3D-scanning, photogrammetr, castles, archaeological survey, Middle Age, ALCOTRA, 3D modelling.*

1. Introduction

1.1. Contexte d'étude

L'analyse archéologique et architecturale, qu'elle soit appliquée à l'analyse des élévations ou aux bâtiments découverts en fouille, s'appuie traditionnellement sur des séries de relevés souvent longs et difficiles à mettre en oeuvre. Les contingences de temps et de financement rendent complexe la réalisation de relevés exhaustifs des édifices et limitent les possibilités d'analyse, d'interprétation et de restitution.

Dans le cadre du programme européen Alcotra AVER (Anciens Vestiges En Ruine) – des montagnes de châteaux, les équipes d'archéologues et d'architectes

italiens et français sont confrontées de manière aigüe à cette problématique de mise en oeuvre de relevés détaillés, devant servir de support d'analyse, sur des ensembles monumentaux vastes et complexes. Piloté par la Région Autonome de la Vallée d'Aoste (Italie), ce projet cofinancé par l'Union Européenne associe les communes de Brusson et de Saint-Marcel pour le versant italien et, pour le versant français, le Conseil général de la Haute-Savoie, la Communauté de Communes des Collines du Léman et la Commune d'Allinges. Les recherches archéologiques sont dirigées par les archéologues et architectes de la Surintendance des Biens Culturels de la Vallée d'Aoste (Gabriele Sartorio et Antonio Sergi), du Service départemental d'Archéologie de la Haute-Savoie (Christophe Guffond) et du bureau d'études Hadès (Laurent D'Agostino) (Guffond et D'Agostino, 2010).

Figure 1 : Les territoires d'étude et les sites concernés. Document : L. D'Agostino, Hadès.

Visant à établir et à valider une méthodologie de travail dans le processus d'étude, de restauration et de valorisation des châteaux médiévaux et, en particulier, des sites en ruine, le projet comprend deux principaux axes de recherche:

1. la réalisation d'un état des lieux des sites castraux valdôtains et haut-savoyards dont l'objectif est de constituer un corpus permettant d'appuyer la réflexion méthodologique (Sartorio et Cortelazzo, 2008; D'Agostino et al., 2010a);
2. des études plus poussées sur des sites pilotes (Figure 1), permettant de mettre en pratique et de valider les procédures de recherche et d'analyse. Les sites retenus sont, pour le versant français, les châteaux d'Allinges (Allinges, Haute-Savoie) (Figure 2) (D'Agostino et al., 2010b) et, pour le versant italien, le château de Graines (Brusson, Vallée d'Aoste) (Figure 3).

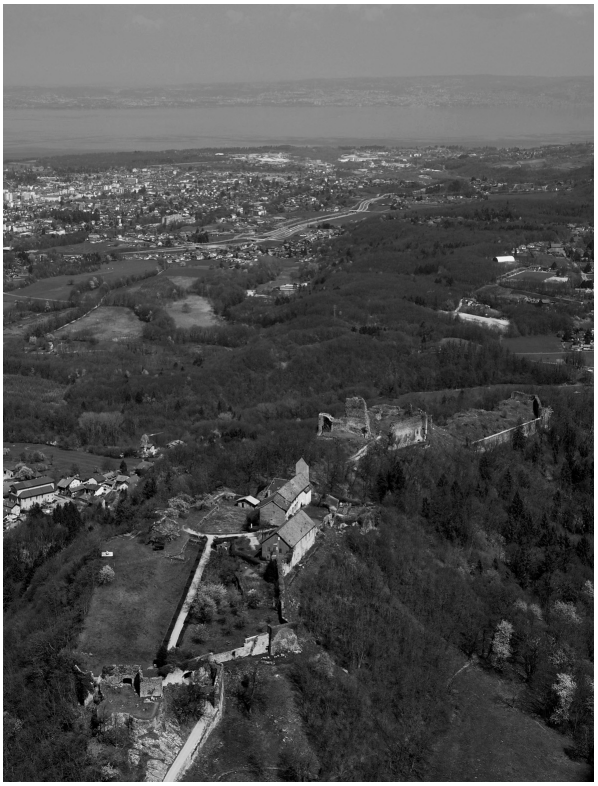

Figure 2 : Vue aérienne générale des châteaux d'Allinges (Haute-Savoie). Cliché : L. D'Agostino, Hadès.

1.2. Les problématiques d'étude et la stratégie de relevé

Concernant l'étude des sites pilotes, les problématiques portaient non seulement sur la réalisation d'états des lieux généraux avant la réalisation des études archéologiques, mais aussi sur la constitution de supports graphiques pour l'analyse du bâti, la définition des zones de fouille à privilégier, la réalisation d'un diagnostic architectural et sanitaire des maçonneries permettant la définition d'un programme de sécurisation et de restauration.

Figure 3 : La tour maîtresse et la chapelle du château de Graines (Brusson, Vallée d'Aoste). Cliché : G. Sartorio, RAVA.

Les objectifs et la méthodologie mis en place ont fait apparaître de manière évidente l'intérêt d'un recours à des techniques de relevé par photogrammétrie et par scanner 3D. Sans pour autant offrir des solutions à tous les contextes d'étude, elles permettent d'accélérer l'acquisition des données sur le terrain et de s'affranchir de certaines contraintes techniques inhérentes au relevé manuel traditionnel.

Ce dernier impose en effet dans la plupart des cas l'installation d'échafaudages et des durées d'intervention sur le terrain très longues, notamment dans le cas d'un relevé archéologique pierre à pierre, entraînant des coûts importants pour une efficacité et une précision peu satisfaisantes sur les grandes surfaces. De plus, du fait de la représentation statique en 2D, il ne permet pas de rendre compte de manière précise des déformations des maçonneries et des contraintes architectoniques exercées sur les édifices.

Outre la réalisation d'une documentation graphique de qualité, l'utilisation conjointe des techniques de lasergrammétrie et de photogrammétrie vise à produire différents types de documents, adaptés aux objectifs des études mises en oeuvre et du contexte particulier de chaque site (état de conservation et couvert végétal).

Des relevés d'ensemble par photogrammétrie aérienne et/ou par lasergrammétrie terrestre ont permis de générer des plans de masse et des modèles 3D, afin de dresser un état des lieux détaillé des sites avant les travaux archéologiques ou de restauration et à fournir des supports d'analyse et d'interprétation. Les relevés lasergrammétriques permettent également de réaliser une sauvegarde virtuelle des sites en ruine par nature sujets à des dégradations rapides. Cette étape était indispensable pour garantir la pérennité des informations, nécessairement altérées par les interventions humaines ultérieures.

Plus ponctuellement, sur les zones privilégiées pour les études de bâti ou les restaurations, des ortho-images, en plan ou en élévation, remplacent parfois avantageusement le relevé pierre à pierre et servent à l'interprétation et à la figuration des unités stratigraphiques ou des phases de construction.

Par ailleurs, le relevé 3D constitue un point de départ intéressant pour la réalisation de restitutions en volumes des différents états d'un édifice ou d'éléments architecturaux disparus. Dans une phase finale du projet, à l'issue de l'intégration des données des études archéologiques dans les représentations graphiques, les documents produits pourront être utilisés dans une perspective de restitution des ensembles architecturaux, mais aussi à des fins de valorisation.

Pour être efficace, la collaboration entre les chercheurs et les spécialistes de la photogrammétrie et de la lasergrammétrie doit cependant être menée, autant que le permettent les contraintes légales dans le cas d'un acheteur public, depuis la définition du projet de relevé jusqu'à l'élaboration des documents finaux, sous peine de voir naître un décalage entre les attentes des uns et les possibilités techniques des autres. Dans cette perspective, la maîtrise des notions et des méthodes de relevé par les archéologues et les architectes au moment de la constitution d'un cahier des charges, d'une part, et la prise en compte des problématiques scientifiques de l'étude par les photogrammètres et lasergrammètres, d'autre part, apparaissent comme les deux pierres angulaires d'une collaboration fructueuse.

2. Château-Vieux des Allinges (Allinges, Haute-Savoie)

2.1. Contexte historique

Installés sur une crête en forme de croissant située sur la rive sud du lac Léman, à proximité de Thonon-les-Bains, les châteaux d'Allinges présentent une configuration originale : ce n'est pas seulement un château qui occupe la crête, mais deux châteaux qui se font face à portée de tir l'un de l'autre, séparés par une faible dépression au milieu de la longueur de la crête rocheuse. Les seigneurs d'Allinges apparaissent dans la documentation écrite à la fin du Xe siècle, date à laquelle ils détiennent en garde des biens appartenant à l'abbaye Saint-Maurice d'Agaune (Valais, Suisse); ces biens, dont la nature exacte nous échappe en grande partie si ce n'est qu'ils se trouvent près du village d'Allinges au début du XIe siècle, passent au XIIe siècle à la maison de Savoie (Blondel, 1956).

Le contexte du dédoublement du site castral reste méconnu. Ils apparaissent ensemble dans la documentation au début du XIIIe siècle seulement, bien après leur édification. Il est envisageable que la construction des deux châteaux d'Allinges soit due à des branches distinctes de la famille d'Allinges et que la configuration des lieux soit donc liée à une forme de coseigneurie.

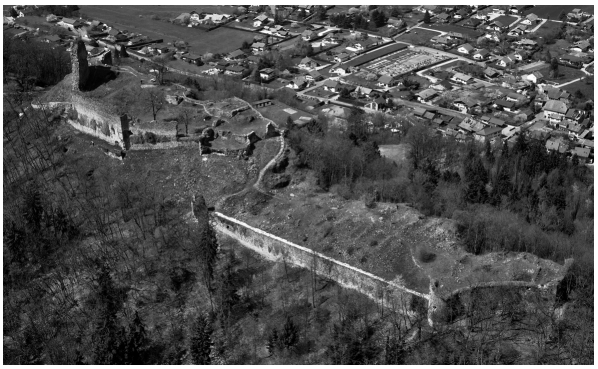

Figure 4 : Vue aérienne de Château-Vieux d'Allinges. Cliché : L. D'Agostino, Hadès.

Au XIIIe siècle, cependant, le lignage d'Allinges n'apparaît plus qu'épisodiquement dans le paysage politique : Château-Neuf se trouve dans les possessions de la maison de Savoie, tandis que Château-Vieux est propriété des sires de Faucigny, puis des Dauphins du Viennois.

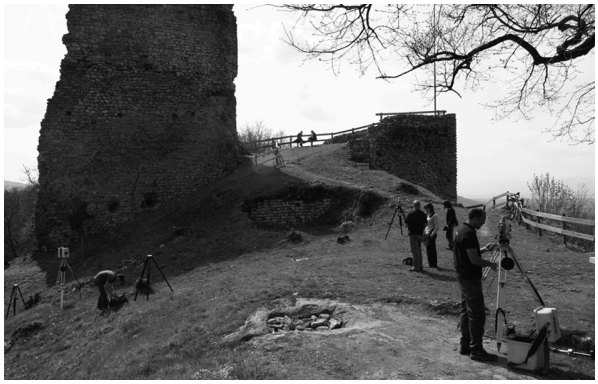

Figure 5 : Relevé lasergrammétrique dans la cour haute de Château-Vieux. Cliché : C. Guffond, SDAHS – DAC CG74.

Pendant la seconde moitié du XIIIe et le XIVe siècle, les deux châteaux sont le théâtre de l'affrontement de ces lignages : pendant près de soixante-dix ans, séparés d'à peine 150 m l'un de l'autre, les deux châteaux d'Allinges sont un point de fixation du conflit delphino-savoyard jusqu'en 1355 (Constant, 1972). À partir de cette date, Château-Vieux est peu à peu abandonné et seul Château-Neuf conserve une fonction résidentielle et militaire.
Château-Vieux se présente comme une ruine imposante de près 200 m de long sur son axe est-ouest pour une largeur maximale de 40 m (Figure 4). La partie supérieure de la cour haute culmine à 705 m d'altitude et les élévations les mieux conservées (le mur bouclier considéré jusqu'à présent comme la "tour maîtresse") atteignent encore jusqu'à 15 m de haut.
L'ensemble du site fait l'objet d'une étude historique et archéologique détaillée regroupant un état des lieux global, une analyse du bâti conservé et des campagnes de fouilles au sol centrées sur le bourg castral de Château-Vieux (D'Agostino et al., 2010b).

2.2. Les objectifs et les méthodes mises en oeuvre

Le projet portant non seulement sur une étude archéologique mais aussi sur la définition d'un programme de restauration et de valorisation du site pilote de Château-Vieux, l'acquisition sur site d'une base documentaire de relevés étendue et polyvalente s'est donc imposée, permettant d'envisager de répondre aux problématiques de chaque acteur et spécialiste.
Les objectifs de relevés furent définis ainsi:

- Topographie du site (1/500ème) pour une surface de l'ordre de 5 hectares, représentative de l'assise de Château-Vieux dans son environnement.
- Numérisation par relevé lasergrammétrique de l'ensemble des structures bâties (résolution de 1 cm) et de l'ensemble intra-muros du bourg castral et de la cour haute (résolution de 2 cm) (Figures 5, 6 et 7).
- Numérisation des fonds de fouille (résolution de 5 mm).
- Coupe et élévation générale du site.
- Élévation et orthophotographie du mur bouclier (improprement appelé tour maîtresse) sujet à restauration et étude approfondie (résolution de 5 mm) (Figure 8).
- Modèle 3D volumétrique du site.

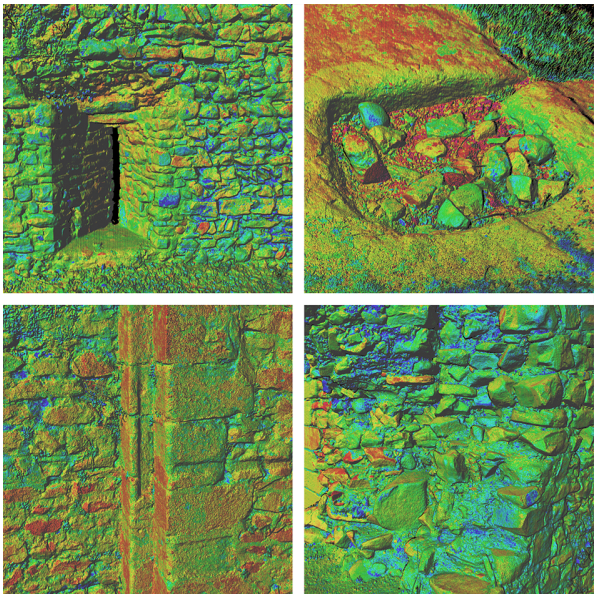

Figure 7 : Vue de détails du relevé lasergrammétrique. Document : Olivier Veissière – Patrimoine numérique.

L'étude archéologique visant à analyser à la fois les élévations et les structures enfouies par le biais de sondages au sol répartis dans le bourg castral et la cour haute, les objectifs de relevés détaillés par méthode lasergrammétrique sont très fortement imprégnés des attentes et besoins de "l'archéologue".
La nature même du projet franco-italien AVER, l'inscrivant dans une démarche de coopération, il a été demandé aux prestataires d'être force de proposition face aux objectifs de relevés et d'études.
Les relevés ont été confiés au groupement Daniel Rostand (Géomètre-Expert - Photogrammètre) – Olivier Veissière (Photogrammètre - Lasergrammètre) suite à leurs approches et propositions face aux objectifs et problématiques de constitution de cette base documentaire de relevés du site.
Le "couple" photogrammétrie/lasergrammétrie a été retenu pour l'acquisition des données. La photogrammétrie aérienne a été mise en oeuvre pour les relevés topographiques au 1/500ème (Figure 9), motivée par l'absence de structures complexes nécessitant des levers au sol et facilitant le relevé dans les fortes pentes tout comme les zones boisées de feuillus. Les phases de prises de vues et de numérisation étaient préconisées

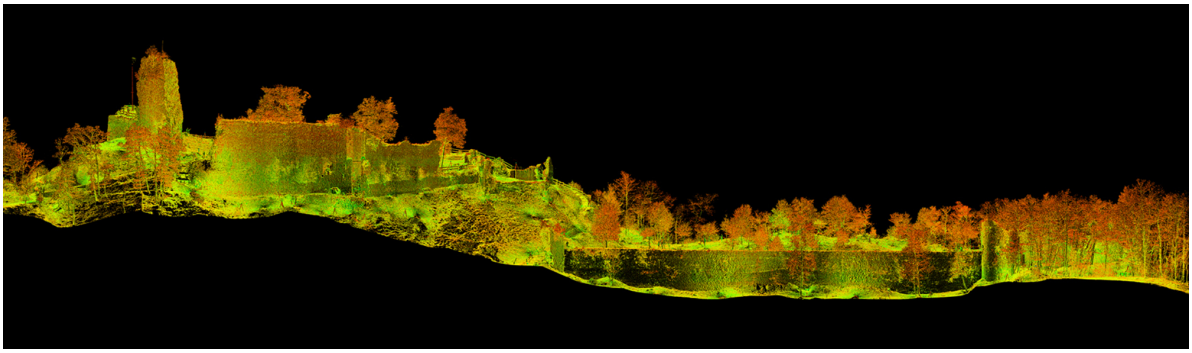

Figure 6 : Vue générale du relevé lasergrammétrique. Document : Olivier Veissière – Patrimoine numérique.

avant la pousse des feuilles et assujetties à un débroussaillage des pieds de structures.

Figure 8 : Élévation et orthophoto sud du mur bouclier. Document : Olivier Veissière – Patrimoine numérique.

La technologie de décalage de phase a été retenue pour les relevés lasergrammétriques, la haute fréquence d'acquisition de cette technologie permettant de densifier aisément la couverture de la numérisation et de réduire les temps d'intervention à la différence d'autres technologies. Il est à noter que la configuration du terrain joue un rôle non négligeable dans ce choix, puisque les portées de numérisation restent accessibles au décalage de phase (portée courte inférieure à 60 m).

Ces deux méthodes de relevé sans contact ont permis l'acquisition des données dans un laps de temps

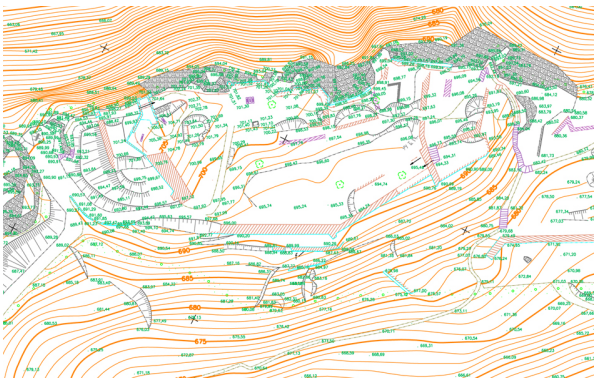

Figure 9 : Extrait du plan photogrammétrique. Document : Daniel Rostand - Géomètre.

d'une semaine tout en s'affranchissant de la mise en oeuvre d'échafaudage et d'équipement spécifique pour les relevés de structures en élévation.

2.3. Données et documents

Bien que l'acquisition des données ait été réalisée dans un temps relativement court, le volume d'informations du relevé lasergrammétrique reste important, soit environ 3 milliards de points pour l'ensemble des 140 stations de numérisation. La totalité des données livrées représentant un volume de 40 Go.
Même si les logiciels et matériels ont gagné en performance ces dernières années, il n'en reste pas moins délicat de manipuler ces données. De plus, par nature, la numérisation 3D reste une information brute, difficilement exploitable sans traitement, rendant la manipulation problématique pour la majorité des archéologues travaillant avec des logiciels de dessin vectoriel 2D.
Afin de faciliter la manipulation des données pour l'ensemble du site, tout comme l'extraction d'information de points 3D, de cotations diverses et surtout d'informations vectorielles de manière quasi automatique, il a été proposé un modèle 3D de plus haute définition (Figure 10) que le modèle 3D volumétrique initialement prévu. Ce modèle est optimisé avec une résolution de maille variant de 1 à 20 cm.
La manipulation en temps réel du modèle 3D du site per-

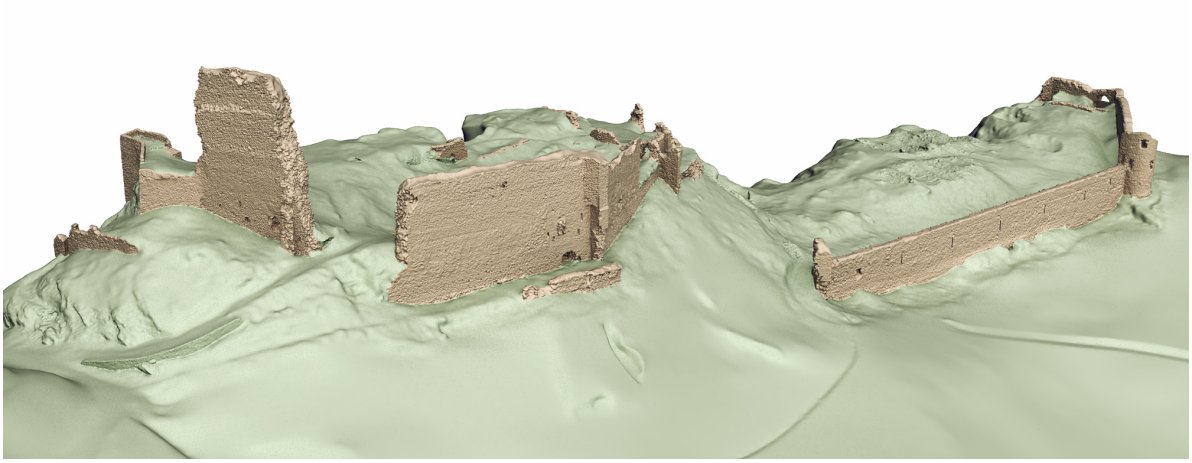

Figure 10 : Modèle 3D du site de Château-Vieux d'Allinges. Document : Olivier Veissière – Patrimoine numérique.

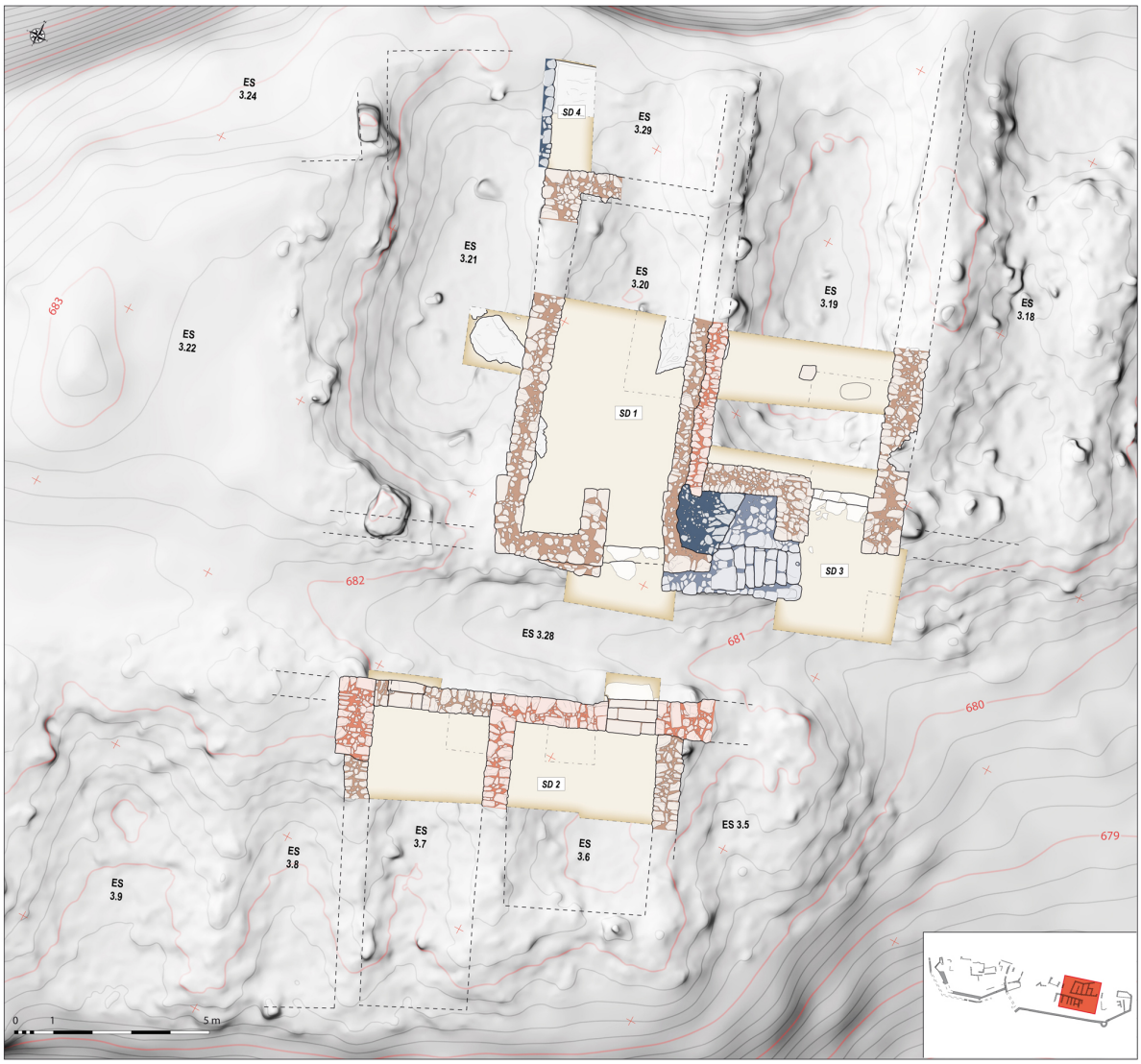

Figure 11 : Plan des structures fouillées en 2010 et intégration du modèle 3D. Document : L. D'Agostino, Hadès / Olivier Veissière – Patrimoine numérique.

met une lecture nettement facilitée à contrario d'une manipulation des nuages de points pour l'ensemble du site, tout comme la visualisation sous "toutes les coutures" du modèle enrichit les interprétations au sol. Des plans allant du 1/50ème pour les fonds de fouille, au 1/100ème et 1/250ème pour des emprises plus larges avec des équidistances de courbes de niveau variant de 5, 20 à 50 cm ont été réalisés ou sont en cours de réalisation afin d'enrichir l'interprétation, l'étude et la mise en valeur de la documentation produite.
Pour assurer le partage et la portabilité des données, l'ensemble des fichiers s'appuie autant que possible sur des formats non propriétaires (DXF, XYZ, OBJ, PLY, TIFF). Une nouvelle campagne de numérisation sera réalisée sur le secteur du bourg castral en 2011 et sur le secteur de la cour haute en 2012 afin de compléter le relevé par les données issues des fouilles archéologiques. Cet ensemble offrira une image tridimensionnelle globale du site avant et après l'intervention archéologique.

2.4. L'exploitation des données

Les données livrées répondent naturellement à une commande précise composée de différents niveaux.
Elles ont servi d'abord à produire des plans et des coupes pour le travail des archéologues (Figure 11) mais aussi pour celui de l'architecte du patrimoine chargé de piloter les travaux de consolidation programmés en 2011 et en 2012.
Les données et plus particulièrement le modèle 3D ouvrent des perspectives d'interprétation du site que n'auraient pas permis dans une telle proportion les observations de terrain classiques.
La dématérialisation du site autorise la production d'une multitude de documents en bureau (coupes, calculs de volumes. . .), tout en offrant la possibilité de réaffecter du temps de terrain pour les archéologues à d'autres travaux relevant davantage de leurs attributions. Fort de ces acquisitions, est également prévue en 2012 une proposition de restitution d'un volume disparu en prenant en compte les informations apportées par les recherches archéologiques et historiques.
Enfin, cette acquisition de données est un état des lieux du site, véritable sauvegarde virtuelle qui permettra, à échéances régulières, de suivre avec finesse son évolution.

3. Le relevé 3D du Castrum Sancti Martini (Brusson, Vallée d'Aoste)

Le but d'un relevé ayant une finalité archéologique, indépendamment de sa nature ou de la technologie utilisée, est toujours celui de fournir une base de données objectives et à tout moment interprétables. Le relevé est notamment indispensable et au service de la recherche, aussi bien quand celle-ci veut comprendre les différentes phases d'évolution d'un site ou d'un monument qu'au moment où la restauration et l'entretien de ces derniers sont envisagés.
Un relevé topographique de qualité représente le point de départ essentiel dans le cadre de l'approche prônée par le projet AVER : la restauration des châteaux sous la direction des institutions valdôtaines, ne peut donc partir que d'une connaissance précise des lieux et des structures conservées. La lasergrammétrie et l'ortho-photogrammétrie, deux technologies de pointe utilisées de manière complémentaire, offrent notamment des avantages évidents en ce qui concerne le temps d'intervention sur le terrain et la qualité des informations fournies et ont ainsi été choisies pour le relevé de différents sites, parmi lesquels le château de Graines à Brusson.

3.1. Contexte historique

La première mention écrite de l'existence d'un castrum Sancti Martini à Graines ne remonte qu'à 1263 à l'occasion de l'inféodation du "mandement de Graines", appartenant à l'abbaye Saint-Maurice d'Agaune, à Godefroy Ier, déjà vicomte d'Aoste et représentant de la noble famille de Challant (Nigra, 1974; Zanotto, 1975; Voulaz, 1997). Toutefois il est probable qu'il existait déjà avant cette date un site fortifié à Graines, si l'on en juge par la typologie des bâtiments (notamment la chapelle castrale) et des traditions orales qui font remonter sa fondation aux IXe-Xe siècle (Magni, 1974). Le lieu n'a probablement jamais été utilisé à des fins résidentielles, mais représentait plutôt un centre de contrôle des environs et des voies de communication, au carrefour des routes venant de Verrès (au sud), d'Ayas et le Valais suisse (au nord, via le col de Saint Théodule), de la Vallée de Gressoney (à l'est, à travers le col Ranzola) et de Saint-Vincent (à l'ouest, via le col du Joux).
Les archives nous renseignent sur une grande campagne d'agrandissement du manoir vers le milieu du XVe siècle, à l'occasion de la guerre pour la succession de François Ier comte de Challant, dans laquelle Catherine de Challant, sa fille, s'opposa à son cousin Jacques de Challant-Aymavilles et améliora les défenses du site, probablement avec la surélévation des enceintes. Après cette date le manoir reste pratiquement inchangé, hormis quelques modifications au début du XVIIe siècle, visant à loger des armées chargées de contrôler le passage des troupes françaises. Depuis lors, le château a connu un déclin lent mais régulier.

3.2. Les objectifs et les méthodes mises en oeuvre

Le château se dresse en hauteur, sur un rocher bien défendu sur les quatre côtés par la présence de pentes abruptes et bénéficie d'une position favorable pour le contrôle des alentours.
La typologie très ancienne de certains bâtiments - la chapelle castrale avec ses parements en opus spicatum et la décoration de son abside à bandes lombardes et lésènes qui datent du XIe-XIIe siècle (Magni, 1974;

Brunod, 1987), et le donjon à plan carré, partiellement effondré et reconstruit au début du XXe siècle - se mélange avec les traces, parfois bien visibles, de plusieurs interventions d'agrandissement et de rénovation. L'enceinte défensive a ainsi été surélevée au moins par deux fois. À tout cela s'ajoute l'état avancé d'effondrement, qui entrave parfois la compréhension de l'organisation originelle du château.
Le relevé lasergrammétrique et l'acquisition photogrammétrique des structures représentent un soutien précieux pour la recherche archéologique, soit pour l'analyse des différentes phases de construction, soit pour la modélisation des volumes des bâtiments. Ces études seront en outre utiles à la connaissance de l'évolution du site et, ensuite, à sa restauration.
La complexité morphologique des lieux a bien sûr conditionné les choix méthodologiques et le lever. Le travail a été organisé ainsi : un réseau de points géodesiques relevés par GPS a été établi et celui-ci s'est appuyé sur le système cartographique national auquel par la suite ont été référées les polygonales du relevé lasergrammétrique et photogrammétrique (réalisées grâce à un théodolite laser sans réflecteur).

Figure 12 : Le château de Graines en cours de numérisation (Brusson, Vallée d'Aoste, Italie). Document : A. Bryer.

La configuration du site nécessitait l'utilisation de différentes technologies. Les relevés lasergrammétriques (Figure 12) ont été réalisés suivant une technique qui intègre les données de différents capteurs laser.
Les extérieurs ont été mesurés à l'aide d'un scanner laser à temps de vol, capable d'opérer malgré la distance assez importante qui le séparait du site, de l'autre côté de la vallée (plus de 300 m) tandis que tout l'intérieur a été relevé par un scanner à décalage de phase.

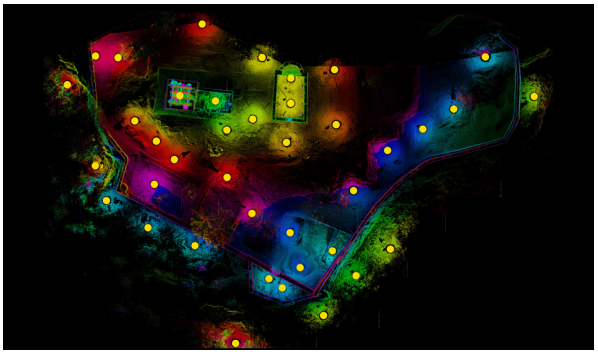

Figure 13 : Château de Graines, plan de répartition des stations de numérisation. Document : A. Bryer.

Le modèle laser final compte environ 45 scans (Figures 13 et 14), soit au total 300 millions de points relevés. Des contrôles effectués (en comparant les valeurs des coordonnées de points homologues obtenues par relevés topographiques, photogrammétriques et lasergrammétriques) ont prouvé une précision globale d'environ 1 cm, à l'évidence adéquate au relevé commandé.

Figure 14 : Nuage de points issu de la numérisation. Document : A. Bryer.

Le relevé laser achevé, un levé photogrammétrique, conditionné lui aussi par la morphologie du site et utilisant un mât télescopique pour l'intérieur, a été mis en oeuvre: il s'avérait en effet difficile de réaliser les prises de vue par hélicoptère à cause de la végétation assez drue. Les prises de l'extérieur ont été faites en se plaçant de l'autre côté de la vallée, à l'aide d'un téléobjectif; les côtés extérieurs particulièrement escarpés ne permettant par ailleurs pas de positionner le mât télescopique; l'emploi d'un ballon captif était déconseillé en raison du vent, jamais tout à fait absent

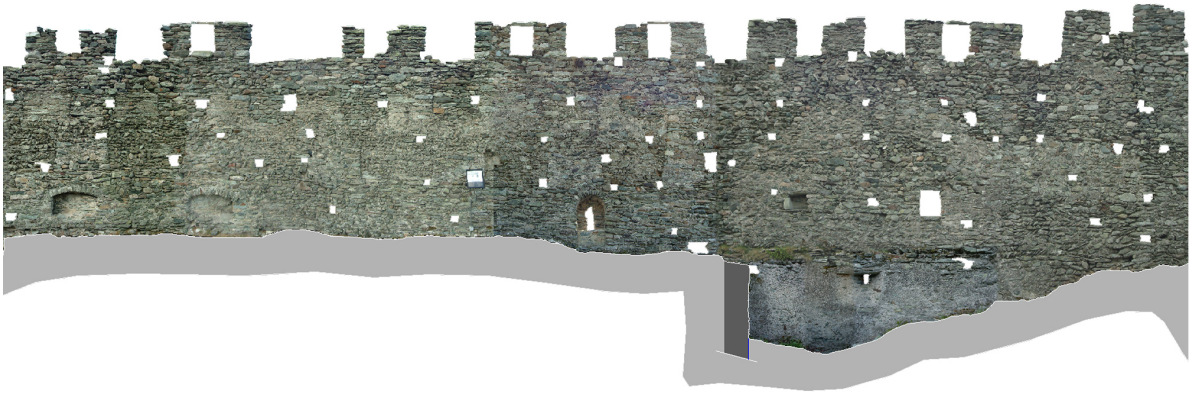

Figure 15 : Ortho-image d'une courtine. Document : A. Bryer.

(vallée alpine étroite et ventée). Il fallait rester au sol : grâce à un appareil haute définition, environ 400 images de 40 megapixels ont été réalisées. Chaque portion du château a pu être relevée.

Figure 16 : Modèle 3D texturé. Document : A. Bryer.

3.3. Données et documents

Le modèle photogrammétrique procède de l'intégration de plusieurs techniques : les murs plus simples sont le résultat d'un processus de redressement d'images; certaines orthophotos (Figure 15) ont été produites à l'aide d'un logiciel de modélisation photogrammétrique, tandis que la modélisation définitive a été obtenue grâce à la génération d'un modèle 3D maillé simplifié auquel des images ont été appliquées (Figure 16).
Le détail global du modèle est en moyenne de 3pixels/cm ce qui permet d'effectuer des zooms en explorant avec précision et fiabilité chacune de ses parties. En partant du modèle photogrammétrique, des ortho-images ont été par la suite produites, couvrant la totalité des façades. Sur la modélisation 3D a été réalisé un dessin de restitution vectoriel se limitant aux silhouettes des édifices et aux éventuels changements de matériaux. Une restitution plus minutieuse pierre à pierre est prochainement prévue dans un but d'intégration et de complément du relevé actuel. Ont collaboré à ce projet : un responsable coordinateur de projet, deux lasergrammètres, un architecte, deux techniciens en photogrammétrie. Au total 90 planches graphiques environ ont été produites.

3.4. L'exploitation des données

La documentation ainsi obtenue sera employée pour les activités de recherche actuellement en cours au château, visant soit à restaurer les bâtiments en cours de fouille, soit à repérer les phases chronologiques des murs par le biais de la lecture analytique des surfaces visibles.
Le produit final correspondra donc à une planche raisonnée des différentes phases constructives de l'enceinte rapportées aux parements de murs utilisés dans les autres édifices du castrum (donjon, chapelle et autres édifices).
En même temps, une restitution 3D des bâtiments étudiés sera produite et conduira à une restitution générale 3D des différents états du château.
La documentation lasergrammétrique et photogrammétrique sera aussi utilisée pour surveiller l'état de dégradation des structures et pour concevoir un projet de restauration, en permettant d'apprécier l'état du lieu avant la mise en oeuvre du chantier d'entretien de l'ensemble.

4. Le projet AVER – des montagnes de châteaux : l'occasion d'une approche partagée

Ce projet triennal (2010-2012) a ainsi été l'occasion de déployer, de part et d'autre de la frontière franco-italienne, les outils lasergrammétriques et photogrammétriques sur deux sites au premier abord similaires (des châteaux en ruine en milieu montagnard) mais présentant des situations différentes.

4.1. Similitudes des problématiques et différences de mise en oeuvre

On l'a vu, les problématiques d'étude des deux sites sont très proches et regroupent le besoin d'un état des

lieux planimétrique mais aussi tridimensionnel des sites, de relevés des élévations pouvant servir de support à l'analyse archéologique et de documents pouvant servir de support à des restitutions des états successifs.
Les cahiers des charges ont été rédigés séparément en 2009 pour les partenaires italiens et en 2010 pour les partenaires français et sans aucune influence des uns sur les autres et il apparaît immédiatement que les méthodes développées sont différentes bien qu'adaptées aux particularités de chaque site.
Les châteaux de Graines et d'Allinges offrent tout d'abord des configurations topographiques assez variées, bien qu'il s'agisse dans les deux cas de sites de hauteur. Graines est en effet juché sur un piton bordé de pentes abruptes ou de falaises, rendant difficile ou tout simplement impossible un accès direct aux parements extérieurs de l'enceinte. Château-Vieux d'Allinges, bien que bordé au nord par une falaise et des pentes abruptes très boisées, est installé sur le sommet d'une colline et la majorité des parements sont plus facilement accessibles, ce qui permet de privilégier une approche à courte distance des maçonneries (Figure 17).

Figure 17 : Environnement boisé à proximité de l'enceinte castrale de Château-Vieux d'Allinges. Cliché : L. D'Agostino, Hadès.

La mise en oeuvre de techniques de relevé à courte distance est en outre imposée à Allinges du fait de la présence d'une végétation dense sur la totalité du pourtour du site. L'emprise bâtie du site, bien que régulièrement débroussaillée, est aussi jalonnée d'arbres qui créent des masques pour le relevé. Les murs conservés en élévation sont quant à eux régulièrement envahis par des lierres et des arbustes qui poussent à même les parements ou au sommet des murs. Les parements sont très irréguliers, de nombreuses lacunes sont visibles et les joints sont très creux, ce qui n'offre que rarement des surfaces planes à relever. Graines est au contraire quasiment dénué de végétation arbustive et les maçonneries sont relativement propres, puisqu'elles ont déjà connu des campagnes d'entretien et de restauration au cours du XXe siècle (Figure 18).

Figure 18 : Parement extérieur de l'enceinte du château de Graines. Cliché : G. Sartorio, RAVA.

Enfin, Château-Vieux d'Allinges possède de nombreux vestiges enfouis ou affleurant le sol actuel, nécessitant de documenter avec précision les irrégularités topographiques du sol pour identifier la position potentielle des vestiges enfouis et leur répartition spatiale (Figure 19). Graines est quant à lui plus lisse en surface, même si la topographie est marquée par des escarpements conséquents.

Figure 19 : Château-Vieux d'Allinges, anomalies topographiques indiquant la présence de bâtiments enfouis dans le bourg castral. Cliché : L. D'Agostino, Hadès.

Ces différentes contraintes liées à la topographie, à l'état de conservation et à la nature des structures à relever ont déterminé deux approches méthodologiques différentes. À Graines, le relevé lasergrammétrique a servi à établir la volumétrie des bâtiments, tandis que la majorité des parements assez réguliers et pratiquement dénués de végétation ont pu être relevés par photogrammétrie (Figure 20). En revanche, à Allinges, le redressement photogrammétrique était inadapté pour relever les détails des élévations, les parements étant trop irréguliers, lacunaires et les joints trop creusés pour offrir des surfaces planes à relever. Le relevé au scanner

3D était plus efficace et a permis de générer un modèle 3D prenant en compte les microreliefs du sol actuel, témoins des vestiges enfouis. Seul le mur bouclier formant l'extrémité occidentale du site a fait l'objet d'un relevé photogrammétrique (Figure 8).

Figure 20 : Parement intérieur de l'enceinte du château de Graines. Cliché : P. Fiorvanti, RAVA.

4.2. Les limites des relevés réalisés

Bien qu'ils constituent de bons états des lieux et de bons supports de travail, les relevés réalisés aussi bien à Graines qu'à Allinges restent encore des documents "bruts" et nécessitent d'être interprétés et complétés au gré des interventions pour devenir de réels documents d'interprétations archéologiques.
En effet, les études de bâti menées dans le cadre des restaurations sont l'occasion de procéder à des nettoyages de maçonneries et à des sondages dans les élévations, qui seuls permettent de réellement analyser la construction et la chronologie. Les relevés ne sont en ce sens qu'un support pour le travail proprement archéologique qui consiste à enregistrer les données et à les représenter graphiquement. Des compléments, des modifications, voire de nouveaux relevés seront mis en oeuvre au cours des différentes interventions sur le terrain.
Par ailleurs, les fouilles archéologiques engagées sur les deux sites posent le problème de la mise à jour des données graphiques. Les structures bâties révélées par la fouille (Figure 21) nécessitent d'être elles aussi relevées et doivent intégrer les documents graphiques. Le plus souvent, pour des raisons pratiques, les nouvelles structures sont relevées par des moyens plus traditionnels et, si elles s'insèrent assez bien dans les plans ou les relevés d'élévations, leur intégration aux modèles 3D est plus problématique et nécessitera de nouvelles interventions de lasergrammétrie ou de photogrammétrie sur le terrain. C'est notamment ce qui est prévu à Allinges à l'issue des campagnes de fouille sur le bourg castral de Château-Vieux.
Néanmoins, les différents états des structures et de la stratigraphie doivent entre temps être soigneusement enregistrés car ils peuvent être détruits au cours de la fouille.

4.3. Des données encore partielles

A la date de rédaction de cet article on n'a pas encore suffisamment de recul pour développer une mise en perspective détaillée des deux approches de la lasergrammétrie et de la photogrammétrie sur les sites de Graines et de Château-Vieux d'Allinges, les relevés commandés sur ce dernier n'étant d'ailleurs pas entièrement réalisés. Néanmoins un partage de ces approches est d'ores et déjà programmé pour la fin du projet, à l'occasion d'un colloque qui se tiendra à Aoste en Italie à la fin de l'année 2012.

5. Du relevé à l'analyse et à l'interprétation

Si l'expérience présentée ici, encore en cours, ne fait que mettre en oeuvre des techniques de relevé désormais éprouvées par les spécialistes de la photogrammétrie et de la lasergrammétrie, nous avons évoqué la diversité des possibilités d'exploitation de ces données. Depuis la sauvegarde numérique d'un site jusqu'à la restitution de son évolution architecturale, les étapes de travail sont nombreuses et nécessitent des échanges constants entre les corps de métier concernés.
Toutefois, il apparaît important de s'interroger sur les modalités de la collaboration entre photogrammètres, lasergrammètres, architectes et archéologues, qui revêtent une importance particulière pour obtenir les résultats attendus.

5.1. La question de la maîtrise technique

En premier lieu, il convient de parler le même langage, ce qui n'est pas la moindre difficulté au vu des formations et des cultures scientifiques très différentes des intervenants.
L'architecte ou l'archéologue, attentif à représenter un édifice dans les grandes lignes de son architecture ou à enregistrer l'appareil d'un mur, ses phases de construction ou encore les traces d'éléments architectoniques disparus, est en général formé au relevé traditionnel à la main ou avec des instruments de mesure de type théodolite ou tachéomètre. Même si la plupart d'entre eux connaissent désormais l'existence et les possibilités des technologies scanner ou photogrammétriques modernes, ils ne possèdent pas toujours les notions nécessaires à la compréhension fine de ces méthodes, de leurs apports et, surtout, de leurs limites techniques et de leurs conditions d'application. La plupart des commandes conséquentes en photogrammétrie et lasergrammétrie de sites archéologiques et autres monuments est réalisée par des structures publiques (État, collectivités, organismes de recherche) naturellement soumises à des contraintes légales fortes, notamment en matière de marchés publics. L'apparition récente de ces nouvelles technologies fait que les services, quand bien même ils puissent être patrimoniaux, ne sont pas toujours préparés à analyser des offres aussi techniques si

Figure 21 : Vestiges de bâtiments mis au jour dans le bourg castral de Château-Vieux d'Allinges en 2011. Cliché : L. D'Agostino, Hadès.

le cahier des charges n'a pas été soigneusement préparé en amont. Les critères de choix tendent alors à s'appuyer sur les références, lorsque les contraintes financières ne sont pas trop pesantes.
Or, c'est bien au stade de la définition du projet et d'un cahier des charges pour le relevé que doit s'exercer la plus grande vigilance, sous peine de voir apparaître une forte distorsion entre les attentes du commanditaire – privé ou public – et les réalisations du photogrammètre ou du lasergrammètre. Plus encore, l'utilisation de relevés par un archéologue ou un architecte qui ne les a pas commandés lui-même est dans la plupart des cas décevante, voire inadaptée : la définition des orthoimages, la localisation des plans de coupes, l'échelle des reports sont autant de points qui déterminent si un relevé est adapté ou non aux besoins de son utilisateur.

5.2. Objectivité ou manipulation de l'image ?

En second lieu, la tentation peut paraître grande de chercher à obtenir des relevés graphiquement "parfaits". La société de l'image dans laquelle nous évoluons forme notre oeil à des images dénuées de défauts, numériquement corrigées, où les imperfections sont systématiquement gommées. Pourtant, dans la démarche d'enregistrement du plan ou des élévations d'un site, est-il possible d'attendre un relevé dénué de lacunes, de masques, d'absences d'informations ? Les conditions pour obtenir un tel résultat sont rarement réunies. Pour un site à ciel ouvert, la végétation peut-elle être éradiquée au point de ne masquer aucune assise des murs ? Est-il toujours possible de placer un scanner de manière à éliminer les masques provoqués par des objets en saillie sur le parement, par des surplombs, par l'ébrasement des ouvertures ? Bien souvent, une représentation dans laquelle apparaissent des masques de numérisation est moins flatteuse mais bien plus fidèle à la réalité et plus honnête qu'un relevé dans lequel les lacunes ont été corrigées par interpolation ou par duplication d'informations (pixels, vecteurs. . .), pratiques que l'archéologue se doit de fuir. . .
Cette question, qui pourra paraître polémique, touche pourtant à l'éthique des deux disciplines. La finalité des relevés archéologiques d'un bâtiment ou d'une stratigraphie est, faut-il le rappeler, la représentation aussi fidèle que possible d'un état des structures à un moment donné de leur existence ou de leur étude. L'interprétation n'intervient que dans un second temps, celui de la représentation de l'évolution chronologique des structures. En ce sens, le relevé manuel classique possède l'inconvénient de ne jamais être objectif, mais de toujours produire le résultat d'une interprétation. Chaque point mesuré, chaque trait dessiné fait l'objet d'un choix par le dessinateur et, par là même, d'une interprétation.
À l'inverse, la lasergrammétrie et la photogrammétrie permettent de saisir les données du terrain avec plus de finesse et sans interprétation préalable : l'objectivité des données sources utilisées pour réaliser une ortho-image ou une modélisation 3D n'a de limite que la résolution des photographies ou des nuages de points acquis sur le terrain, même si l'angle de la prise de vue ou la position des stations a une influence sur les données enregistrées. Le processus de traitement des données, en revanche, peut donner lieu à toutes sortes de corrections et d'interprétations.

Il résulte de cet état de fait que les principes de relevé scanner ou par photogrammétrie doivent être connus par les utilisateurs que sont les architectes et les archéologues et que ceux-ci doivent formuler leurs attentes de façon précise aux spécialistes des relevés numériques avec lesquels ils travaillent. Il apparaît donc nécessaire d'associer les différents spécialistes dès la phase de définition du projet; un dialogue constructif entre les intervenants, tout au long de la campagne de relevé et du traitement des données, peut en effet permettre de résoudre les difficultés techniques et de produire des données mieux adaptées aux attentes.

5.3. Relevé manuel ou relevé automatisé : un problème de méthode

Les contraintes de temps et de financement, que ce soit en contexte d'archéologie programmée ou préventive, sont de plus en plus prégnantes et on ne peut que regretter leur impact sur l'ampleur et la qualité des relevés.

De fait, le relevé de l'objet archéologique construit, en particulier en contexte préventif, tend à devenir de plus en plus synthétique et interprétatif, au détriment de l'enregistrement objectif des structures : en privilégiant la représentation des organes architectoniques (portes, fenêtres, cheminées. . .) et des phases de construction, nécessaires à la compréhension de l'architecture et de la chronologie, on tend à minimiser ou à faire disparaître la représentation du pierre à pierre ou à la limiter à des surfaces murales très restreintes d'un bâtiment.

Néanmoins, plusieurs études de grande ampleur menées ces dernières années, par exemple sur les châteaux de Carcassonne (Guyonnet, 2010) ou de Chinon (Dufaÿ et al., 2005; Dufaÿ, 2009), ont mis en évidence l'intérêt des méthodes de relevé automatisées pour l'archéologie castrale et l'archéologie du bâti en général. Tout en réduisant les temps d'intervention sur le terrain ou en libérant partiellement l'archéologue de la contrainte du relevé pierre à pierre manuel, les relevés automatisés permettent de maintenir une haute qualité de l'enregistrement des structures, voire de l'améliorer.

En effet, la définition de l'information apportée par les milliards de points relevés par un scanner, l'information couleur et les nuances des détails enregistrées par la photographie enrichissent les relevés et les rendent plus "objectifs" en limitant l'intervention humaine au stade de l'enregistrement brut de l'objet.

Si une partie de la communauté archéologique reste réticente à l'automatisation des relevés de terrain sous prétexte que le relevé est la phase pendant laquelle l'archéologue réfléchit et comprend le mur ou les structures qu'il étudie, il s'agit d'une erreur épistémologique liée à la confusion entre relevé et interprétation du relevé. En effet, la méthode de relevé, qu'elle soit manuelle, au tachéomètre, par photogrammétrie ou par lasergrammétrie, n'aboutit toujours qu'à une image brute de l'objet, qu'elle soit en 2D ou en 3D. L'analyse et l'interprétation, puis la restitution des états successifs, constituent d'autres temps, bien distincts, de la démarche archéologique ou de l'analyse architecturale.

Dans le relevé manuel traditionnel, le temps du relevé et celui de l'interprétation sont souvent simultanés, car l'archéologue doit mettre à profit le temps passé à dessiner pour comprendre les structures. En revanche, les relevés automatisés dissocient clairement le temps de l'enregistrement des données brutes et celui de leur analyse et de leur interprétation.

5.4. Le relevé: un support d'analyse et d'interprétation sur le terrain

Néanmoins, les relevés automatisés ne sont pas le salut de l'archéologue et il paraît indispensable de mettre en place une méthodologie de travail adaptée, qui privilégie l'utilisation des relevés comme support d'analyse et d'interprétation sur le terrain. En effet, il est illusoire de concevoir les relevés par scanner ou par photogrammétrie comme un support utilisable et interprétable au bureau sur un écran d'ordinateur, une fois la phase de recherche sur le terrain achevée. La définition des relevés ne permet pas d'obtenir une finesse de lecture suffisante pour remplacer une interprétation des structures sur le terrain par l'oeil de l'architecte ou de l'archéologue. Les relevés doivent, aussi souvent que possible, être utilisés comme support pour le travail d'enregistrement des données archéologiques sur site.

En termes d'archéologie du bâti, il est indispensable de repérer à l'oeil nu et par les méthodes classiques les reprises dans les maçonneries, les différences de mortiers, les ajustements des moellons. . . Seul ce procédé permet d'établir un phasage correct des structures bâties et d'étayer les démonstrations. Dans certains cas, les maçonneries nécessitent d'être nettoyées finement ou les enduits piquetés afin d'observer les parements avec finesse, ce qui nécessite non seulement un accès direct aux élévations au moyen d'échafaudages ou de nacelles élévatrices, mais aussi des compléments de relevé importants – voire une reprise complète – après la phase d'état des lieux, de nettoyage et de fouille. Plusieurs relevés successifs peuvent donc être nécessaires en fonction du stade d'avancement des études.

Si les contraintes de temps ne permettent pas toujours ce va-et-vient entre la phase de relevé, le traitement informatique et la phase d'analyse sur le terrain, il est indispensable de coupler le relevé avec des minutes de terrain qui permettront, dans un second temps, le report des détails de l'analyse stratigraphique sur les orthoimages. Un procédé efficace peut être de compléter le relevé proprement dit par des prises de notes détaillées sur des schémas et/ou sur des tirages de photographies non redressées dès la phase terrain; ces documents facilitent par la suite le travail d'interprétation des relevés lasergrammétriques ou photogrammétriques et l'analyse pierre à pierre.

Enfin, il est important que l'archéologue conserve la maîtrise de la réalisation des documents finaux que sont le dessin pierre à pierre vectoriel et la représentation des

éléments architectoniques et des phases de construction. De ce fait, la maîtrise des outils informatiques associés apparaît une fois de plus comme un corrélat incontournable des méthodes de relevé proprement dites.

6. Conclusion

En guise de conclusion, nous insisterons sur les apports spécifiques des procédés de relevé par photogrammétrie et par lasergrammétrie comparés aux relevés traditionnels. Les cas d'étude fournis par le programme **AVER – des montagnes de châteaux**, même s'il en est encore à ses débuts, mettent en lumière les difficultés de gestion par les architectes et les archéologues des relevés sur des ensembles monumentaux vastes et complexes tels que les châteaux médiévaux. Des relevés manuels des élévations seraient dans la plupart des cas inenvisageables du fait des surfaces de parements concernées.

L'emploi d'échafaudages, la multitude d'heures de travail à prévoir sur les sites et le coût final de telles campagnes de relevé mettent en évidence de manière probante l'intérêt des relevés automatisés. Ils permettent dans ce cas un gain de temps et une économie de moyens très appréciables. Toujours dans le cadre de ce projet nous renvoyons au colloque final prévu durant l'automne 2012 à Aoste, les personnes intéressées par la mise en perspective des deux approches développées par les partenaires français et italien.

Par ailleurs, il faut noter que la géométrie des structures est autrement mieux documentée par les relevés automatisés que par un relevé manuel. En effet, le relevé scanner permet par exemple de générer des coupes très précises dans les structures, à différents endroits des bâtiments, et de mettre en évidence les déformations des maçonneries, les décollements de parements ou les déversements des murs, informations que le relevé manuel ou par un tachéomètre ne permet pas de recueillir. Ces informations sont pourtant précieuses, voire fondamentales, pour l'analyse de l'état sanitaire d'un édifice et pour définir un programme de restauration efficace.

Néanmoins, la réponse à la problématique spécifiquement archéologique du relevé, à savoir l'enregistrement des structures et la représentation des données stratigraphiques et chronologiques, nécessite pour les archéologues de considérer les documents générés par photogrammétrie ou par lasergrammétrie comme des objets inachevés, dont il faut extraire l'information et la mettre en valeur. Ils sont des outils d'analyse et d'interprétation, riches et détaillés, à condition de veiller à leur mise en oeuvre et à leur exploitation.

References

Blondel L., 1956. Châteaux de l'ancien diocèse de Genève. Mémoires et Documents publiés par la Société d'Histoire et d'Archéologie de Genève, Genève, Suisse.

Brunod E., 1987. Arte sacra in Valle d'Aosta. Catalogo degli enti e degli edifici di culto e delle opere d'arte sacra della Bassa Valle e delle Valli laterali. Bassa Valle e Valli laterali II. Quart (Aosta), p.154.

Constant M., 1972. L'établissement de la maison de Savoie au sud du Léman – La châtellenie d'Allinges-Thonon. Mémoires et Documents de l'Académie Chablaisienne, LX.

D'Agostino L. (dir.), Guffond C., et al., 2010a. Rapport Final d'Opération de prospection thématique, « Programme européen AVER, Alcotra – Interreg IV. Les châteaux médiévaux de la Haute-Savoie », dactyl., HADES / Service départemental d'Archéologie de la Haute-Savoie / DRAC Rhône-Alpes – SRA, France, 3 vol.

D'Agostino L. (dir.), Guffond C., et al., 2010b. Rapport Final d'Opération de fouille programmée, « Programme européen AVER, Alcotra – Interreg IV. Les châteaux d'Allinges (Allinges, Haute-Savoie) », dactyl., HADES / Service départemental d'Archéologie de la Haute-Savoie / DRAC Rhône-Alpes – SRA, France, 2 vol.

Dufaÿ B., Lefebvre B., et al., 2005. L'avant-corps de la tour philippienne du château de Chinon (Indre-et-Loire) : un exemple d'adaptation d'un standard architectural aux contraintes topographiques. Revue Archéologique du Centre de la France, 44, pp. 73–92.

Dufaÿ B., 2009. Premier bilan des fouilles de la forteresse de Chinon, 2003-2009. Revue Archéologique du Centre de la France, 48, pp. 249–252.

Guffond C., D'Agostino L., 2010. Trois ans pour les châteaux de Haute-Savoie et de la Vallée d'Aoste. La Rubrique des patrimoines de Savoie n° 25, pp. 28–29.

Guyonnet F., 2010. Le château comtal de Carcassonne : nouvelle approche archéologique d'un grand monument méconnu. Dans Chapelot J. (dir.): Trente ans d'archéologie médiévale en France, Caen, France.

Magni M. 1974. Architettura religiosa e scultura romanica nella Valle d'Aosta, Aoste, Italie, pp. 49–51

Nigra C., 1974. Torri, castelli e case forti del Piemonte dal 1000 al secolo XVI. La Valle d'Aosta. Aoste, Italie p. 39.

Sartorio G., Sergi A., 2008. Castelli, torri, case forti : un patrimonio in via de ruderizzazione. Una proposta finalizzata al loro recupero. Bollettino della Soprintendenza per i Beni e le Attività Culturali della Regione Autonoma Valle d'Aosta n°5, pp. 20–25.

Sartorio G., Cortelazzo M., 2008. Tra fonte storica et fonte archeologica : Châtel-Argent e l'utilizzo dell'impalcato ellicoidale nelle torri cilindriche di XIII secolo. Bollettino della Soprintendenza per i Beni e le Attività Culturali della Regione Autonoma Valle d'Aosta n°5, pp. 94–111.

Voulaz J.-A. (par les soins de), 1997. Inventaire des documents conservés à l'abbaye de Saint-Maurice d'Agaune en Valais concernant le fief de Graines, d'après les "cahiers" du chanoine Charles. Bulletin de l'Académie Saint-Anselme n° VI (Nouvelle série), pp. 369–408.

Vuillermin S.-B., 1907. A propos des restaurations du Chateau de Graines à Brusson. Aoste, Italie.

Zanotto A., 1975. Castelli valdostani. Aoste, Italie, p. 72.