Proposition d'une ontologie de domaine dédiée à l'annotation d'images spatialisées pour le suivi de la conservation du patrimoine culturel bâti

Tommy Messaoudi

▶ **To cite this version:**

Tommy Messaoudi. Proposition d'une ontologie de domaine dédiée à l'annotation d'images spatialisées pour le suivi de la conservation du patrimoine culturel bâti. Autre. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2017. Français. NNT : 2017ENAM0021 . tel-01628391v2

HAL Id: tel-01628391

https://pastel.hal.science/tel-01628391v2

Submitted on 8 Jan 2018

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.

ParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY

ARTS ET MÉTIERS ParisTech

2017-ENAM-0021

École doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'ingénieur

Doctorat ParisTech

T H È S E

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Spécialité " CONCEPTION "

présentée et soutenue publiquement par

Tommy MESSAOUDI

le 12 Juillet 2017

Proposition d'une ontologie de domaine dédiée à l'annotation d'images spatialisées pour le suivi de la conservation du patrimoine culturel bâti

Directeur de thèse : **Livio DE LUCA**
Co-directeur de thèse : **Philippe VÉRON**
Maître de thèse : **Gilles HALIN**

Jury

M. Améziane AOUSSAT, Professeur des Universités, Arts et Métiers ParisTech,	Président
M. Gilles GESQUIÈRE, Professeur des Universités, Université de Lyon,	Rapporteur
M. Frank BOOCHS, Professeur des Universités, Université de Mainz,	Rapporteur
M. Florent LAROCHE, Maître de Conférence, École Centrale de Nantes,	Examinateur
M. Xavier BRUNETAUD, Maître de Conférence, Université d'Orléans,	Examinateur
M. Livio DE LUCA, Directeur de Recherche au CNRS,	Examinateur
M. Philippe VÉRON, Professeur des Universités, Arts et Métiers ParisTech,	Examinateur
M. Gilles HALIN, Maître de Conférence, Université de Lorraine,	Examinateur
M. Philippe BROMBLET, Ingénieur de Recherche au Ministère de la Culture,	Invité

T H È S E

Arts et Métiers ParisTech - Campus d'Aix-en-Provence
UMR CNRS/MCC 3495 MAP - UMR CNRS 7296 LSIS

Proposition d'une ontologie de domaine dédiée à l'annotation d'images spatialisées pour le suivi de la conservation du patrimoine bâti

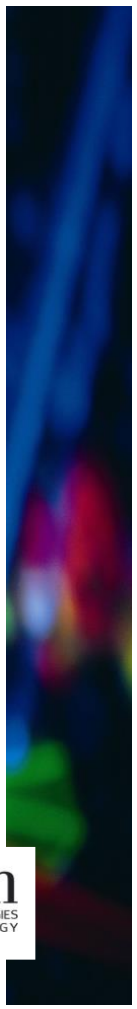
RÉSUMÉ : Les pratiques de conservation et restauration de monuments historiques requièrent l'élaboration de diagnostics impliquant différents intervenants au sein de contextes d'études pluridisciplinaires. L'état de conservation d'un objet patrimonial est ainsi étudié et décrit au moyen d'observations directes, de sources documentaires et de données analytiques de natures différentes. Les avancées des technologies numériques en matière de collecte, traitement et gestion de données, offrent aujourd'hui une opportunité sans précédent pour intégrer les résultats de ces observations et ces données au sein de systèmes innovants de représentation pour la documentation et la connaissance du patrimoine. Cependant, si une panoplie de nouveaux outils est aujourd'hui à disposition de la communauté des scientifiques et des professionnels du patrimoine, le problème d'une corrélation pertinente de ces données et de ces informations hétérogènes reste peu exploré. Tout d'abord, si ces nouveaux outils permettent aux différents experts de mémoriser et d'analyser leurs observations sur différents supports, les données générées par ces différents experts ne sont généralement pas spatialisées autour d'un même référentiel spatial. En effet, même si toutes ces données se réfèrent à un objet physique commun, les liens entre elles ne peuvent que s'établir par des stratégies d'organisation de fichiers ou par des méthodes d'indexation basées sur des mots clés. Parallèlement, si dans les dernières années plusieurs techniques de numérisation 3D ont été expérimentées dans le but de générer des représentations géométriques denses et précises, les méthodes de traitement et de structuration de ces données 3D ne fournissent pas encore de cadres opérationnels pour l'extraction d'informations pertinentes pour l'analyse et l'interprétation de l'état de conservation. En se positionnant à l'intersection entre les domaines de l'acquisition spatialisée 3D et des systèmes d'informations, ce travail de recherche propose une ontologie de domaine dédiée à l'annotation sémantique de représentations 3D d'objets patrimoniaux visant à la constitution d'un environnement numérique pour la description de l'état de conservation des monuments historiques. Par l'interconnexion de descripteurs qualitatifs (reliés à une formalisation des connaissances du domaine) et quantitatifs, cette ontologie constitue l'échafaudage conceptuel structurant un système d'informations multidimensionnelles dédié à la corrélation spatiale, morphologique et sémantique de jeux d'annotations élaborés par des acteurs multiples et en fonction de niveaux de lecture multiples.

Mots clés : patrimoine architectural, ontologie de domaine, conservation, annotation sémantique, représentation 3D

Proposition to a domain ontology dedicated to spatialized image annotation for building heritage conservation monitoring

ABSTRACT: The conservation and restauration of historical monuments require a diagnostic analysis carried out by a multidisciplinary team. The elaboration of the diagnosis of a cultural Heritage Object requires direct observations, the examination of documentary sources as well as of diverse types of analytic data. The great advancements in digital processing, management and data collection opened unprecedented opportunities for integrating results, coming from both observations and derivative data, within innovating representation systems for heritage knowledge and documentation. However, if a range of new tools and data is today available to the scientific community and heritage experts, their correlation and integration with internal/external heterogeneous information is an issue that still remain unexplored. While these innovative tools allow different experts to record and analyze their observations with diverse formats, the results are generally not spatialized and referenced together. Indeed, even though all these data refer to a common physical object, the links between them is based only on file organization strategies or by keyword-based indexation methods. In parallel, in recent years, several 3D digitization technics has been used for generating dense and accurate geometrical representations, but the processing and structuration method of these 3D data don't include yet an operational framework for retrieving relevant information regarding their conservation state and an interpretative analysis. Positioned in the intersection between 3D spatialized acquisition domain and information management, this research work aims to the creation of a digital framework for recording conservation state description of historical monument throughout the introduction of a functional domain ontology for the semantic annotations of heritage objects 3D representations. The proposed ontology comprises both qualitative (related to a domain knowledge formalization) and quantitative descriptors, constituting the necessary conceptual scaffold for structuring a multidimensional information system dedicated to the correlation of spatial, morphological and semantic multi-actor annotations in relation to multiple observation levels.

Keywords: Architectural Heritage, Domain Ontology, conservation, semantic annotation, 3D representation



ARTS ET MÉTIERS ParisTech

ParisTech INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY

Remerciements :

Afin d'aboutir à ce mémoire de thèse, il a fallu énormément de temps et d'énergie. Je pense que cette partie pourrait être un chapitre, car l'innovation de la proposition tient en la stimulation d'un entourage bien présent dans la vie de la personne qui la réalise. J'aurais besoin de tout autant de pages que le manuscrit entier pour remercier tout le monde ayant contribué de près ou de loin à ce travail de recherche. Je commencerai par cette citation de Franck PICCARD, qui symbolise à présent pour moi les principes du travail et de l'accomplissement : « La réussite appartient à tout le monde. C'est au travail d'équipe qu'en revient le mérite. ».

Je souhaiterais tout d'abord remercier chaleureusement mon encadrement : *Gilles* HALIN qui m'a accueilli durant deux stages recherches au sein du laboratoire MAP (Nancy) et qui m'a fait découvrir l'informatique appliquée à l'architecture, et également de m'avoir transmis une certaine rigueur (dans les schémas surtout) sans quoi je ne me serais pas engagé dans un tel travail. Je remercie également *Philippe* VÉRON, mon co-directeur de thèse, pour m'avoir régulièrement conseillé et grâce à qui j'ai pu proposer de nouvelles idées lors de riches discussions. Enfin, j'exprime ici toute ma reconnaissance envers mon directeur de thèse, *Livio* DE LUCA, pour son travail de supervision et sa disponibilité tant d'un point de vue professionnel qu'humain. Je n'étais qu'un novice en la matière, il a parié sur moi. Me connaissant nageur d'eau douce, il a su « me faire nager à contre-courant dans une mer déchaînée », et me donner les idées qui ont pu murir avec ma pugnacité. Je n'afficherai pas cette photographie, mais elle montre bien une certaine complicité et une bonne collaboration => DH15, Grenade, et la chaîne décapsuleur.

Je remercierai ensuite les collègues que je considère en réalité comme des amis. Venant de Nancy, ils m'ont accueilli à bras ouverts à Marseille malgré des têtes fatiguées et les nerfs à vif après la longue préparation de DH13. Ils sont devenus une seconde famille, car d'un grand soutien. *Menou*, la plus grande sœur (même si j'ai envie de dire que c'est une vraie mère pour nous) qui est équipée d'un niveau de patience hors paires, une organisation à toute épreuve et une maniaquerie magnifique que j'ai su apprécier. Elle m'a formé sur l'administratif et même sur l'éducation des enfants, en collaboration avec Noémie. Merci *Noémie* pour nos discussions passionnantes qui n'avaient jamais de fin. Nos soutiens mutuels ont contribué à un équilibre qui m'a aussi préservé. Plus petite sœur que Menou, ton expérience dans cet environnement de travail m'a beaucoup aidé à surmonter certaines situations. J'ai pris également plaisir à lui transmettre les biens-fait du sport : l'objectif Jessica Alba a été atteint.

Mes collègues doctorants, des Italiens, *Frida* (allemande aussi) allias Principessa et *Nicola* (Sarde plutôt) alias My love, nous étions fait pour nous rencontrer. Je passais plus de temps avec eux qu'avec n'importe qui. Merci pour les moments de détentes, de fous rires, et surtout pour vos apprentissages. Merci Nicola pour ton aide, je n'étais plus tout seul à parler d'ontologie, ce terme barbare qui était le sujet principal de ma thèse. Ce que j'ai développé je

te le dois beaucoup. Merci *Frida* pour cet accompagnement quotidien, et nos discussions sur nos vies respectives. Grâce à vous, j'ai pu parler couramment anglais et pas seulement par des termes scientifiques, ce qui m'a permis d'obtenir certains diplômes. Et je ne parle pas de ce que vous m'avez appris en italien « allora fatti una s… », « Aller on se file » !!! Je remercie également *Alessio* qui a parfaitement intégré le groupe (en même temps c'est aussi un italien), et qui, par sa présence a enrichi la qualité de nos échanges et l'ambiance de travail (Black banana).

Merci à *Laurent* avec qui ça a matché rapidement dès mon arrivée dans le quartier général. Merci à *Antho* qui est arrivé à mi-parcours, pour les bons moments (60 € le gala diner, quelle générosité). Merci à Éloi, qui m'a montré que l'on pouvait toujours faire mieux.

Sans les discussions avec *Pascal*, je n'aurais surement pas compris tous les aspects relatifs aux bases de données. Merci pour ses disponibilités d'un point de vue technique. De plus, « Qui aime bien châtie bien », tu me châtiais beaucoup.

Merci à *Adeline* (Tata) et *Nouha* (maman) qui m'ont propulsé de la meilleure des façons dans cette aventure. Particulièrement, Adeline qui venait de finir sa thèse m'a épaulé et rassuré lors de la rédaction, je l'en suis très reconnaissant.

Je tiens à remercier *Philippe* (Beauchet), un membre du parc informatique que j'ai eu la chance de rencontrer et de connaître. Je souhaite le remercier pour nos discussions autant sur l'informatique que sur la vie de manière générale. Ses conseils ont été mémorisés. Il m'a énormément fait avancer en me racontant quelques dictons d'hommes célèbres (comme Coluche) ou même de son père. Merci de m'avoir fait relativiser sur l'importance que l'on donne aux choses.

Kévin qui m'a suivi depuis plus de 5 ans. Il m'a non seulement aidé avec ses conseils sur le domaine du numérique et l'architecture, et ses astuces, mais également d'un point de vue humain. J'ai eu de « bonnes bases pour commencer ».

Je remercie ensuite des personnes qui m'ont beaucoup appris. *Marine* Bagneris et *Fabien* Cherblanc, *Philippe* Bromblet pour son expertise et sa gentillesse, *Odile* Guillon une photographe hors pair avec qui j'ai partagé de belles et instructives missions. Merci à *Jean-Marc* Vallet pour son accompagnement et pour le mal qu'il s'est donné en corrigeant mon manuscrit en entier. *Isabelle* qui m'a montré que j'étais capable d'enseigner et qui m'a donné envie de continuer dans cette voie.

Merci aux stagiaires qui sont passés par nos locaux, notamment *Sophie* (elle parlait italien), *Julie*, *Florent* (MON premier stagiaire), *Stéphane*, qui ont su maintenir une belle ambiance de travail au jour le jour.

Je suis très reconnaissant envers les personnes du laboratoire qui ont su me faire confiance en s'engageant dans une aventure sportive. Je les ai coachés pendant presque un an à raison de trois fois par semaine. Ils me remercient pour ça, mais je souhaite qu'ils sachent que c'était

un véritable partage. Je n'aurais pas pu maintenir mes performances sportives (natation) si je ne m'étais pas donné cette rigueur d'entraînement pendant ce travail. Cet exutoire a permis à chacun de s'exprimer et de relâcher la pression lors de moments (professionnel ou personnel) difficiles.

Je remercie ensuite les amis que j'ai eu la chance de côtoyer à l'extérieur du travail. Comme *Alice* et *Martin*. J'estime que je les ai rencontrés trop tard. En mon sens, ce sont des gens comme on en rencontre rarement. Je les remercie pour leurs attentions, leurs soutiens surtout en cette fin de parcours. Je suis honoré de les avoir dans ma vie. Je remercie *Nicolas* MANAUDOU et *Gilles* BOURQUIN pour m'avoir fait atteindre mon ultime objectif : nager un 100m dos en moins de la minute (59''37). *Nicola*s qui était l'entraîneur pendant ma thèse a accepté mes retards à l'entraînement dû aux aléas de mon travail de thèse.

Je remercie grandement ma famille qui a su vers quoi je m'engageais, et que j'ai quelque peu délaissée pour me donner à fond dans ce travail. Ils me sont très chers. Merci *Bretzel* et *Lauralee* d'avoir partagé avec moi les compétitions que nous faisions en parallèle, mais à deux lieux opposés de la France. Merci à ma jumelle *Candich* et à *Nindsay* pour ces bons moments passés à Paris quand je venais en formation. Merci à *Jilly* pour nos discussions sur les nouvelles façons de penser concernant le sens de la vie. Merci *Ma Didi* pour nos longs débats durant les phases difficiles. Merci à *Jo* d'avoir été présent sur place avec moi, il a été le seul repère familial dès le départ, ce qui m'a permis de commencer dans les meilleures conditions dans cette nouvelle ville et dans cette aventure inédite. Enfin, le soutien de mes parents *Martine* et *Youcef*, n'a jamais failli. Ils ont toujours cru en moi et en ma réussite dans l'adversité.

Mon Oncle Mohamed Messaoudi est le premier à avoir vu en moi la capacité de réussir une telle tâche. Il m'a beaucoup aidé à démystifier ce caractère complexe pour me lancer et même pour en venir à bout. Même si on ne se prépare jamais à l'exercice, il m'a montré la voie et m'a formé pour en découdre. Merci Tonton.

Chaque doctorant pendant sa quête partage le labeur quotidien avec une autre personne. Je n'ai pas été tout seul pour faire cette thèse, il y a ma chère et tendre à mes côtés. Merci à *Ma Mimi* pour les lourds sacrifices qu'elle a fait en me suivant dans cette aventure. Elle a supporté mes humeurs, mon stress, et constaté mes faiblesses. Elle mérite également ce statut de docteur. Elle est véritablement la clé de voute maintenant l'ensemble de ma structure physique, psychologique et intellectuelle pour m'emmener vers la réussite ce travail. Merci d'être ma moitié.

« Avec un talent ordinaire et une persévérance extraordinaire, on peut tout obtenir. »

Thomas Foxwell Buxton

Résumé :

Les pratiques de conservation et restauration de monuments historiques requièrent l'élaboration de diagnostics impliquant différents intervenants au sein de contextes d'études pluridisciplinaires. L'état de conservation d'un objet patrimonial est ainsi étudié et décrit au moyen d'observations directes, de sources documentaires et de données analytiques de natures différentes.

Les avancées des technologies numériques en matière de collecte, traitement et gestion de données, offrent aujourd'hui une opportunité sans précédent pour intégrer les résultats de ces observations et ces données au sein de systèmes innovants de représentation pour la documentation et la connaissance du patrimoine. Cependant, si une panoplie de nouveaux outils est aujourd'hui à disposition de la communauté des scientifiques et des professionnels du patrimoine, le problème d'une corrélation pertinente de ces données et de ces informations hétérogènes reste peu exploré.

Tout d'abord, si ces nouveaux outils permettent aux différents experts de mémoriser et d'analyser leurs observations sur différents supports, les données générées par ces différents experts ne sont généralement pas spatialisées autour d'un même référentiel spatial. En effet, même si toutes ces données se réfèrent à un objet physique commun, les liens entre elles ne peuvent que s'établir seulement par des stratégies d'organisation de fichiers ou par des méthodes d'indexation basées sur des mots clés.

Parallèlement, si dans les dernières années plusieurs techniques de numérisation 3D ont été expérimentées dans le but de générer des représentations géométriques denses et précises, les méthodes de traitement et de structuration de ces données 3D ne fournissent pas encore de cadres opérationnels pour l'extraction de nouvelles informations pertinentes pour l'analyse et l'interprétation de l'état de conservation.

En se positionnant à l'intersection entre les domaines de l'acquisition spatialisée 3D et des systèmes d'informations, ce travail de recherche propose une ontologie de domaine dédiée à l'annotation sémantique de représentations 3D d'objets patrimoniaux. Un modèle conceptuel qui vise à la constitution d'un environnement numérique pour la description de l'état de conservation des monuments historiques. Par l'interconnexion de descripteurs qualitatifs (reliés à une formalisation des connaissances du domaine) et quantitatifs, cette ontologie constitue l'échafaudage conceptuel structurant un système d'informations multidimensionnelles dédié à la corrélation spatiale, morphologique et sémantique de jeux d'annotations élaborés par des acteurs multiples et en fonction de niveaux de lecture multiples.

Mots clés : patrimoine architectural, ontologie de domaine, conservation, annotation sémantique, représentation 3D

Abstract:

The conservation and restauration of historical monuments require a diagnostic analysis carried out by a multidisciplinary team. The elaboration of the diagnosis of a cultural Heritage Object requires direct observations, the examination of documentary sources as well as of diverse types of analytic data.

The great advancements in digital processing, management and data collection opened unprecedented opportunities for integrating results, coming from both observations and derivative data, within innovating representation systems for heritage knowledge and documentation. However, if a range of new tools and data is today available to the scientific community and heritage experts, their correlation and integration with internal/external heterogeneous information is an issue that still remain unexplored.

While these innovative tools allow different experts to record and analyze their observations with diverse formats, the results are generally not spatialized and referenced together. Indeed, even though all these data refer to a common physical object, the links between them is based only on file organization strategies or by keyword-based indexation methods.

In parallel, in recent years, several 3D digitization technics has been used for generating dense and accurate geometrical representations, but the processing and structuration method of these 3D data don't include yet an operational framework for retrieving relevant information regarding their conservation state and an interpretative analysis.

Positioned in the intersection between 3D spatialized acquisition domain and information management, this research work aims to the creation of a digital framework for recording conservation state description of historical monument throughout the introduction of a functional domain ontology for the semantic annotations of heritage objects 3D representations. The proposed ontology comprises both qualitative (related to a domain knowledge formalization) and quantitative descriptors, constituting the necessary conceptual scaffold for structuring a multidimensional information system dedicated to the correlation of spatial, morphological and semantic multi-actor annotations in relation to multiple observation levels.

Keywords: Architectural Heritage, Domain Ontology, conservation, semantic annotation, 3D representation

Table des matières

Chapitre 1. Introduction 13

1.1. Contexte scientifiques et généralités 13

1.2. Problématique et Objectifs 14

1.3. Projet et communauté scientifique de la thèse 16

1.4. Terrains d'expérimentation 19

1.5. Structuration du document 20

Chapitre 2. Des données aux connaissances pour l'étude de l'état de conservation du patrimoine architectural 23

2.1. Données, Informations, Connaissances hétérogènes : définitions essentielles 24

2.1.1. La donnée : la base de l'information 24

2.1.2. L'information : la donnée contextualisée 25

2.1.3. La connaissance : la stabilité individuelle et collective 27

2.1.4. Conclusion 28

2.1.5. Une démarche diagnostic identifiée 29

2.2. Données issues d'acquisitions in situ 30

2.2.1. L'imagerie scientifique 2D et 3D 30

2.2.1.1. Imagerie scientifique 2D par capteurs photographiques 31

2.2.1.1.1. Photographies numériques 33

2.2.1.1.2. Imagerie multi spectrale 35

2.2.1.1.3. Cartographie 2D in situ 40

2.2.1.2. Imagerie scientifique 3D par acquisition laser 40

2.2.1.2.1. Les scanners longue portée 41

2.2.1.2.2. Les scanners par triangulation 42

2.2.2. Prélèvement par échantillon physique 44

2.2.2.1. Échantillonnage par LIBS 44

2.2.2.2. Échantillon physique par carottage 46

2.2.3. Acquisition des conditions environnementales 47

2.3. Données issues d'un processus de traitement 48

2.3.1. Données issues du recalage 3D des stations scanner 48

2.3.2. Génération de coordonnées 3D à partir de relevé photographique 50

2.3.3. Imagerie 2D produite par un traitement 55
2.3.3.1. Rendus 2D basés sur une reconstruction 3D 55
2.3.3.1.1. L'orthophotographie 56
2.3.3.1.2. Rendu en carte de profondeur, en occlusion ambiante et en IgnE 56
2.3.3.2. Cartographies 2D en laboratoire 57
2.3.3.2.1. Cartographies manuelles sur calques physiques 58
2.3.3.2.2. Cartographie assistée par ordinateur 59
2.3.3.3. Imagerie scientifique : image en infrarouge fausse couleur 60
2.3.4. Données résultant d'essais expérimentaux 61
2.3.4.1. Résultats de simulations expérimentales de vieillissement de la pierre 62
2.3.4.2. Résultats d'essais mécaniques de la pierre 64
2.4. Extraction d'information : définition de descripteurs spécifiques 68
2.4.1. Extraction de descripteurs 2D d'images 68
2.4.1.1. Caractéristiques globales 69
2.4.1.1.1. Les histogrammes 69
2.4.1.1.2. Les moments d'images 70
2.4.1.2. Caractéristiques locales 70
2.4.1.2.1. La détection de point d'intérêt 70
2.4.1.2.2. Descripteurs locaux 71
2.4.2. Extraction de descripteurs géométriques d'objet 3D 73
2.4.2.1. Caractéristiques globales 73
2.4.2.2. Caractéristiques locales 74
2.4.3. Caractérisation physico-chimique des matériaux 75
2.4.3.1. Informations extraites d'analyse physico-chimique 75
2.4.3.1.1. Types d'informations issues d'analyse LIBS 75
2.4.3.2. Informations extraites de simulations 76
2.4.3.2.1. Interprétation des données de la simulation mécanique numérique d'un bloc de pierre 76
2.4.3.2.2. Interprétation des essais de vieillissement de la pierre 77
2.4.4. Extraction de descripteurs morphologiques 79
2.5. Connaissances du domaine: interprétation d'informations 81
2.5.1. Intégration des connaissances métiers 81
2.5.1.1. ICOMOS : le glossaire illustré des formes d'altérations de la pierre 82

2.5.1.2. EWAGLOS : glossaire illustré européen des termes de la conservation pour les peintures murales et surfaces architecturales 84
2.5.1.3. Architecture : description et vocabulaires méthodiques 84
2.6. Conclusions 85
Chapitre 3. État de l'art : Outils et techniques de gestion de données, informations et connaissances sur la conservation 89
3.1. Système de Gestion de Bases de Données (SGBD) pour le patrimoine culturel 90
3.1.1. Les types de SGBD existants 90
3.1.1.1. Systèmes de bases de données relationnelles (SGBDR) 91
3.1.1.2. Systèmes de base de données orientée graphes (SGBDG) 91
3.1.1.3. Systèmes de Bases de Données Déductives 92
3.1.2. Bases de données du patrimoine culturel. 92
3.1.2.1. Bases de données CASTOR et IMAGE (France) 93
3.1.2.2. Base de données 3D du patrimoine 93
3.1.3. Conclusion, limites 94
3.2. Systèmes d'informations 3D pour la documentation du patrimoine architectural (SI) 94
3.2.1. Le projet NUBES 96
3.2.1.1. Description de la nature sémantique d'éléments architecturaux 97
3.2.1.2. Annotation sémantique 2D/3D de sources iconographiques 99
3.2.1.3. Modélisation et représentation des transformations spatio-temporelles 100
3.2.2. Systèmes pour la documentation et le suivi d'altérations 102
3.2.2.1. Spatialisation d'observations et d'analyses pour l'étude de l'état de conservation de peintures murales 102
3.2.2.2. Projet SACRE : documentation numérique dédiée à la conservation 104
3.2.3. Conclusion, limites 105
3.3. Systèmes basés sur les connaissances (SBC) 106
3.3.1. Systèmes de raisonnement basé sur les cas d'études (SRBC) 108
3.4. L'ontologie de domaine 109
3.4.1. Qu'est-ce qu'une ontologie ? 109
3.4.1.1. Définition 110
3.4.1.2. Les types d'ontologies existantes 113

3.4.1.3. Le web sémantique 114
3.4.2. Les différents niveaux d'abstraction conceptuelle d'une ontologie 115
3.4.3. Langages pour la représentation des connaissances 116
3.4.4. Méthodes de conception d'une ontologie de domaine 121
3.4.5. Annotation sémantique guidée par des ontologies 122
3.4.5.1. Photostuff 123
3.4.5.2. Video Image annotation tool (FR : Outil d'annotation d'image/vidéo) 124
3.4.6. Systèmes d'informations exploitant des ontologies pour la documentation du patrimoine 126
3.4.6.1. Documentation et description d'objet du patrimoine culturel par une ontologie de domaine 126
3.4.6.2. Modèle ontologique PARCOURS 129
3.4.6.3. MONDIS : un système d'information dédiée aux altérations d'édifices patrimoniaux 132
3.5. Conclusion sur l'état de l'art 136
Chapitre 4. Proposition d'une ontologie de domaine dédiée à la spatialisation des observations scientifiques menées sur le bâtiment 139
4.1. Aspects descriptifs et analytiques pris en compte 140
4.2. Intégration des dimensions sémantique, spatiale et morphologique 142
4.3. La dimension sémantique : représentation des connaissances à travers une ontologie de domaine 145
4.3.1. Conception du cœur ontologique et modèle générique de référence conceptuel : point de départ 145
4.3.1.1. Modélisation conceptuelle : conception de l'ontologie de domaine pour la conservation 145
4.3.1.1.1. Construction de l'ontologie de domaine 146
4.3.1.1.2. Définition des classes de description de la conservation des bâtis maçonnés et mise en relation 150
4.3.1.1.3. Descripteurs caractéristiques des concepts de l'ontologie 153
4.3.1.1.4. Bilan : modèle général de l'ontologie de domaine 157
4.3.1.2. Un modèle générique pour la documentation du patrimoine culturel : le CIDOC-CRM 158
4.3.2. Modèle de connaissances structurées pour l'observation de l'état de conservation d'édifices patrimoniaux 160

4.4. Dimension spatiale : de la caractérisation visuelle à l'annotation 3D basée sur la réalité 167

4.4.1. Annotation sémantique 2D/3D : Point de Départ 167

4.4.2. Spatialisation et suivi temporel d'observations scientifiques 169

4.5. Dimension morphologique : extraction de données géométrico-visuelles de surface 179

4.5.1. Méthodes d'analyse morphologique de l'état de surface des édifices patrimoniaux : point de départ 179

4.5.2. Intégration de la dimension morphologique dans l'approche de modélisation conceptuelle 184

4.6. De l'intégration à la corrélation d'informations multidimensionnelles ... 188

4.6.1. Un système pour l'intégration et la documentation numérique dédiée à la conservation : point de départ 189

4.6.2. Corrélation multidimensionnelle d'annotation sémantique 192

4.6.2.1. Processus de documentation basé sur l'ontologie de domaine : présentation générale 192

4.6.2.1.1. Génération de support d'observation par ajout d'acquisitions spatialisables 192

4.6.2.1.2. Processus d'annotation : région d'une entité reconnue 193

4.6.2.1.3. Extraction d'information : analyse quantitative 193

4.6.2.1.4. Processus de désignation : analyse qualitative 193

4.6.2.1.5. Processus d'argumentation 193

4.6.2.2. Documentation des acquisitions et des processus 194

4.6.2.3. Analyse statistique des observations instanciées 198

4.6.3. Bilan de notre approche par corrélation multidimensionnelle 198

4.7. Conclusion sur l'approche proposée 201

Chapitre 5. Implémentation informatique du système d'annotation basé sur l'ontologie de domaine proposée 205

5.1. Architecture logicielle 205

5.1.1. Fusion entre la base de données relationnelles (annotations 2D/3D) et l'ontologie de domaine avec ONTOP 206

5.1.2. Gestion de l'ontologie et stockage des données de sortie : les triplets. 207

5.1.3. Intégration d'une fonctionnalité de sélection et de visualisation : les outils jOWL et VOWL 208

5.1.4. Gestion des vocabulaires par TemaTres 209
5.1.5. Implémentation générale : bilan 210
5.2. Expérimentation et résultats 211
5.2.1. Cas d'étude pour l'expérimentation 211
5.2.2. Constitution de la base de données relationnelle 211
5.2.2.1. Environnement de développement 211
5.2.2.2. Mise en place du schéma relationnel 212
5.2.3. Construction de l'ontologie de domaine 213
5.2.3.1. Intégration et mise en relation des quatre classes de description pour la conservation du patrimoine culturel bâti 213
5.2.3.2. Fusion de notre ontologie de domaine avec le modèle conceptuel de référence CIDOC-CRM 215
5.2.4. Fusion de l'ontologie de domaine et de la base de données par ONTOP 217
5.2.4.1. Connexion de Protégé vers la base de données 217
5.2.4.2. Mapping SQL/SPARQL 218
5.2.5. Requêtes possibles par SPARQL via ONTOP et résultats 220
5.2.6. Conclusion sur l'expérimentation 229
Chapitre 6. Conclusion et perspectives 231
6.1. Limites 233
6.2. Perspectives de recherche 234
6.2.1. Vers une production participative : le crowdsourcing 234
6.2.2. Vers une reconstruction tridimensionnel basée sur les connaissances du patrimoine architectural 235
6.2.3. Vers la prise en compte du comportement mécanique des structures 235
6.2.4. Vers une approche de création de connaissances pour le raisonnement basé sur les cas 237
6.2.5. Vers une application mobile exploitant les technologies et techniques de Réalité Augmentée 239
Bibliographie et Webographie 241
Liste des publications 259
Table des illustrations 261
ANNEXE A 269

A.1 Illustration de l'ontologie de domaine pour l'observation scientifique spatialisée de l'état de conservation du patrimoine architectural 269

A.2. Agrandissement de la figure sur le moteur de corrélation multidimensionnel 274

A.3. Illustrations focalisées sur les classes principales de l'ontologie de domaine et leurs relations..... 275

A.3.a Modèle sur le processus d'observation scientifique 275

A.3.b Modèle sur le processus d'acquisition de données numériques directe 277

A.3.c Modèle sur le processus d'acquisition indirecte de données numériques 278

A.3.d Propriété de données des classes principales de l'ontologie de domaine..... 279

A.4. Diapositives de la soutenance de doctorat..... 282

Chapitre 1. Introduction

1.1. Contexte scientifiques et généralités

Le domaine du patrimoine matériel construit est de plus en plus sujet à l'adoption de méthodes d'analyse sophistiquées, engendrant une nette diffusion de nouvelles technologies [Boochs F. et al., 2014]. Le domaine de la conservation du patrimoine est un environnement complexe qui regroupe un grand nombre d'acteurs et de compétences complémentaires [Jones S. et al., 2013]. Parallèlement, les politiques émergentes de numérisation de contenus culturels ont progressivement ont montré la nécessité de renouveler les méthodes de travail dans ce domaine, notamment au vu du développement croissant de solutions pour la collecte, le traitement, la visualisation et l'archivage des données. Ce contexte ouvre une nouvelle ère pour l'étude, la sauvegarde et la valorisation des patrimoines. En effet, ces avancées ont largement modifié la façon de construire, d'échanger et d'accéder aux connaissances d'un domaine qui n'a jamais cessé de progresser sur l'analyse et l'interprétation de l'état de conservation des objets patrimoniaux. Bien que des multiples techniques et des nouveaux outils numériques commencent à trouver une place essentielle au sein des pratiques expertes de la conservation, une question importante se pose aujourd'hui pour la structuration et la mise en relation des données relatives à ce domaine. Dans le domaine spécifique du patrimoine architectural, les technologies de numérisation et visualisation tridimensionnelle (3D) ont joué un rôle très important dans les dernières années concernant l'analyse métrique du bâti [Boehler W. et al., 2002a].

En effet, malgré le fait qu'un modèle 3D « brut » (c'est-à-dire directement issu d'un dispositif d'acquisition tel qu'un scanner laser) soit désormais une entité que l'on peut obtenir facilement, cette représentation géométrique ne suffit pas à répondre aux exigences d'observations et d'analyses réelles des acteurs de la conservation du patrimoine bâti. Pourtant, ce type de modèle renferme des données métriques très précises pouvant donner lieu à des informations quantitatives pertinentes pour l'étude de l'état de conservation. Ensuite, si des solutions pour la reconstruction géométrique des objets numérisés atteignent aujourd'hui une certaine maturité en termes de robustesse et de précision, l'élaboration de représentations 3D directement utilisables par les experts du patrimoine à des fins d'analyse reste à améliorer.

Mais au-delà de la simple représentation 3D, bien d'autres questions sont à prendre en compte pour envisager l'établissement d'un environnement numérique pour la gestion de l'information dans ce domaine.

D'une part, la description et la compréhension du patrimoine bâti font appel à un nombre élevé et très hétérogène de sources documentaires (textuelles, graphiques, vocales) et de données analytiques (provenant de l'analyse de prélèvements, données provenant de capteurs thermo-hydriques, données cartographiques, etc.). Ces dernières peuvent fournir des informations historiques, archéologiques et constructives concernant l'ouvrage

patrimonial étudié. Les données acquises sont également liées à des pratiques scientifiques diverses et particulières à chaque corps de métier (protocoles d'acquisition, instruments, etc.). La manière de les acquérir, liée à l'acteur réalisant l'observation, permet de les contextualiser et de leur donner du sens.

D'autre part, malgré leur certaine complémentarité, ces sources documentaires et ces données analytiques sont très souvent disjointes les unes des autres. La structuration d'informations hétérogènes et l'étude de modalités d'accès pertinentes sont alors des questions primordiales à aborder. D'autant plus que la gestion de l'ouvrage passe généralement par plusieurs acteurs tels que le propriétaire (souvent maître d'ouvrage), les maîtres d'œuvre, les tailleurs de pierre et les scientifiques (conservateurs, micro biologistes, chimistes, géologues, spécialistes des matériaux, architectes, historiens et ingénieurs). La diversité d'experts, intervenant dans le projet de restauration du bâtiment, nécessite donc de fédérer et archiver de manière cohérente l'ensemble des données produites par chaque corps de métier, et de mettre en place des méthodes et des outils communs (multi-utilisateurs et multi-modaux) d'aide à la décision.

L'analyse de ce contexte fait clairement émerger le besoin de solutions innovantes et pertinentes pour relier les étapes d'acquisition et de restitution tridimensionnelle de la morphologie du bâti à celle de la construction d'une représentation sémantiquement enrichie intégrant la caractérisation de l'état de conservation ainsi que l'organisation de données et informations complémentaires. Ceci a pour but d'introduire un environnement numérique, une véritable plateforme de travail collaborative permettant de collecter, de structurer et de corréler les informations provenant des multiples acteurs de la conservation. Par conséquent, la collecte spatialisée et l'analyse de données hétérogènes ainsi que l'extraction et la corrélation d'informations complémentaires sont des problèmes majeurs qu'il est nécessaire d'aborder au travers d'une analyse contextualisée des connaissances du domaine. Par ailleurs, la structuration de ces données et informations s'avère essentielle pour les conservateurs et administrateurs des biens culturels, confrontés au quotidien au problème de fusion, de documentation et d'archivage concernant les contributions, provenant de différents acteurs, ainsi que de les mettre en relation afin de prendre des décisions sur les actions de restauration à programmer.

1.2. Problématique et Objectifs

Dans la partie précédente, nous avons vu à quel point l'étude de l'état de conservation d'un édifice est un système complexe intégrant des multiples acteurs et activités. Les contributions de ces acteurs sont généralement regroupées et synthétisées au sein de documents de différentes natures concernant les observations directes et les analyses non-destructives sur site, les diagnostics de l'état sanitaire, le prélèvement et l'analyse d'échantillons, la description du contexte environnemental, etc. Toutes ces sources sont généralement mises à disposition par les différents acteurs sous formes de documents imprimés (parfois livrés en format numérique) incluant textes, images, cartographies, etc. À

ces documents, s'ajoutent les relevés métriques de l'objet, généralement élaborés sous forme de dessins techniques à l'échelle, aujourd'hui de plus en plus accompagnés de nuages de points 3D issus d'une acquisition lasergrammétrique ou photogrammétrique.

L'hétérogénéité de ces documents, unie à la complexité des activités qui les produisent, font déjà surgir deux problèmes : comment structurer et relier ces données de nature différente ? Comment documenter les activités menées par les multiples acteurs de la conservation ?
Ces deux verrous permettent d'identifier un premier besoin concernant l'identification d'une chaîne de traitement de l'information incluant l'acquisition des données métriques, l'analyses de surfaces, des structures et des matériaux, ainsi que l'organisation des sources documentaires nécessaires à l'interprétation de l'état de conservation.
Un autre besoin concerne l'accès, le partage et l'archivage pérenne de ces données et informations. Aujourd'hui encore, les développements informatiques en matière de gestion de données et d'imagerie numérique ne sont pas suffisamment partagés et exploités par la communauté de la conservation du patrimoine. La première conséquence est que de nombreuses bases de données élaborées en interne par les différents services comme les laboratoires (sans vision à long terme pour la conservation et le stockage) souffrent d'un accès restreint. Par ailleurs, la masse exponentielle des données produites posent de graves problèmes de stockage, d'organisation, d'accessibilité et de conservation numérique. De plus, mise à part les questions de l'interopérabilité des supports d'observations et d'analyse (formats, logiciels d'édition, etc.), un des principaux verrous à lever concerne la nécessité de croiser des acquisitions multi-capteurs, d'intégrer des niveaux de détails, et de filtrer des informations en fonction de critères spatiaux et temporels en particulier.

Les verrous et besoins présentés ci-dessus nous permettent d'identifier l'objectif principal de ce travail de recherche qui consiste à **concevoir un système permettant de collecter, de mémoriser et de relier sémantiquement les observations et les analyses que les experts produisent durant l'étude de l'état de conservation d'un objet patrimonial**.

Par rapport au paysage scientifique et technologique actuel, cet objectif peut se décliner en la recherche de solutions pour :

- Représenter d'un point de vue informatique les observations scientifiques des experts contribuant à l'analyse de l'état de conservation tout en identifiant les zones de recouvrement de leurs domaines de connaissances ;
- Localiser dans l'espace et dans le temps toutes ces observations en tenant compte de la complexité morphologique et des niveaux de détails requis pour l'analyse de l'objet patrimonial ;
- Explorer le potentiel de la corrélation de niveaux de lecture multiples reliés à l'étude pluridisciplinaire de l'objet par le biais d'une intégration cohérente de descripteurs qualitatifs et quantitatifs.

La prise en compte complémentaire de ces trois sous-objectifs permettra d'aborder de façon structurée la question de la mise en relation sémantique d'une masse importante de données

hétérogènes non interprétées, tout en proposant parallèlement une solution accessible et flexible de référencement spatial des données collectées et analysées par les experts de la conservation.

1.3. Projet et communauté scientifique de la thèse

Ce travail de recherche s'inscrit au sein du projet MONUMENTUM (MOdélisation NUMérique et gEstion de doNnées pour la conservaTion des strUctures Maçonnées), financé par l'Agence National de la Recherche (ANR). Ce projet collaboratif a pour ambition de prendre en charge de façon rationnelle l'ensemble des éléments d'ordre technique en les intégrant au sein d'une réflexion d'ordre méthodologique liée aux questionnements scientifiques soulevés par la conservation des biens historiques. L'analyse de l'ouvrage passe donc par plusieurs acteurs ou groupes de recherche possédant chacun leurs protocoles d'acquisition, leurs outils de traitement permettant d'accéder à des informations relatives à leur domaine d'expertise, puis enfin aux connaissances par rapport au domaine de la conservation du patrimoine. Le consortium du projet est composé de cinq partenaires.

- Le CICRP (Centre Interdisciplinaire de Conservation et Restauration du Patrimoine, à Marseille) intervient auprès de l'état, particulièrement dans le domaine de la compréhension des mécanismes d'altération affectant les peintures (sur tout support) d'une part et les pierres de constructions d'autre part.

- Le LMGC (Laboratoire de Mécanique Génie Civil, à Montpellier) est expert en modélisation de systèmes mécaniques complexes en interaction, et est impliqué pour effectuer des simulations mécaniques de structures telles que les édifices maçonnés (considéré comme des systèmes multi-corps).

- L'IGN-ENSG (Institut national de l'information géographique et forestière – École Nationale de Sciences Géographiques, à Paris) fournit des compétences en termes de photogrammétrie (modélisation 3D basée sur les images) afin de reconstruire la morphologie des objets patrimoniaux.

- Le PRISME (laboratoire Pluridisciplinaire de Recherche Ingénierie des Systèmes, Mécanique, Énergétique, à Orléans) est spécialisé dans la recherche expérimentale concernant la durabilité des monuments en pierre, et la caractérisation physico-chimique des matériaux liés à leurs dégradations, en menant des simulations en laboratoire comme le vieillissement de la pierre.

- Le MAP (Modèle et simulation pour l'Architecture et le Patrimoine, Marseille), laboratoire d'accueil de cette thèse de doctorat, est le coordinateur du projet en tant que spécialiste dans les domaines de la caractérisation sémantique de représentations géométriques ainsi que de la structuration d'informations hétérogènes.

Dans le cadre de la collaboration entre ces partenaires, notamment au vu de la diversité des profils disciplinaires impliqués, un enjeu transversal consiste à réunir et intégrer l'ensemble des analyses, des interprétations et des synthèses, que l'on peut conduire sur les objets patrimoniaux au sein de représentations numériques sémantiquement enrichies. Cet enjeu transversal constitue les fondements méthodologiques des objectifs principaux du projet MONUMENTUM :

- Acquérir et maîtriser les informations sur le réel et assurer une continuité avec un modèle 3D « intelligible » à travers la définition d'aspects sémantiques.
- Caractériser l'état « physique » du bâtiment via des observations de l'état des surfaces en s'appuyant sur une description cartographique et sur l'imagerie numérique.
- Pérenniser et mettre en corrélation ce jeu de données en mettant en œuvre un modèle de données basé sur une ontologie de domaine et des outils d'aides à la restauration (outil d'analyse, de diagnostic et de prise de décision) spécifiques au domaine de la conservation.
- Garantir un suivi temporel basé sur des constats d'états datés et réalisés périodiquement sur le bâtiment, essentiel pour la prévention et la planification des actions futures de restauration.

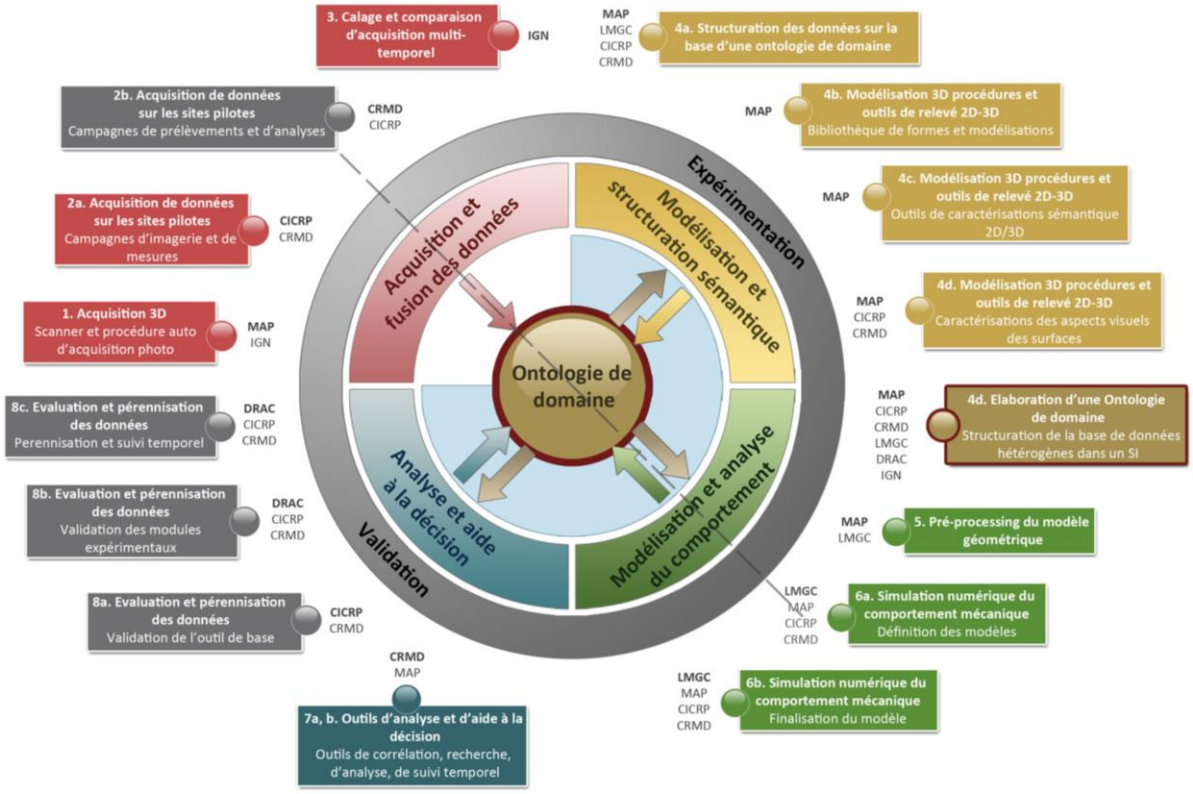


Figure 1 : Schéma générale de la structure du projet ANR MONUMENTUM.

Le projet MONUMENTUM est découpé selon quatre axes principaux (Acquisition et fusion des données ; Modélisation et structuration sémantique ; Modélisation et analyse du

comportement ; Analyse et aide à la décision) accompagnées des contributions scientifiques distinctes des partenaires impliqués (Figure 1).

Ces quatre axes sont interconnectés grâce à un échafaudage conceptuel central : une ontologie de domaine, qui constitue l'objet de recherche de ce travail de thèse.

- Un premier aspect du projet concerne l'acquisition et la fusion de données in situ, représentant l'ensemble des ressources qu'il est possible d'obtenir. Lors de celui-ci, des méthodes ont été définies pour la mise en correspondance géométrique de plusieurs types d'acquisitions (lasergrammétrie, photogrammétrie, prélèvement, thermographie Infra-Rouge, etc.) en vue d'élaborer un support d'analyse multicouche. Le but étant de produire des cartographies 2D/3D d'observation multidimensionnelles et multi-échelles avec différents niveaux de complexité. Cette étape est primordiale et doit faire l'objet d'une documentation fine.

- Un second aspect constitue une étape déterminante pour la représentation de la morphologie de l'édifice au travers d'une modélisation et d'une structuration sémantique. Ce processus permet de transformer des données tridimensionnelles brutes en un modèle 3D intelligible par l'exploitation d'une représentation géométrique enrichie par une description sémantique intégrant des attributs relatifs aux structures (appareillages structurant les composants architecturaux macroscopiques), aux surfaces (phénomènes altérations), ainsi qu'aux matériaux de construction. Le but étant d'intégrer et de structurer des données et informations hétérogènes autour d'un support de spatialisation de multiples facteurs qui décrivent l'état de conservation des édifices.

- Un troisième aspect se concentre sur la modélisation et l'analyse du comportement mécanique en utilisant des représentations géométriques spécifiquement élaborées pour décrire les principaux éléments de structure (d'un point de vue global), les appareillages (technique de construction), puis les joints et les pierres (d'un point de vue local). À ces aspects de modélisation et simulation du comportement mécanique des structures s'associent des analyses scientifiques permettant de faire ressortir les caractéristiques des matériaux dans le dessein de caractériser l'état « physique » du bâtiment.

- Un quatrième aspect se concentre sur la conception et le développement d'un outil d'analyse et d'aide à la décision permettant de gérer les multiples ressources générées au sein des études pluridisciplinaires de l'état de conservation d'édifices historiques au sein d'un environnement numérique reliant acteurs, activités et données.

- Un cinquième aspect, transversal aux quatre précédemment mentionnés, concerne la construction d'une **ontologie de domaine**, l'objet de cette thèse de doctorat. Cet

aspect du projet considère la mise en relation des données acquises, avec l'extraction d'informations pertinentes, puis les connaissances mobilisées pour l'analyse et l'interprétation. Elle facilite, par le biais d'un modèle conceptuel, la compréhension générale d'un ensemble décrivant explicitement les connaissances d'un domaine, à la fois d'un point de vue terminologique (par des termes) et logique (par une axiomatique définissant les entités du domaine et leurs propriétés).

1.4. Terrains d'expérimentation

La chaîne de traitement et de gestion des données proposée au sein du projet ANR MONUMENTUM est expérimentée sur des sites pilotes. La sélection de ces sites a été réalisée en réponse aux différentes problématiques de la conservation réunissant plusieurs axes disciplinaires. Le but étant d'atteindre un niveau d'analyse complet concernant deux cas en particulier : l'étude, des dégradations d'une part, concernant un édifice en pierre de taille, et d'autre part, relatives à un édifice décoré de peintures murales. Les expérimentations sur ces deux sites sont coordonnées par le CICRP.

Concernant l'étude des formes d'altérations de la pierre, c'est le site de « l'église Saint-Maurice » de la ville de Caromb qui a été choisi (Figure 2). C'est sur ce bâtiment que le travail de thèse s'est davantage porté du fait des nombreuses analyses et recherches réalisées sur le sujet, afin de valider l'approche proposée. Cette église se situe dans le département du Vaucluse, à neuf kilomètres de Carpentras et à trente-six kilomètres d'Avignon.

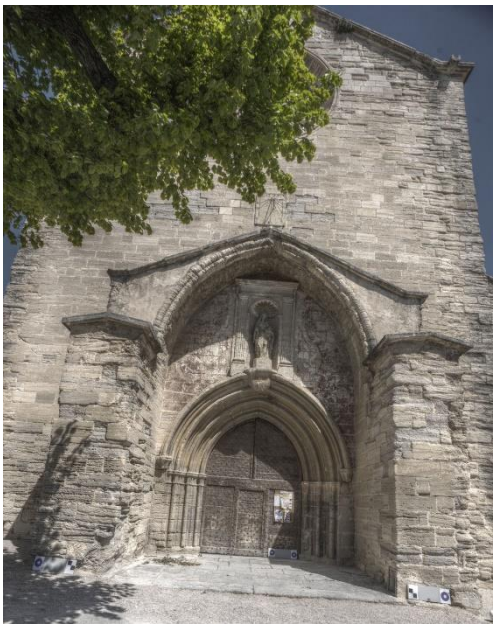


Figure 2 : 1ème site d'expérimentation, l'église Saint Maurice de Caromb.

Il s'agit d'un édifice roman (XIVème siècle) orienté nord-sud et flanqué à l'Est d'un clocher octogonal et à l'Ouest d'une grande chapelle double gothique ajoutée à la fin XVème siècle. Ce bâtiment, qui a subi de gros travaux de restauration sur plusieurs facettes de son enveloppe, a aussi fait l'objet d'analyses précises, dans le cadre d'un travail de recherche,

notamment sur un matériau caractéristique décliné sous plusieurs formes : la pierre de Caromb [Berthonneau J. et al., 2012]. Ces analyses portent sur les facteurs ainsi que l'évolution des phénomènes de détérioration. La dégradation la plus significative, largement observée sur ce type de matériau étant la desquamation en plaque.

Concernant les peintures murales, nous avons choisi de porter notre étude sur la « Chapelle Notre-Dame des Fontaines » localisée à La Brigue (Figure 3).

Figure 3 : 2ème site d'expérimentation, la chapelle Notre dame des Fontaines (La Brigue) : intérieur à gauche et extérieur à droite.

Cet édifice se situe à environ 4 km du village de La Brigue, à une altitude de 900 mètres et au pied de la passe de Collardente, qui mène de Tende à San Remo, le long d'un ancien chemin muletier. Ses murs ont été décorés par Giovanni Baleison (chœur) et Giovanni Canavesio (nef) à la fin du XVe siècle.
Cette chapelle a subi des altérations importantes au cours de son histoire et a été plusieurs fois restaurée (la première restauration daterait de 1583). Ces fresques ont été très peu documentées du point de vue des matériaux présents, des techniques d'exécution des deux peintres et des mécanismes de dégradations qui ont conduit à des restaurations successives, dont la dernière remonte à 1997. Différentes formes de dégradations affectent la couche picturale, ainsi que le support de la peinture (décollement d'enduits). Par ailleurs, des fissures de profondeur plus ou moins importantes et dont certaines ont été rebouchées par le passé, sont visibles sur certaines parties de l'édifice. Certaines d'entre elles auraient pu être générées par des tremblements de terre anciens.

1.5. Structuration du document

Ce manuscrit est structuré comme suit. Le chapitre 2 sera dédié à l'explication de trois entités essentielles du système que nous étudions ainsi que la façon dont elles interviennent dans les processus d'acquisition, de restitution et de compréhension du patrimoine culturel

construit : la donnée, l'information et la connaissance. Nous allons particulièrement nous intéresser au large panel de données qu'il est possible d'acquérir aujourd'hui en vue de documenter le patrimoine, pour ensuite s'intéresser aux modalités permettant d'en extraire des informations par les biais des connaissances expertes mobilisées pour l'analyse et l'interprétation de l'état de conservation.

Le chapitre 3 dresse l'état de l'art des systèmes de gestion existants dans ce domaine spécifique. Des solutions informatiques permettent de représenter et structurer les données, les informations et les connaissances : les Systèmes de Gestion de Bases de Données (SGBD), les Systèmes d'Information (SI) et enfin les Systèmes basés sur les Connaissances (SBC). Dans cette partie, nous introduisons la notion d'ontologie de domaine qui est le sujet central de ce travail de recherche, en explicitant les différents niveaux de représentation des connaissances que ce modèle conceptuel permet de gérer.

Cet état de l'art permettra de souligner les limites et les apports des solutions existantes afin de positionner la solution que nous proposons, dans le chapitre 4, pour suivre, documenter, quantifier et qualifier l'état de conservation d'un objet patrimonial au travers de la corrélation d'observations scientifiques spatialisées. La conception de ce modèle conceptuel est expliquée par étapes, en décrivant toutes les dimensions intégrées et leur mise en relation afin d'expliciter l'établissement d'un « continuum numérique » entre les données, les informations et les connaissances du domaine. Nous exploitons ensuite le modèle ontologique proposé et le mettons en situation à travers des scénarii d'utilisation, pour tester sa validité.

Le chapitre 5 propose dans un premier temps un plan d'implémentation dans lequel l'ontologie de domaine obtenue sera intégrée en relation avec d'autres développements informatiques en cours dans le cadre du projet ANR MONUMENTUM. La question de la mise en relation du modèle conceptuel avec les composants d'un système d'informations sera traitée en présentant les ressources logicielles exploitées pour ensuite expliquer leurs articulations autour de l'ontologie de domaine. Nous présentons dans un second temps, la validation de notre approche méthodologique dans le cadre d'une expérimentation en impliquant notre premier cas d'étude : le mur Est de l'église Saint-Maurice de Caromb.

Enfin, le chapitre 6 présente les conclusions et les perspectives de ce travail.

Chapitre 2. Des données aux connaissances pour l'étude de l'état de conservation du patrimoine architectural

Dans le domaine de la conservation, de multiples acteurs réalisent des acquisitions de tous types ayant pour but de caractériser, d'identifier une entité observable appartenant à l'intégrité du bâtiment dans son environnement. Pour cela, l'expert réalise des acquisitions sur site utilisant des techniques dites Non-destructives (ENG : NDT, Non destructive technique) ou techniques non invasives afin de conserver l'intégrité morphologique du bâtiment étudié. D'autres techniques d'acquisition, telles que la prise d'échantillons dites invasives. Les échantillons résultants sont ensuite analysés en laboratoire. Toutes ces acquisitions, qu'elles soient réalisées in situ et/ou en laboratoire, produisent des données hétérogènes permettant aux experts de la conservation de générer des informations pertinentes afin de comprendre certains phénomènes complexes (les altérations par exemple). En outre, cette production massive de données pose de nouveaux défis quant à leur exploitation, leur diffusion et leur valorisation effective dans et au-delà des sciences du patrimoine. Les difficultés principales résident dans la nature complexe de ces données notamment leur hétérogénéité sémantique.

S'inscrivant au sein d'un contexte pluridisciplinaire, ces informations diverses, produites et structurées en lien direct avec les données acquises, constituent une source essentielle pour la construction collective de connaissances favorisant l'observation, l'analyse et la compréhension du phénomène de dégradation. Cette partie du manuscrit sera, dans un premier temps, consacrée à définir les différents niveaux d'abstraction par lesquels la donnée brute passe pour se transformer en connaissance et les différents éléments qu'il faut prendre en compte pour passer d'un type d'entité à un autre. Dans un second temps, nous nous intéresserons aux types de ressources qu'il est possible de produire dans le domaine spécifique de la conservation.

Concernant la donnée, l'information et la connaissance, nous allons d'abord proposer une définition de chacun d'eux en nous intéressant aux relations abstraites que ces entités ont les unes avec les autres.

Par la suite, nous présenterons les différents types de données d'information et connaissances connues dans le domaine du patrimoine en soulignant la façon de les représenter d'un point de vue informatique. En effet, il existe une entité de base à partir de laquelle certains traitements sont réalisés en fonction de ce que nous souhaitons faire ressortir. Cette entité de base est la donnée. À partir de cette dernière et par des liens conceptuels implicites de prime abord, il est possible de générer ce que l'on appelle une information, permettant à l'expert qui l'a acquise, de contextualiser cette donnée en lui donnant un intérêt analytique. Les formes d'altérations sont très diverses et la compréhension de leurs mécanismes sont très complexes à comprendre et elles demandent de croiser des informations pour fournir des explications et hypothèses en vue de générer une stabilité (qualitative ou quantitative) au travers des connaissances acquises.

2.1. Données, Informations, Connaissances hétérogènes : définitions essentielles

Donner du sens est une capacité fondamentale que possède un être humain tout au long de son évolution et dont le processus opère de manière continue [Ackoff R. L., 1989]. L'Homme dispose de données, traite des informations puis fait des liens avec des connaissances mémorisées lui permettant d'entreprendre des actions [Gaillard J. C. et al., 2013]. Il acquiert ainsi des compétences et donc une certaine expertise en lien avec le domaine d'intervention, qu'il est capable de mettre en œuvre de manière répétée. Que ce processus d'enrichissement se produise dans le système cognitif humain et/ou dans le domaine de l'informatique [Sowa J.F., 1984], ces trois concepts-clés sont évidemment en interrelation, mais la nature des liens que l'on peut trouver entre eux, ainsi que leur signification, est discutable [Bernstein J. H., 2011] [Schumaker R. P., 2014]. C'est pour cela que nous donnerons, pour chaque terme, une définition d'un point de vue de l'humain capable de penser, donc d'un point de vue cognitif, pour ensuite donner une signification appliquée dans le domaine de l'informatique.

2.1.1. La donnée : la base de l'information

La donnée est un symbole, une entité brute qui n'a pas de signification au-delà de son existence. Elle peut prendre plusieurs formes, utilisables ou non [Sowa J.F., 1984].

Il est difficile pour l'Homme d'observer une donnée sans exploiter un minimum le contexte dans lequel elle se situe pour lui donner une signification. Le processus cognitif permettant d'apporter du sens à la donnée est très bref, car chacun, d'après son expérience et ses connaissances, peut directement la contextualiser. La captation de la « donnée » chez l'Homme est étroitement reliée avec les cinq sens physiologiques activés grâce à des stimuli extérieurs. Nous pouvons la considérer comme un fait d'un point de vue visuel. Il est donc difficile de la représenter dans notre esprit en tant que tel. Ce qui pourrait s'apparenter à une donnée dans ce cas de figure, ce serait une valeur qualitative et quantitative issue de la mesure du potentiel d'action au sein du système nerveux central et périphérique.

D'un point de vue informatique, la donnée repose sur la même base et peut être simplement caractérisée par une suite de bits. Elle peut également être appelée donnée symbolique élémentaire, car elle peut prendre plusieurs formes (lettre, chiffre, octet, couleur, etc.). La donnée est une entité objective, car dépourvue de toute ambiguïté, et peut être observable à deux niveaux. D'une part, elle peut être positionnée sur un support matériel et peut être partageable et mobile indépendamment de l'acquéreur. D'autre part, elle n'est pas contextualisée, car elle est dépendante d'une syntaxe ou d'une structuration totalement conventionnelle et dont l'environnement de validation peut être très large et même universel dans la plupart des cas [Liew A., 2013]. Malgré cet aspect d'adaptation, son contenu intelligible ou sémantique est très limité, car sa forme de plus bas niveau, étant le bit, ne donne aucunement de sens [Ackoff R. L., 1989].

La donnée peut également être le résultat direct d'une mesure pouvant être acquise par un outil de supervision exploité par une personne ; elle peut d'ores et déjà être stockée et mise à disposition dans une base de données [Zins C., 2007]. Ce qui est intéressant dans cette notion, c'est que la donnée, sous sa forme brute, ne permet pas de prendre une décision sur une action à mener. Cependant, elle peut parfois posséder les propriétés d'un objet existant ou d'un événement, mais ces propriétés ne sont interprétables que lorsque la donnée elle-même est contextualisée et donne naissance à une information.

Les données ne sont pas seulement comprises par un ordinateur, mais peuvent également être interprété par l'homme, nous les qualifierons « d'interprétables ». C'est le cas particulièrement pour les données non structurées. Nous pouvons donner l'exemple de ce type de données « ce bâtiment a été construit avec trois types de pierre calcaire ». Ce type de données se rapproche davantage de l'information car elle prend du sens directement en l'entendant.

À l'inverse, d'autres types de données sont « structurées » donc interprétables par l'ordinateur. Voici des exemples en lien avec des phénomènes rencontrés dans le domaine de la conservation (Figure 4) :

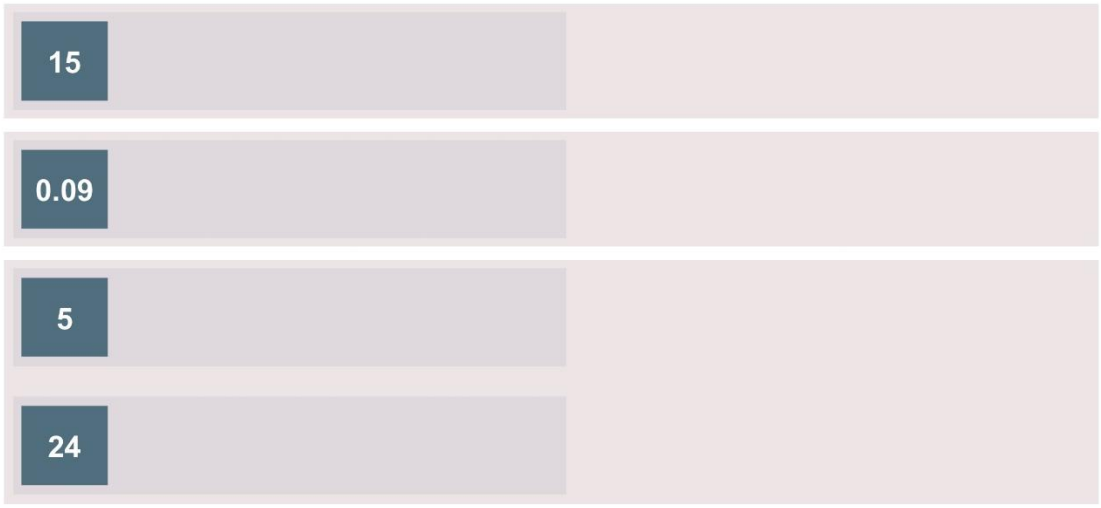


Figure 4 : Exemple de donnée.

Lorsque l'on associe une signification à la donnée, cette dernière devient une information pour l'expert qui la manipule. De plus, la corrélation de données produit un autre niveau d'information.

2.1.2. L'information : la donnée contextualisée

L'information, du latin in forma, se caractérise à travers une mise en forme dans des formats fixés dans des environnements normalisés et est l'intermédiaire entre la donnée et la connaissance [Mongin P., 2002]. En effet, à partir d'un même jeu de donnée, il est possible de générer des informations de formes différentes. Par exemple, les données thermiques d'un

bâtiment peuvent être formulées sous la forme d'un tableur Excel, d'un texte d'une communication orale, ou même sous la forme d'un graphique.

L'information est donc par définition une donnée interprétée ou mise en scène d'une façon utile, justifiée et justifiable. La mise en contexte de la donnée acquise crée une valeur ajoutée pour constituer une information. L'information est donc porteuse d'un niveau sémantique (un sens) plus riche que la donnée en elle-même, mais de par le traitement, l'interprétation d'un expert via une interface de représentation de l'information ou même à travers son système cognitif, rend la donnée beaucoup plus subjective [Bernstein J. H., 2011]. Grâce à cette plus-value sémantique, la donnée peut être utilisée et exploitée.

L'action « d'informer » est normalement utilisée pour communiquer. Ce terme vient également du latin « informare » qui signifie former, ou construire une idée à partir de quelque chose d'existant. La donnée est quelque chose de persistant alors que l'information est éphémère, dépendante de tout contexte et de l'interprétation du destinataire. Par conséquent, l'information est une donnée reçue à travers un processus de communication qui induit généralement à une prise de décision.

D'un point de vue informatique, l'information est représentée par la donnée à laquelle on a associé un sens et une interprétation. Grâce à une telle entité, il est possible pour un expert d'un domaine de prendre une décision (d'échelle locale ou à petite échelle) sur une action à mener.
Voici des exemples en continuité avec les précédents et en lien avec des phénomènes rencontrés dans le domaine de la conservation (Figure 5) :

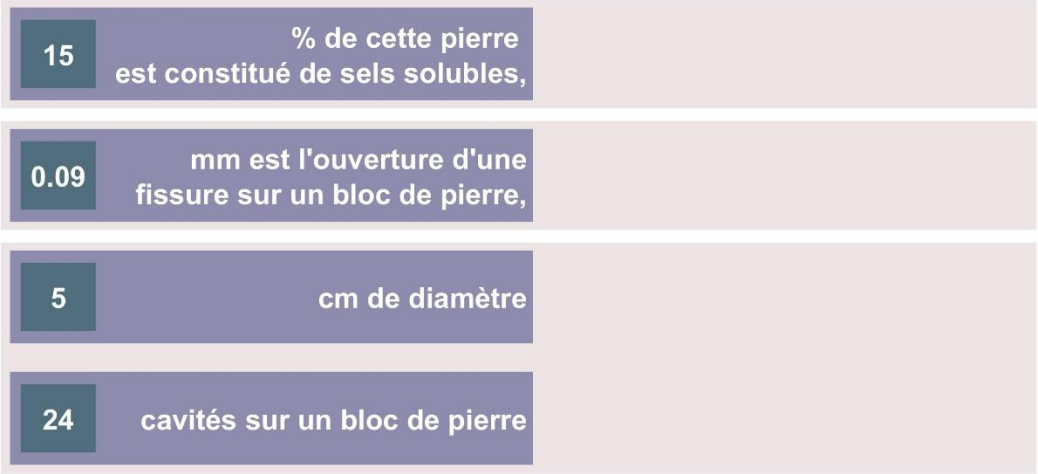


Figure 5 : Exemple d'information par la donnée contextualisée.

Par rapport aux connaissances, l'information peut être définie comme une axiomatisation de celle-ci [Gardoni M., 1999] [Mongin P., 2002].

2.1.3. La connaissance : la stabilité individuelle et collective

[Zins C., 2006] décrit deux types de connaissances : la connaissance tacite et la connaissance explicite.

La connaissance tacite (incorporée) renvoie à la connaissance que possède intrinsèquement un individu. Des experts ou même des individus alphas traitent des informations et en interprètent une signification en fonction de leurs propres expériences, de leurs idéaux, voire même de leurs émotions et de leurs valeurs.

Elle est par conséquent le résultat d'une collecte appropriée d'information dont l'intention est qu'elle soit utilisée. C'est une entité qui est très largement subjective par rapport à la donnée qui a un plus haut niveau d'objectivité.

Cette notion est importante, car elle permet une certaine crédibilité dans un domaine. L' « expérience », qui induit la connaissance, peut atteindre une certaine stabilité : nous pouvons parler d'expertise. La connaissance possède une dimension technique (habileté et aptitude concrète) puis une dimension cognitive bien ancrée (« schéma, modèles mentaux, croyances, perception que l'on considère comme allant de soi »). Lorsqu'un expert mémorise des informations, c'est qu'il a amassé un certain degré de connaissances. Elle correspond au résultat de la structuration et de l'organisation de ces informations qui se sont développées au sein d'un système cognitif ou fait partie intégrante du patrimoine cognitif d'un individu.

De manière plus large, la connaissance regroupe l'ensemble des savoirs (que l'on peut appeler également connaissances déclaratives) dans la vie d'un individu et partageable au sein d'un groupe dans un domaine particulier [Studer R. et al., 1998]. Dans ce domaine d'expertise, il est possible d'identifier des savoir-faire comme étant des connaissances procédurales, et des savoir-être comme étant des connaissances comportementales : tous deux renferment un niveau haut de sémantique. La subjectivité qui en découle n'est pas forcément liée à un individu en tant que tel, mais davantage au niveau des groupes sociaux divers auxquels l'individu est intégré, influençant son action. La richesse sémantique, provenant des connaissances tacites, est de niveau élevé, car leurs significations sont multiples, intimement dépendantes du contexte expert et humain dans lequel ces entités sont utilisées. Un domaine d'expertise forme des compétences en exploitant « l'interaction dynamique entre les différents types de savoirs ». Le groupe d'experts formés est représentatif de stock de connaissances ou capital humain du domaine [Zins C., 2007].

Les connaissances peuvent être transformées en un type plus concret : les connaissances explicites. C'est une connaissance formalisée (énoncée dans un langage formel) et transmissible, partageable sous forme de documents réutilisables. Le seul problème rencontré lors de ce processus de formalisation c'est que la connaissance standardisée risque de perdre tout état de contexte. En effet, pour exploiter de manière pertinente une connaissance codifiée, il est fondamental de reproduire le contexte dans lequel elle a émergé [Zins C., 2006].

Grâce à la connaissance, les experts du domaine sont capables de prendre une décision sur une action à mener et d'apporter une plus grosse interprétation concernant un phénomène observé.

Voici des exemples en continuité avec les précédents et en lien avec des phénomènes rencontrés dans le domaine de la conservation (Figure 5) :

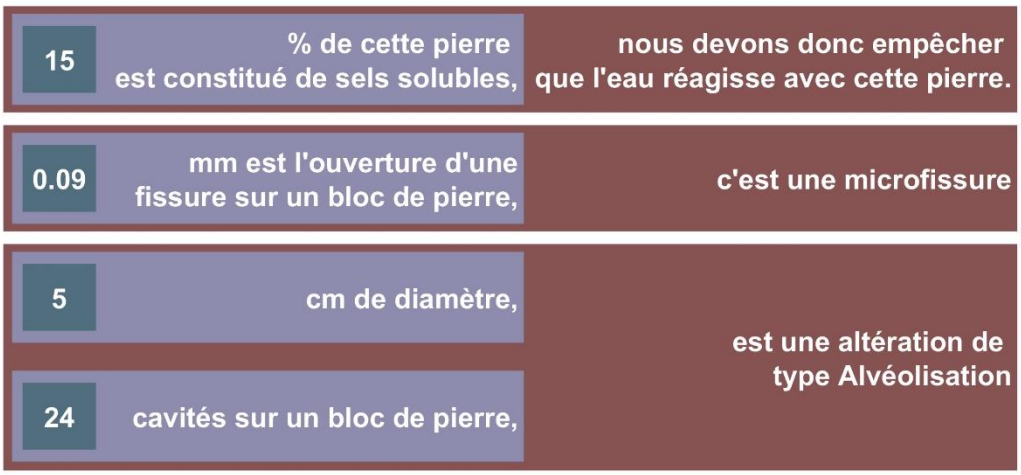


Figure 6 : Exemple de connaissance acquise à travers l'information.

Afin d'obtenir cette connaissance, l'expert a fait appel aux connaissances tacites qu'il possède puis, les a exploitées en vue de les mettre en relation avec les informations qu'il dispose [Nonaka I., 2002].

De nos jours, dans le domaine de l'informatique il est possible de représenter de la connaissance par le biais de modèles conceptuels. Inversement proportionnelle à la donnée, la connaissance est beaucoup plus difficilement représentable en informatique, car sa représentation demande de suivre certaines méthodes de conception stricte [Nonaka I., 2008].

2.1.4. Conclusion

Dans le domaine de l'informatique, il est plus aisé de représenter des données que des connaissances qui sont le résultat de la réflexion humaine dans un domaine spécifique.

Un concept considéré comme le sommet de ce modèle donnée-information-connaissance (Figure 7) est ce que l'on appelle la sagesse. Ce dernier est considéré comme étant la capacité d'augmenter l'efficacité et d'ajouter de la valeur, qui requiert des fonctions mentales, que l'on peut appeler le jugement. Celui-ci est très difficile à représenter, car il s'agirait alors de concevoir un modèle de réflexion propre à chaque individu.

Le domaine de la conservation du patrimoine fait appel à un grand nombre d'acteurs, regroupés en plusieurs sous-domaines, qui ont développé leurs connaissances dédiées, formalisées ou non, en se basant sur la collecte d'informations à partir de l'interprétation des données acquises. Dans ce domaine spécifique, quels types de données, informations et connaissances permettent à l'expert d'observer, d'analyser, et de comprendre les phénomènes complexes d'altération pour le suivi de la conservation ?

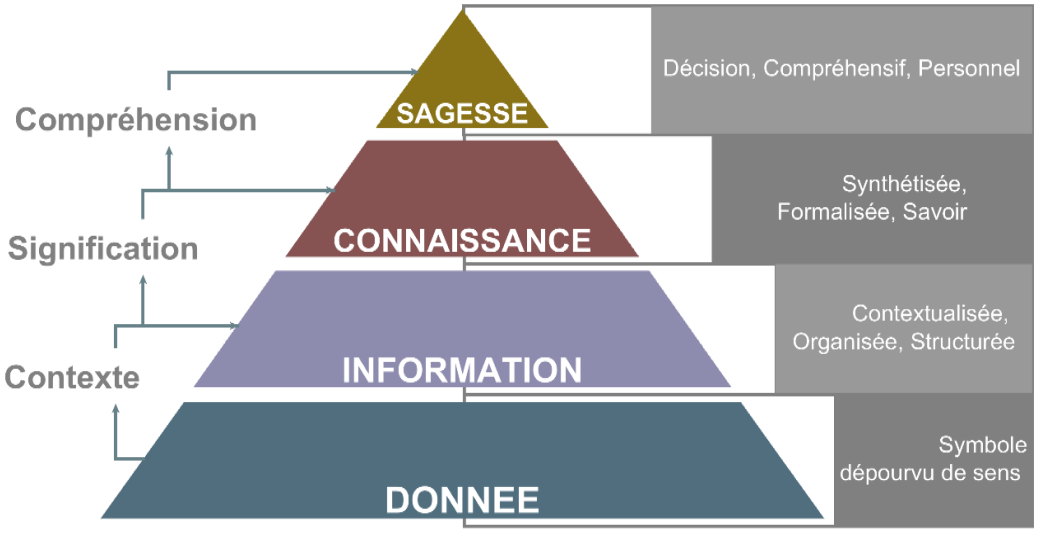


Figure 7 : Pyramide Donnée, Information, Connaissance et Sagesse (DIKW pyramid) [Liew A., 2013].

2.1.5. Une démarche diagnostic identifiée

Dans le domaine de la conservation, les experts effectuent des diagnostics en exploitant les données, les informations et les connaissances, mises à leurs dispositions et qui sont en perpétuelle évolution. Ceci fait émerger une notion de démarche, initiée par ce que l'expert observe et étudie. Afin de couvrir l'étude complète du domaine de la conservation pour un édifice, l'ensemble des experts passe par l'observation scientifique de trois composantes réelles essentielles : l'état visuel de la surface, la forme géométrique des parties constituant l'objet du patrimoine, et enfin la composition et son comportement par l'étude physico-chimique du matériau utilisé pour la construction [Artioli G., 2010]. Ceci permet de réaliser des diagnostics de l'état de conservation d'un édifice à un instant « t » de son histoire (Figure 8).

Sans nous soucier de l'interrelation des données hétérogènes produites par chaque corps de métier impliqué dans ce processus d'analyse et d'interprétation complexe, nous présentons dans les paragraphes suivant, les données, les informations et les connaissances manipulées dans ce domaine.

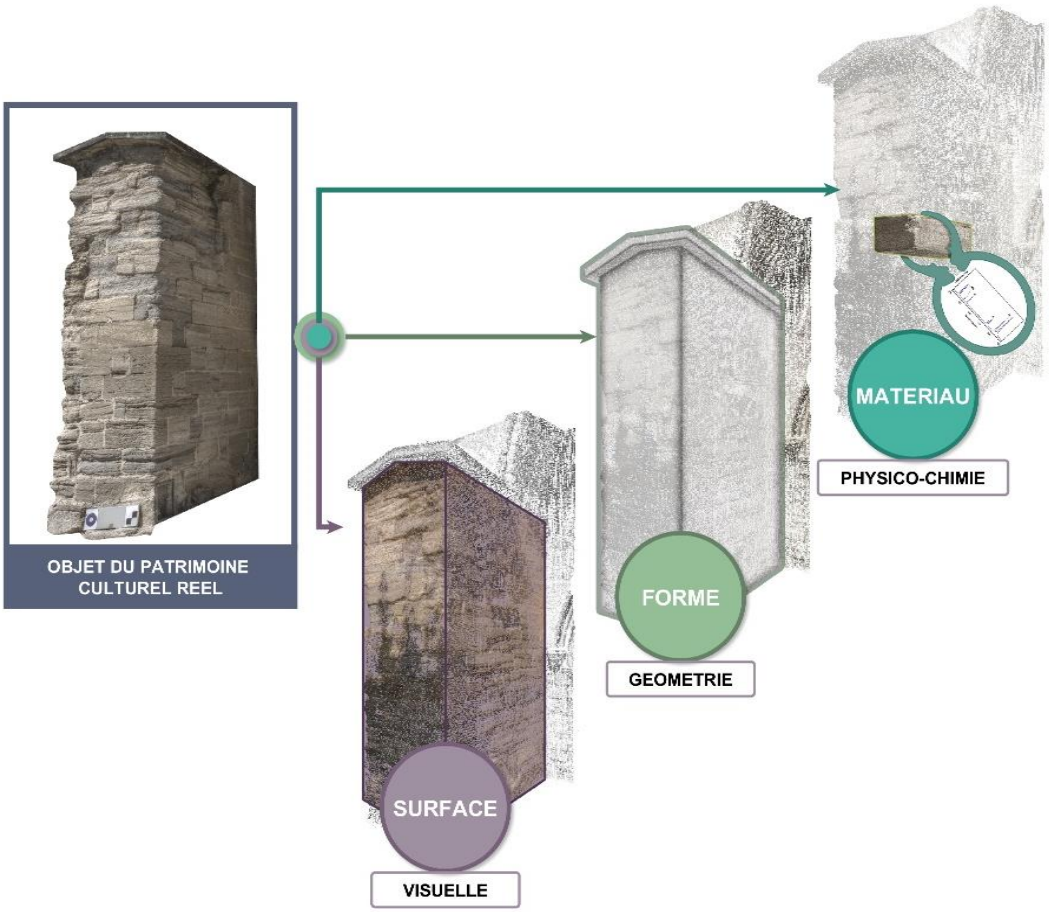


Figure 8 : Trois composantes d'études pour l'étude de la conservation du patrimoine culturel bâti.

2.2. Données issues d'acquisitions in situ

Les données, qui sont la base du concept d'information, sont générées à l'aide de techniques et de technologies d'acquisition spécifiques qui offrent de nouvelles possibilités aux experts pour en acquérir en grande quantité le long des campagnes d'études. En effet, les données acquises lors des observations sur le terrain contiennent un nombre important d'informations potentielles pouvant être extraites par différentes méthodes (section 2.3.). Dans les paragraphes suivants nous passons en revue les différentes catégories de données généralement manipulée dans le cadre de l'étude de l'état de conservation d'un édifice historique. Il s'agit des données issues de l'imagerie scientifique 2D et 3D (section 2.2.1), des prélèvements par échantillon physique (section 2.2.2) ainsi que des conditions environnementales (section 2.2.3).

2.2.1. L'imagerie scientifique 2D et 3D

De nos jours, les experts disposent d'un panel de capteur afin de rendre compte et de fournir des informations essentielles sur l'état de conservation d'un édifice patrimonial. Ces capteurs sont capables de fournir des données en deux et en trois dimensions afin d'élargir les moyens d'observations de l'objet étudié [Palaia L. et al., 2008].

2.2.1.1. *Imagerie scientifique 2D par capteurs photographiques*

Avant de présenter les différents types de données images qu'il est possible d'obtenir, il est primordial d'expliquer les types de capteurs exploités dans la photographie, car cela a un impact sur les données produites.

Les capteurs photographiques sont des composants électroniques photosensibles convertissant un rayonnement électromagnétique en un signal analogique. Ces capteurs utilisent l'effet photoélectrique pour restituer la lumière en image. Ceux-ci sont constitués de cellules photovoltaïques qui mesurent l'intensité de la lumière [Lanh T.V. et al, 2007]. Cette intensité lumineuse est ensuite transformée en courant électrique. Chaque point du capteur, qui compose une partie d'un pixel, enregistre l'intensité lumineuse pour produire une image. Le capteur est composé de deux éléments : le premier élément, composé de cellules photosensibles, possède trois filtres étant chacun sensible à une couleur (rouge, vert et bleu), puis le deuxième élément est composé d'un dispositif à transfert de charge.

On trouve aujourd'hui deux types de capteurs, le CCD (ENG : Charged Coupled Service, FR : Dispositif à transfert de charge) [Janesick J.R., 2001] et le CMOS (Complementary Metal Oxyde Semi-Conductor) [Bigas M. et al, 2006]. Ce dernier est le plus utilisé sur les appareils photographiques numériques de type Reflex. Les cellules photosensibles qui composent le capteur CMOS ne sont stimulées qu'à l'intensité et non à la couleur. C'est pourquoi un filtre est placé devant chaque photodiode, ne laissant passer qu'une seule des composantes (rouge, vert, bleu). Le filtre le plus couramment utilisé est le filtre de Bayer (Figure 9) [Bayer B., 1976] composé à 25% de filtres rouges, 25% de filtres bleus et 50% de filtres verts afin d'imiter la perception rétinienne de l'œil humain, plus sensible aux longueurs d'ondes correspondant au vert. Le processeur d'image associé au capteur photosensible combine ces trois couleurs primaires pour créer, à la suite de plusieurs étapes de traitement, une image couleur [Ramanath R. et al, 2005].

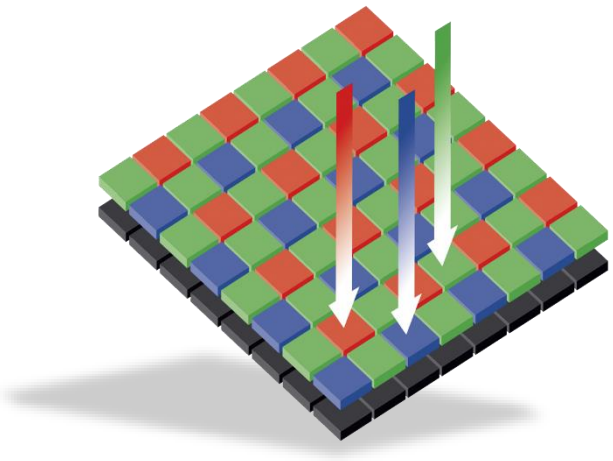


Figure 9 : Filtre couleur de Bayer.

La lumière agissant au niveau du capteur est un rayonnement électromagnétique. Ce dernier est défini comme étant une variation de champs électriques et magnétiques qui peuvent être décrits sous la forme d'une onde électromagnétique [Bonn F. et al, 1992]. Une analyse

spectrale permet de décomposer cette onde en ondes monochromatiques de longueur d'onde λ. Le spectre électromagnétique est la répartition de ces différentes longueurs d'onde et peut théoriquement s'étendre de zéro à l'infini. Ce spectre est divisé en plusieurs classes de rayonnements (Figure 10). La lumière du visible, que l'humain est capable de percevoir, ne représente qu'une petite portion de ce spectre.

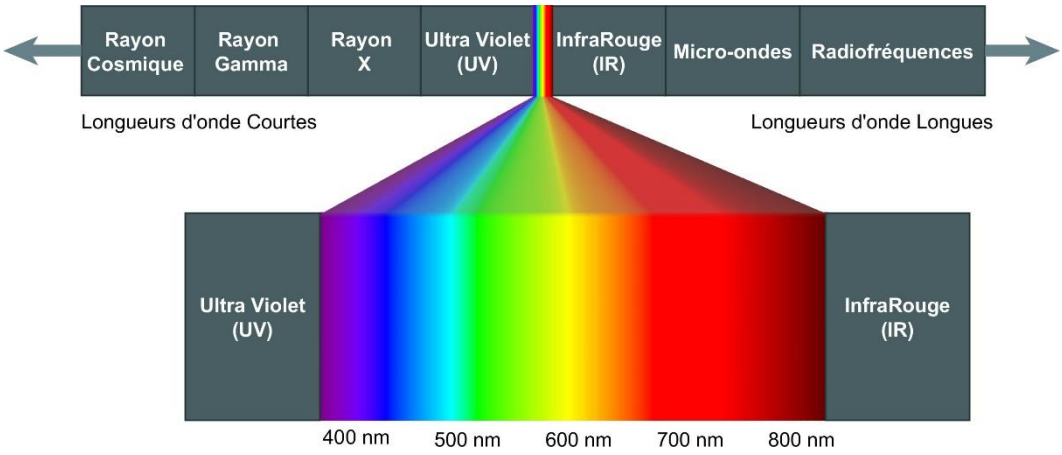


Figure 10 : Spectre électromagnétique et classe de rayonnement.

Ainsi, les rayonnements électromagnétiques (lumière) reçus par les capteurs ne se réduisent pas seulement aux rayonnements du visible. Toutes les longueurs d'onde du spectre électromagnétique peuvent potentiellement être captées. Cependant, les appareils de photographies numériques sont équipés de filtres afin d'éviter de capter ces rayonnements qui peuvent atténuer le rendu de l'image numérique [Lanh T.V. et al, 2007]. Nous comprendrons après ces explications que c'est en ôtant ce filtre qu'il sera possible d'acquérir d'autres types de prise de vue. Il existe donc des appareils plus spécifiques destinés à ce type de relevé tels que la caméra multispectrale. Les capteurs photographiques peuvent être de différentes tailles allant de 24 x 36 mm pour les Full Frame à 4,29 x 5,76 mm pour certains compacts (Figure 11).

Full Frame	APS-H	APS-C	4:3	1/1.7"	1/2"	1/2.3"	1/2.5"
24 x 36 mm	18.1 x 28.7 mm	15.8 x 23.6 ou 14.8 x 21.1 mm	13 x 17.3 mm	5.7 x 7.6 mm	4.8 x 6.4 mm	4.62 x 6.16 mm	4.29 x 5.76 mm

Figure 11: Tailles de capteurs photographiques actuelles.

La taille du capteur a une incidence directe sur l'angle de champ donc sur la donnée que l'on va capter. Un grand capteur a ainsi un plus grand champ qu'un capteur plus petit, mais aussi une profondeur de champ moins importante. Si le nombre de pixels est élevé, la résolution d'une photographie est bonne. Cependant, la densité des cellules photosensibles par millimètres carré du capteur a une forte influence sur la qualité des images. Elle dépend de l'intensité de la lumière que le capteur peut recevoir sur chacune de ses cellules photosensibles. Ainsi, un grand capteur peut potentiellement contenir plus de cellules

photosensibles qu'un petit capteur et ainsi donner une meilleure qualité d'image. Afin d'enregistrer une image sur le capteur, la lumière doit être focalisée sur un point précis. Les objectifs optiques sont donc composés de groupes de lentilles se déplaçant les unes par rapport aux autres selon la distance de mise au point. Deux types d'objectifs sont disponibles : à focale fixe et à focale variable. La longueur de la focale prend part à la détermination de l'angle de champ (Figure 12). Une longueur de focale courte permet d'obtenir un champ plus grand qu'une longueur de focale longue.

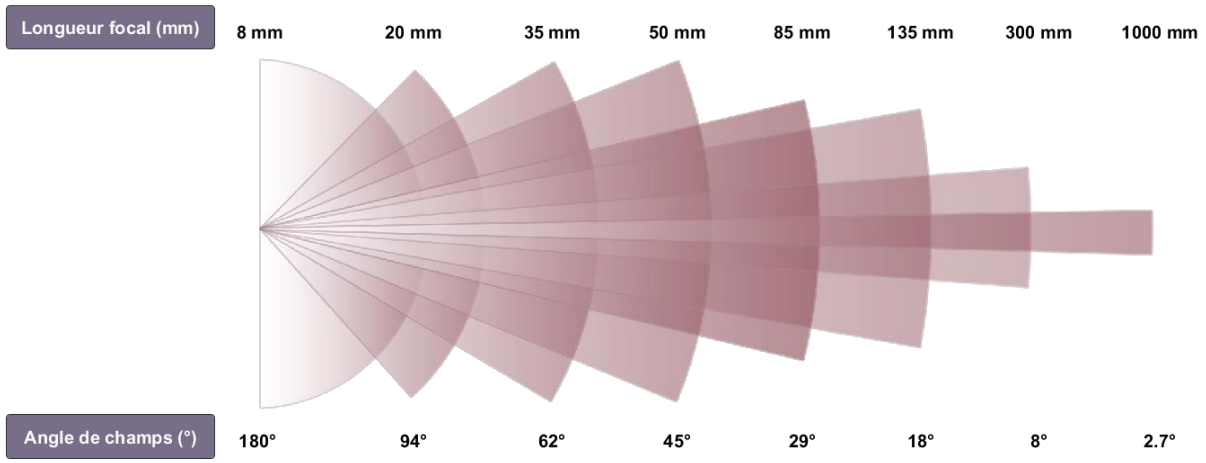


Figure 12: Influence de la focale sur le champ de vision pour un capteur unique.

Après l'analyse technologique de l'appareil photographique, qui est un des appareils les plus exploités dans le domaine de la documentation du patrimoine, nous pouvons étudier les différentes données générées dans le but d'analyser l'état de conservation de l'objet architectural.

2.2.1.1.1. Photographies numériques

Les photographies numérique sont extrêmement utiles pour documenter le bâtiment afin d'enrichir des ressources documentaires, mais elles sont également, et particulièrement, exploitées afin de générer d'autres types de données lors de leurs analyses en laboratoire (section 2.3.).

Il est important de préciser que lors du processus d'investigation, l'expert réalise des acquisitions en suivant un protocole bien connu dans sa communauté, donc il suit une procédure définie. Une acquisition est utile lorsque l'expert a besoin de réaliser des observations scientifiques sur le bâtiment ou son environnement pour comprendre un phénomène complexe inhérent, par exemple au processus de dégradation. Nous verrons, dans les prochaines parties, que ces observations se basent sur une analyse cartographique réalisée sur des images. Elles sont de différents types et fournissent des informations à plusieurs échelles : macroscopique (échelle de l'ouvrage architectural) et à l'échelle du bloc de pierre. Dans le domaine de la conservation, les images ne sont pas seulement utilisées pour documenter l'objet du patrimoine, mais sont également exploitées en tant que donnée

d'entrée pour créer d'autres supports d'analyse (section 2.3.2.). C'est le cas notamment de la photogrammétrie. Elle permet à l'expert de produire un modèle tridimensionnelle du bâti étudié à partir d'images. Afin d'optimiser la reconstruction 3D et obtenir un modèle de qualité, des projets de recherche se sont intéressés aux protocoles d'acquisition d'images in situ. C'est le cas du projet TAPENADE (ENG : Tools and Acquisition Protocols for ENhancing Artifact DocumEntation, FR : outil et protocole pour améliorer la documentation de biens culturels) [Pierrot-Deseilligny M. et al., 2011a]. Grâce à ce projet, des protocoles adaptés en fonction de l'objet étudié ont été proposés et validés. En fonction des objets que nous voulons reconstruire numériquement, ces protocoles peuvent augmenter la qualité de la numérisation. L'objectif principal est de couvrir toute l'enveloppe du bâtiment pour créer une collection d'images à un instant T. Cela a été le cas pour nos deux terrains d'expérimentation. Prenons l'exemple de l'église Saint Maurice (Caromb) sur laquelle a été réalisée une acquisition photographique générale. Le but est de couvrir l'ensemble des parties accessible de l'architecture (Figure 13) en suivant ces protocoles spécifiques.

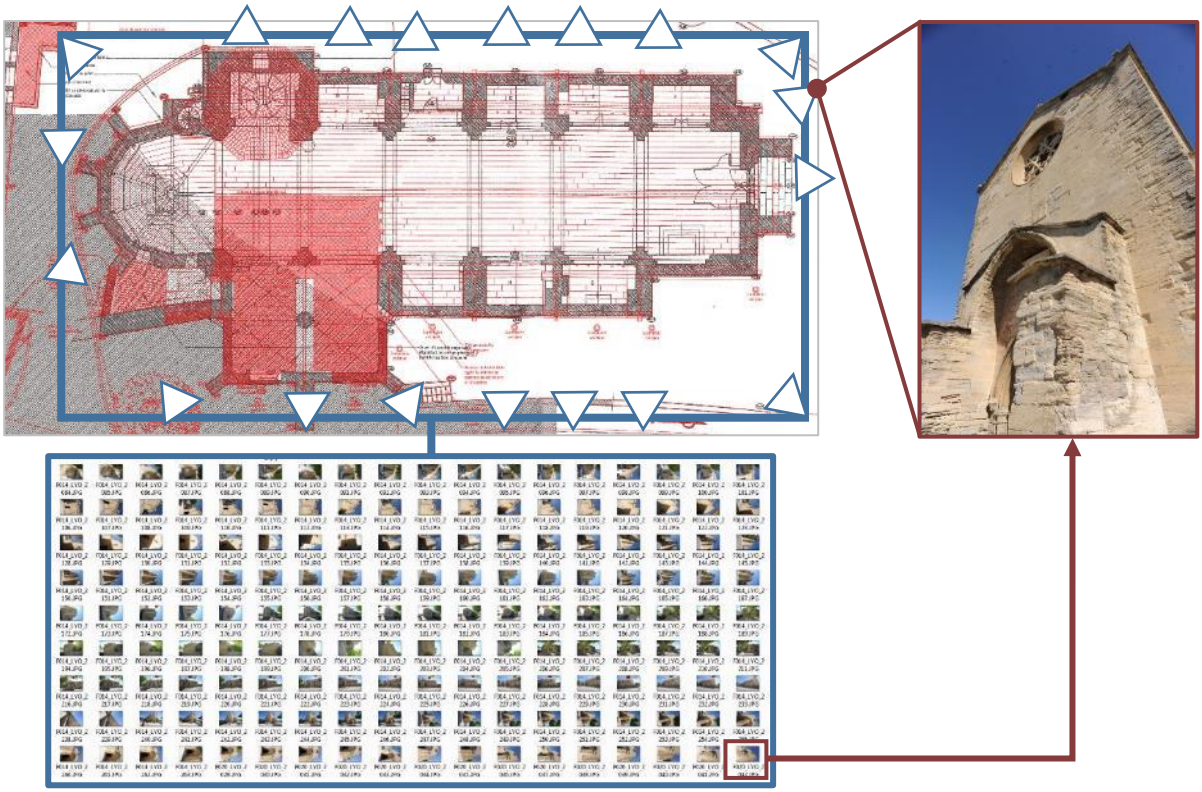


Figure 13 : Acquisition photographique pour une couverture complète avec un exemple d'instance à droite : Église Saint Maurice.

Cette acquisition de données est exploitée pour réaliser une reconstruction géométrique de surface avec des degrés de précisions de plus en plus importants. C'est pourquoi, parallèlement à la première acquisition in situ il est possible de réaliser des détails sur des zones d'intérêts, comme des altérations caractéristiques par exemple en se positionnant à l'échelle du bloc.

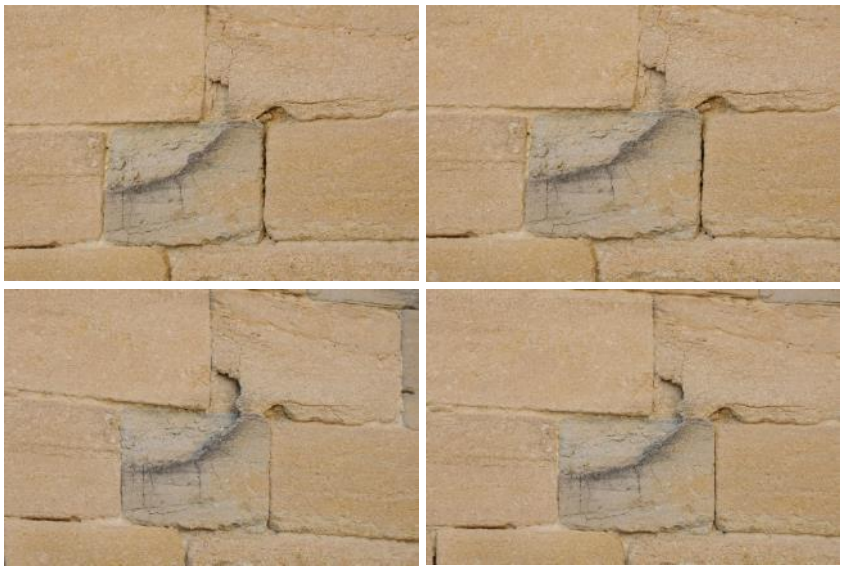


Figure 14 : Exemple de détail sur le mur Est de l'église de Caromb, sous plusieurs angles de prise de vue.

Dans la Figure 14, on observe une altération combinant des formes de dégradation de type desquamation en plaque (ENG : Spalling), de boursouflure (ENG : Blistering) et de colonisation biologique (ENG : Biological Colonisation).
L'acquisition de ce type de données est orientée dans l'objectif de réaliser des analyses métriques précises et d'effectuer des observations plus approfondies pour entreprendre d'autres types d'acquisitions que nous présenterons dans les prochaines parties.

D'autres types d'images peuvent être produits en utilisant cette typologie de capteur, mais en modifiant les caractéristiques de l'appareil ou en ajoutant un environnement d'acquisition adapté (luminosité par exemple), nous pouvons mettre en valeur d'autres caractéristiques de surface.

2.2.1.1.2. Imagerie multi spectrale

Comme énoncé précédemment, les appareils photographiques numériques renferment des filtres caractéristiques. En effet, toutes les longueurs d'onde du spectre électromagnétique peuvent être captées [Hershey J. et al., 2008]. Ces filtres sont donc indispensables afin d'éviter de saisir ces rayonnements pouvant atténuer le rendu de l'image numérique. Des acquisitions photographiques sont réalisées avec ces appareils également dans des conditions de lumière particulières permettant de faire ressortir d'autres propriétés morphologiques qu'il est difficile d'obtenir avec l'environnement existant. Ces imageries scientifiques sont réalisées à des fins de documentation du patrimoine en fournissant une pré-caractérisation à un instant T et permettent de souligner des similitudes ou des différences pour ainsi entreprendre d'autres analyses spatialisées [Elias M. et al., 2008]. Nous utiliserons quatre mêmes angles et zones de prises de vue, appliqués sur un exemple de peintures murales de la chapelle Notre-Dame des Fontaines, afin d'en ressortir les différences au niveau visuel [Maître H., 1995] [Pinna D et al., 2009] :

- **Photographie en Lumière directe (LD)**

Ce type d'imagerie fournit des images en couleur et/ou en noir et blanc, et constitue un support de lecture s'appuyant sur une comparaison avec des images UV (Ultraviolet) et IR (Infrarouge) (Figure 15).

Figure 15 : Photographies en lumière directe, peinture Est du chœur de la Chapelle Notre-Dame des Fontaines (CICRP.Photo Odile Guillon).

- **Photographie en lumière semi-rasante (SR)**

Dans ce cas-ci, la lumière artificielle utilisée peut être orientée dans les quatre directions (par le haut, le bas, par la droite et la gauche) en utilisant des lampes lumières du jour qui ont une valeur de luminance connue (Température de couleur : 6500 °K). Ce type d'image peut être considéré comme de la fausse 3D, car nous restons sur des images (2D), mais dans lesquelles il y a une accentuation de la perception des reliefs, même les plus difficiles à constater à l'œil nu (Figure 16).

Figure 16 : Photographie en Lumière Semi-Rasante (éclairage par le bas), peinture Est du chœur de la Chapelle Notre-Dame des Fontaines (CICRP.Photo Odile Guillon).

L'image en lumière SR donne des informations sur la mise en œuvre (joints d'enduits, journées de travail pour la fresque, incisions préparatoires, marques d'outil) et l'état de conservation (déformation, superposition), tout en conservant les couleurs.

Elle est utilisée également en tant qu'image mémoire d'un constat à un instant T. Elle s'avère beaucoup plus représentative sur écran que lorsqu'on l'imprime en tirage A4, car on peut l'agrandir. Elle constitue un aperçu considéré comme étant le plus proche de ce que perçoit l'œil. Grâce à l'utilisation de cette image, de premières cartographies peuvent être réalisées concernant les altérations qui modifient l'intégrité des reliefs originels.

- **Photographies de fluorescences sous ultraviolet (UV)**

Il a été montré que l'exposition de l'œuvre au rayonnement UV (à 365 nm) met en évidence, dans le domaine du visible notamment, différentes fluorescences de matériaux originels et/ou de restauration (certains pigments, sels, matériaux de consolidation, etc.). Ces images produites sont l'enregistrement des comportements des matériaux face à cette excitation. Il faut nécessairement la substituer à une autre observation scientifique in situ pour enrichir l'information obtenue. Elle constitue donc une première approche de différenciation des matériaux. Grâce aux informations affichées, nous pouvons comparer et/ou associer différentes fluorescences sur l'ensemble des parties peintes (Figure 17). De plus, cette caractérisation permet d'orienter les futures acquisitions comme la prise d'échantillon (pour l'étude des pigments par exemple), pour finalement combiner ces deux données et fournir des informations à l'aide de cartographies thématiques (section 2.3.3.2.).

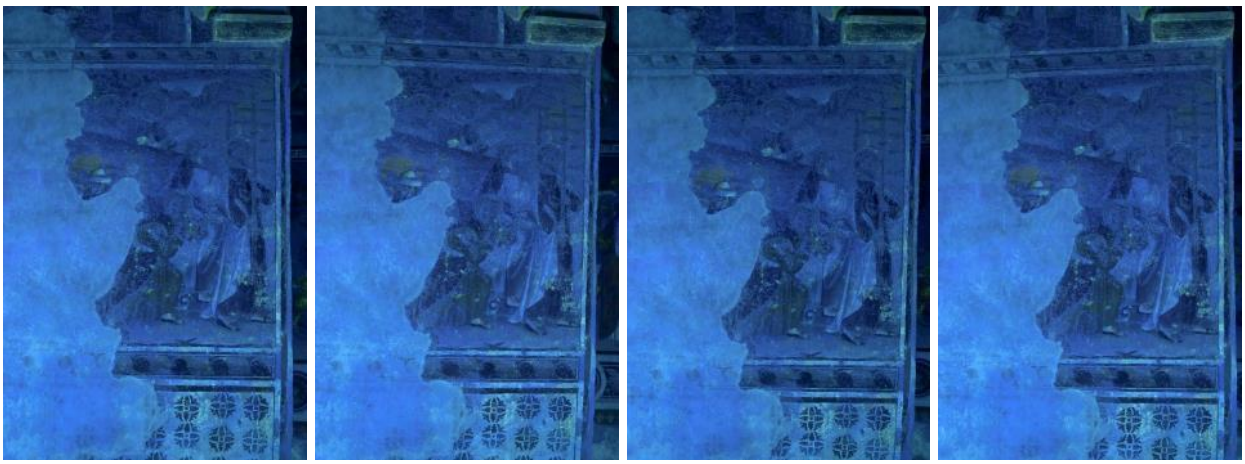


Figure 17 : Photographies de fluorescence sous Ultraviolet, peinture Est du chœur de la Chapelle Notre-Dame des Fontaines (CICRP.Photo Odile Guillon).

- **Photographies dans l'infrarouge.**

Il existe des appareils spécifiques destinés à ce type de relevé tels que la caméra multi-spectrale. Sur les Appareils Photographiques Réflexes Numériques, il est possible de soustraire le filtre spécifique (par construction anti-IR) afin de privilégier le rayonnement IR de 700 à 1000 nanomètre : on appelle ces prises de vue **des photographies dans l'Infrarouge** (IR). Cette technique d'acquisition est davantage exploitée pour acquérir des données relatives aux décors peints (Figure 18), en peinture de chevalet, ou en peinture sur maçonnerie notamment. L'objectif est d'être capable de visualiser les différentes couches des peintures (dessins sous-jacents, dessins préparatoires), les accidents profonds et les restaurations, mais aussi de différencier les matériaux (pigments par exemple) d'aspect semblables en lumière blanche,

mais qui réfléchissent inégalement le rayonnement IR. Cela permet ainsi de mesurer l'importance et la profondeur des altérations et restaurations subies. Ce rayonnement est donc réfléchi ou absorbé en fonction de la nature ou l'épaisseur des matériaux. Par conséquent, certains composants deviennent transparents tandis que d'autres restent opaques [C2RMF, 2017]. Particulièrement en peintures murales, il y a peu de traces de dessins préparatoires. La « *sinopia* » (ébauche de la fresque) est sous l' « *intonaco* » (l'enduit de finition) et est donc invisible à la longueur d'onde utilisée (900 nm) du fait de l'épaisseur de ce dernier.

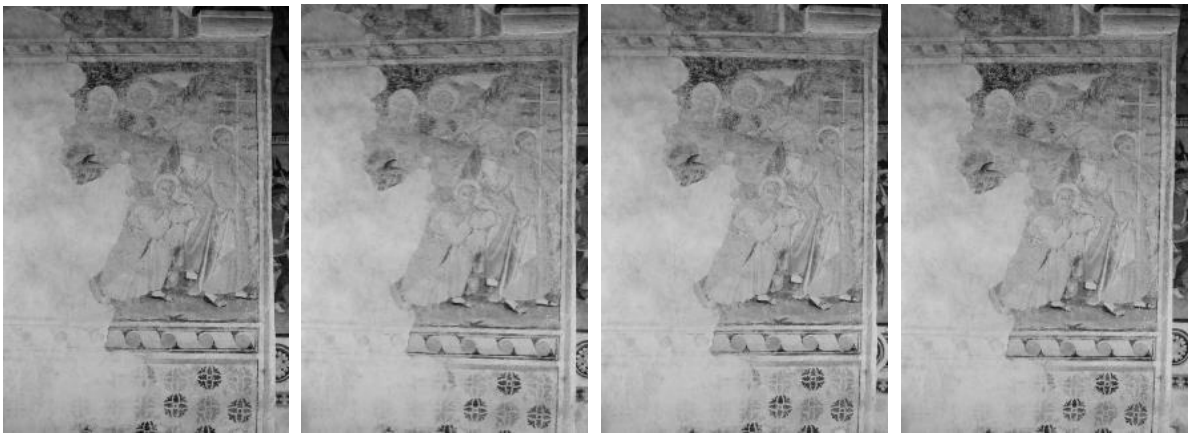


Figure 18 : Photographies dans l'Infrarouge, peinture Est du chœur de la Chapelle Notre-Dame des Fontaines (CICRP.Photo Odile Guillon).

Les documents photographiques produits sont exploités en lecture parallèle avec les images obtenues en lumières directes. L'acquisition dans infrarouge est nécessaire pour réaliser la composition d'un autre type d'imagerie scientifique comme l'image en Infrarouge Fausse Couleur qui, par son caractère composite, permet d'accéder à d'autres informations (Section 2.3.4.).

- **Acquisition de thermographie infrarouge : passive ou stimulée.**

Par définition, « *la thermographie infrarouge est une technique qui permet d'obtenir, au moyen d'un appareil approprié, l'image thermique d'une scène observée dans le domaine spectral électromagnétique de l'infrarouge* » [AFNOR, 1991] (pour le bâtiment, 8 à 12 µm en général). C'est une méthode de référence dans de nombreuses applications et son utilisation trouve un intérêt notable dans le domaine de la conservation. Elle permet dans la plupart des cas d'observer des formes d'altérations qui sont invisibles à l'œil nu. Il est possible de réaliser deux types d'analyses pouvant être exploités en vue de générer des informations, via un ordinateur dédié. D'une part, la caméra utilisée pour réaliser ce type d'images peut être simplement posée devant une zone d'intérêt afin de voir son comportement en relation avec les conditions climatiques (thermique) de l'espace environnant : c'est de la thermographie infrarouge passive (Figure 19). D'autre part, et c'est une méthode par laquelle nous pouvons ressortir des informations cruciales quant aux défauts (vides, présences de sels hygroscopiques, etc.) présents sous la surface (jusqu'à quelques centimètres de profondeur), grâce à une acquisition de donnée en thermographie infrarouge active ou stimulée : c'est-à-

dire que l'on va soumettre, à l'élément observé, une excitation extérieure et maîtrisée en étudiant la propagation et la dissipation de chaleur. Ceci peut permettre à l'expert de déceler des défauts surfaciques et surtout subsurfaciques tels que les fissures, ou des desquamations en plaque. En effet, cette dernière, qui est une altération caractéristique et très répandue sur l'enveloppe extérieure de l'église Saint-Maurice, est un phénomène encore très complexe quant à la compréhension de sa manifestation dont l'identification des mécanismes fait encore débat.

La « *desquamation en plaque* » est définie comme étant un *« détachement d'écailles de pierre individuelle ou en paquets indépendamment de toute structure orientée préexistante. La desquamation se développe parallèlement à la surface ou en écailles de poisson. L'épaisseur des écailles est négligeable par rapport à leur extension »* [Verges-Belmin V., 2008]. Sa manifestation morphologique peut être mise en évidence grâce à cette technique d'acquisition. Lorsqu'il y a desquamation en plaque, la température captée se dissipe ou chauffe beaucoup plus vite que les espaces voisins, à cause d'un détachement de « plaque » [Vrabie V. et al, 2012]. Un phénomène thermique qui se caractérise par une infiltration ou par une présence d'air entre deux épaisseurs. Ces données sont à mettre en relation avec les propriétés intrinsèques des matériaux pouvant être définies en laboratoire comme le degré d'effusivité (rapidité avec laquelle le matériau absorbe les calories) et le degré de diffusivité (rapidité de déplacement des calories à travers la masse d'un matériau) en relation avec l'inertie thermique.

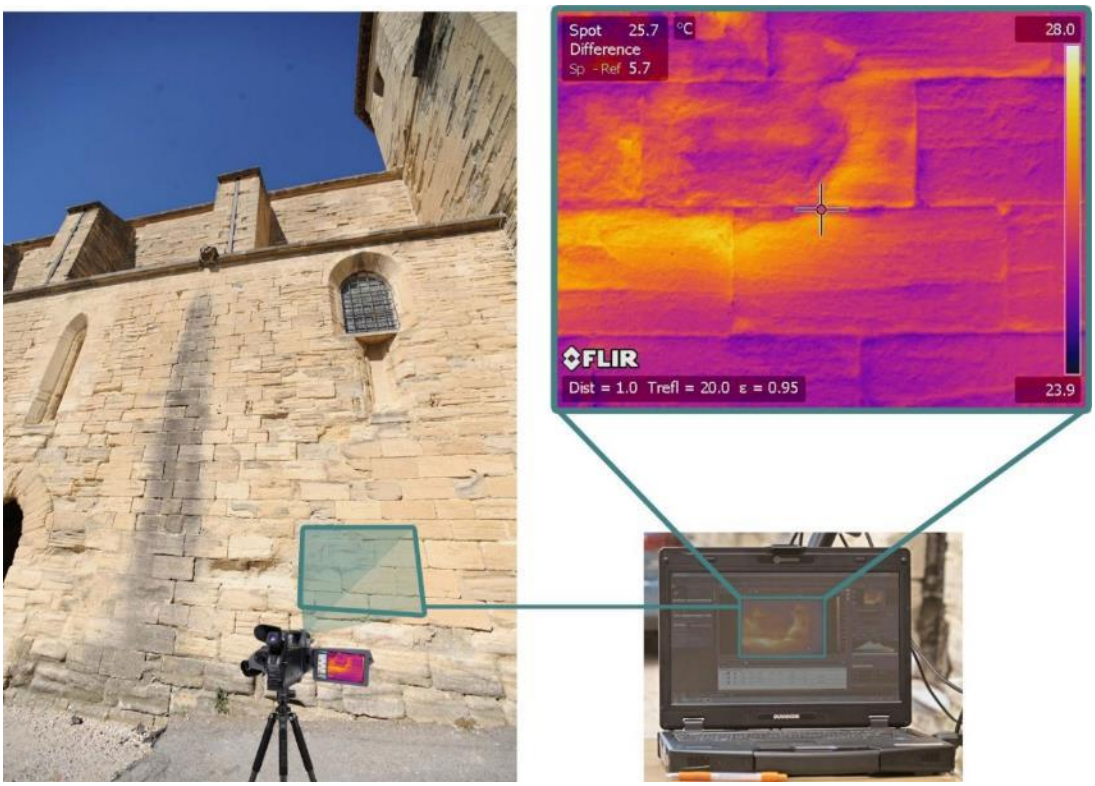


Figure 19 : Contextualisation de l'utilisation de la thermographie IR (passive), résultat en haut à droite d'un point de vue sur une altération : façade Est de l'église Saint Maurice (CICRP.données Vallet J. M.).

2.2.1.1.3. Cartographie 2D in situ

Afin d'identifier des caractéristiques précises relatives à la conservation, notamment la répartition spatiale des formes d'altérations, des matériaux ou tout simplement l'agencement des blocs, un ensemble de savoir-faire technique de cartographie traditionnelle existe pour mettre en exergue ces informations à la suite d'une acquisition photographique réalisée préalablement. Ce type de technique peut être fait in situ, mais également en laboratoire. Dans ce sous-chapitre, nous nous concentrerons donc particulièrement sur les cartographies in situ restituées à la main. Cette technique repose sur l'œil de l'expert, en se basant sur sa perception visuelle, et identifie les aspects observables et caractérisables de l'édifice : les différentes formes de dégradations agissant sur les matériaux de construction, ainsi que les pigments utilisés pour les décors peints par exemple. La méthode de cartographie des monuments a été établie comme une procédure non-destructive pour l'enregistrement, l'évaluation et les documentations des lithotypes (roche de référence pour la description pétrographique visuelle in situ) et des phénomènes d'altérations. Cette technique peut être appliquée à tout type de pierre et à tous les objets maçonnés [Fitzner B., 2004]. Le processus cartographique comprend l'utilisation de papier calque ajusté sur des peintures par exemple (Figure 20), mais peut également s'appuyer sur des photographies préalablement acquises.

Figure 20 : Exemple de cartographie 2D sur papier calque in situ.

2.2.1.2. Imagerie scientifique 3D par acquisition laser

Plusieurs dispositifs de scan ont été développés permettant la génération de nuages de points 3D. Ceux-ci peuvent être par la suite traités et intégrés à d'autres données telles que des images, afin de créer un modèle 3D complet et enrichi. Ce type de données est de plus en plus exploité dans des applications comme le relevé, la navigation, la réalité augmentée, le suivi de la morphologie de l'ouvrage et bien d'autres encore. Bien que la précision et le détail des nuages de points obtenus soient de qualité, le coût de ces dispositifs reste un frein important à leur utilisation.

Le balayage laser terrestre est « l'utilisation d'un dispositif basé au sol, qui utilise un laser pour mesurer les coordonnées tridimensionnelles d'une région donnée de la surface d'un objet de façon automatique, dans un ordre systématique et à un taux élevé de vitesse, près du temps réel » [Boehler W. et al, 2002a]. Ainsi les modules de balayage laser permettent une acquisition directe en temps réel de milliers de coordonnées spatiales (x, y, z) par seconde. En plus de ces coordonnées, certains dispositifs de balayage permettent aussi d'acquérir les valeurs d'intensité (nuance de 255 niveaux de gris) et les valeurs colorimétriques (valeurs RVB extraites à partir d'une caméra). Cependant, presque aucun système de balayage laser ne peut accomplir toutes les exigences d'un relevé d'architecture. En effet, un édifice peut présenter une variété d'objets qui s'étend des éléments architecturaux aux décors sculptés.

Les scanners laser sont des capteurs actifs pouvant générer des nuages de points denses décrivant l'objet en détail. Ces dispositifs sont principalement montés sur un élément fixe et mis à niveau pour obtenir une référence spatiale horizontale [Zogg H.M., 2008]. Ils sont utilisés pour mesurer des objets de différentes tailles allant du bâtiment et d'éléments architecturaux jusqu'à des petites pièces telles que des bijoux. Les modules de relevé scanner 3D pouvant être utilisés pour le relevé d'édifice se divisent en deux catégories : les scanners longue portée et les scanners à triangulation. Les deux principes sont différents, que ce soit en termes d'exactitude, ou de portée. Les principes de fonctionnement ont été décrits par [Marbs A.et al, 2001].

2.2.1.2.1. Les scanners longue portée

Les scanners à longue portée mesurent des angles horizontaux et verticaux. Ils mesurent également la distance, en calculant le temps de vol ou en comparant le changement de phase de l'onde transmise et reçue d'un signal modulé (Figure 21).

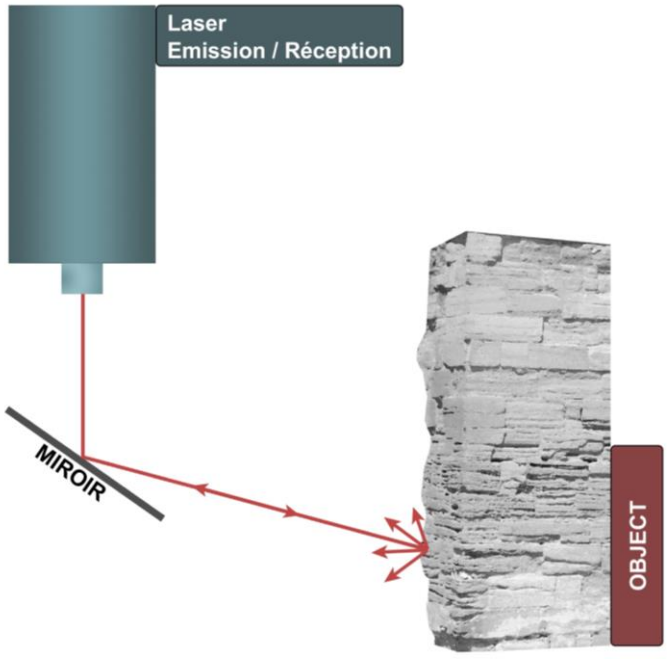


Figure 21 : Schéma du fonctionnement des scanners longue portée [Marbs et al, 2001].

- Scanner à temps de vol : Une impulsion est envoyée sur l'objet étudié. Le temps mis par laser pour parcourir un aller-retour (de l'émetteur à l'objet puis de l'objet au récepteur) est nécessaire pour calculer la distance entre le scanner laser et l'objet étudié. Ce système détecte seulement un point à la fois dans la direction sur laquelle il est pointé. Pour scanner l'environnement complet, le scanner doit donc répéter cette opération point par point et changer sa direction entre chaque mesure.

- Scanner à décalage de phase (Figure 22) : sur ces scanners, le faisceau émis est modulé par une onde harmonique. Après réflexion sur l'objet, le signal reçu laisse apparaître un décalage dans la phase par rapport à l'onde émise. Connaissant la différence entre les deux phases, la distance peut être calculée.

Figure 22 : Exemple de scanner à décalage de phase : FARO Focus 3D.

2.2.1.2.2. Les scanners par triangulation

Les scanners par triangulation utilisent également la lumière laser pour sonder l'environnement (Figure 23). Cependant le retour est capté par une caméra CCD. La caméra, le laser et le point projeté sur l'objet forment ainsi un triangle. En fonction de la distance, le point apparaît à un endroit différent dans le champ de vision de l'appareil. À partir des paramètres connus de configuration du dispositif, les dimensions du triangle peuvent être déterminées et donnent la position du point laser. Une variante de ce dispositif passe par l'utilisation de deux caméras DTC (Dispositifs à Transfert de Charge) positionnées à chaque extrémité de la base du module. Elle utilise le même principe géométrique, mais permet d'obtenir un taux d'acquisition plus élevé.

Le scanner de type décalage de phase nous permet donc de générer des nuages de points 3D avec des résolutions paramétrables. Le protocole est réalisé afin que le scanner laser acquière toutes les zones correspondant à la surface extérieure du bâti. C'est le cas notamment pour nos deux terrains d'expérimentation qui compte 26 stations de scan (intérieur et extérieur de l'édifice) pour la chapelle Notre-Dame des Fontaines et 12 stations de scan (intérieur et

extérieur) pour l'église Saint Maurice. Le nombre d'acquisitions est dépendant de l'objectif initial.

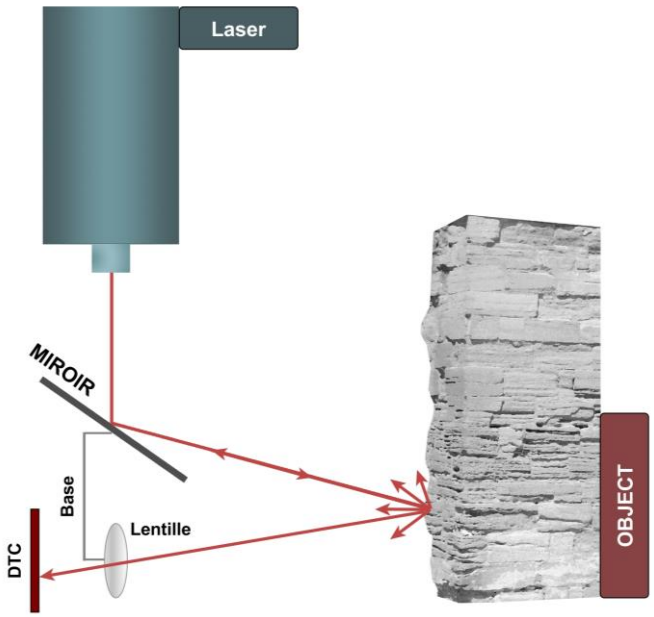


Figure 23 : Schéma de fonctionnement des scanners lasers par triangulation [Marbs A. et al., 2001].

Afin de réajuster toutes les stations entre elles, il est primordial d'utiliser des sphères caractéristiques, que nous avons positionnées à des endroits stratégiques sur le terrain d'acquisition. Celles-ci ont une forme d'équation mathématique connue pour le logiciel dédié à l'acquisition laser. Elles sont utiles afin de rassembler toutes les données 3D acquises de l'ensemble du patrimoine dans un seul et même référentiel de mesure absolu. Ce processus est réalisé lors d'un traitement en laboratoire.

Le but de cette acquisition est de récupérer des données précises relatives à la morphologie de l'ouvrage et ainsi d'extraire et de générer des informations géométriques en lien avec la morphologie de l'ouvrage. In situ, la technologie nous permet de visualiser l'image panoramique qui résulte de l'acquisition (Figure 24).

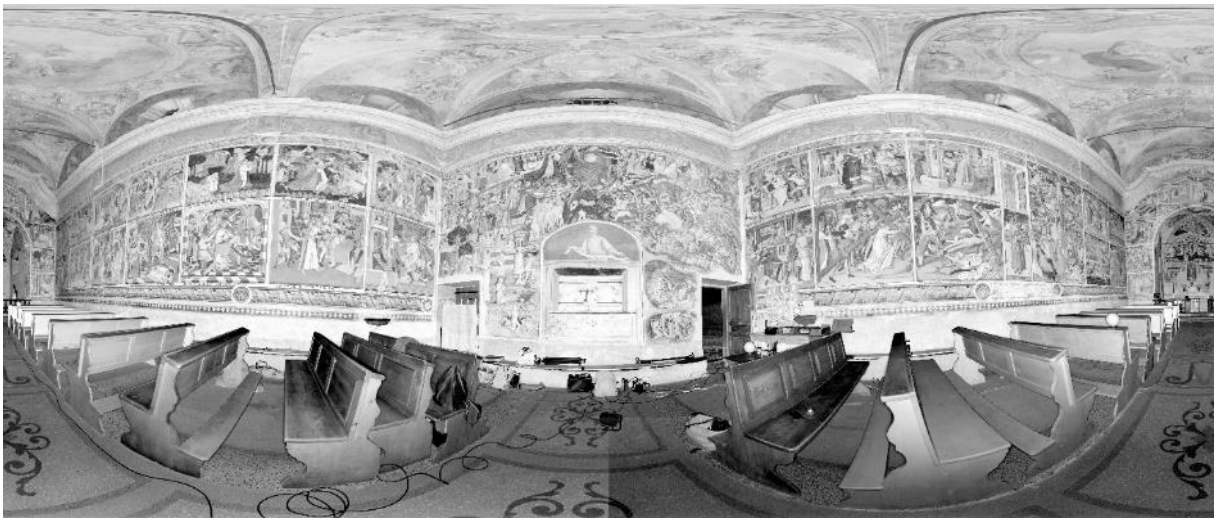


Figure 24 : Image panoramique visualisable in situ : station scanner mis en place dans l'église Notre-Dame des Fontaines.

Il est donc possible d'observer et de valider le fichier 3D créé pour réaliser des ajustements dans le cas où des parties du bâtiment étaient manquantes. Le scanner laser produit donc un dossier contenant des données tridimensionnelles de chaque station réalisée, accompagnées par des métadonnées concernant le référencement. En fonction de la technologie laser utilisée, une image panoramique de chaque station en format JPEG (Joint Photographic Experts Group) peut être générée. La lecture de ces ressources se fait généralement avec le logiciel propriétaire associé au scanner.

2.2.2. Prélèvement par échantillon physique

Afin de réaliser davantage d'analyse sur le bâti patrimonial pour comprendre certains phénomènes, des échantillons, à des endroits stratégiques, peuvent être prélevés sur site. La nature de cette acquisition est dite invasive, car c'est une action humaine modifiant irréversiblement l'intégrité morphologique d'un objet [Saheb M.et al., 2015]. C'est pourquoi un protocole bien précis doit être mis en place, car les experts ne peuvent pas se permettre de prendre des échantillons sur l'ensemble de la surface. C'est donc un savoir-faire qui doit rester totalement maîtrisé. Ces techniques d'acquisition sont utilisées après une suite d'analyses photographiques, notamment par l'exploitation de l'étude, a posteriori, de l'imagerie scientifique produite et de résultats de diagnostic, afin de préciser la nature des matériaux que l'on observe, voire même leurs interactions avec l'environnement extérieur. On liste deux techniques de prise d'échantillon : le LIBS (ENG: Laser Induced Breakdown Spectroscopy, FR : spectroscopie sur plasma induit par laser) appliqué particulièrement sur les peintures murales (qui s'accompagne également de techniques de prélèvement d'écailles, et de micro-échantillonnage), puis le carottage pour les structures maçonnées.

2.2.2.1. Échantillonnage par LIBS

Les pratiques analytiques dans le domaine du diagnostic des matériaux du patrimoine tendent à se développer in situ grâce à l'apparition de nouveaux outils. Associée à une prise

d'échantillon classique, la technique LIBS est une approche performante pour la caractérisation des pigments de peintures murales. Les acteurs du patrimoine ont un besoin croissant d'expertise scientifique en vue de prendre des décisions stratégiques pour des opérations de restauration. Comme son nom l'indique, le LIBS est une technologie invasive qui utilise un laser à des fins d'analyse couche par couche des décors peints : une analyse stratigraphique. Il consiste à envoyer un laser impulsionnel (de forte énergie) sur une paroi recouverte d'un matériau à identifier. Le but est alors de récupérer l'émission lumineuse du plasma généré (interaction laser/matière) grâce à un spectromètre (résolu en temps) afin de déterminer en temps réel la nature des éléments (chimie élémentaire) de la surface sur une première épaisseur et également de mesurer leur concentration. Tous les éléments chimiques sont détectables, sous la forme de gaz, solide ou liquide. Le LIBS, qui est une machine expérimentale conçue par le LRMH, pour des applications dans le domaine du patrimoine, [Bruder R. et al, 2007] (Figure 25), fournit donc des analyses sans préparation nécessaire au niveau échantillonnage, et sur des zones qui sont difficiles d'accès pour des techniques plus classiques. Elle peut être mise en œuvre sur le terrain assez facilement, voire même être positionnée sur un échafaudage. L'impulsion réalisée sur la paroi forme un petit cratère d'ablation dont la profondeur est connue.

Chaque impact peut donc être réalisé l'un après l'autre pour identifier des couches de matériaux différents et connaître métriquement à quelle profondeur ils se trouvent. L'appareil est relié à un ordinateur qui reçoit directement les données d'acquisition à chaque impact et fournit des résultats principalement sous forme de graphique montrant les raies d'émision des particules élémentaires identifiées (Figure 26).

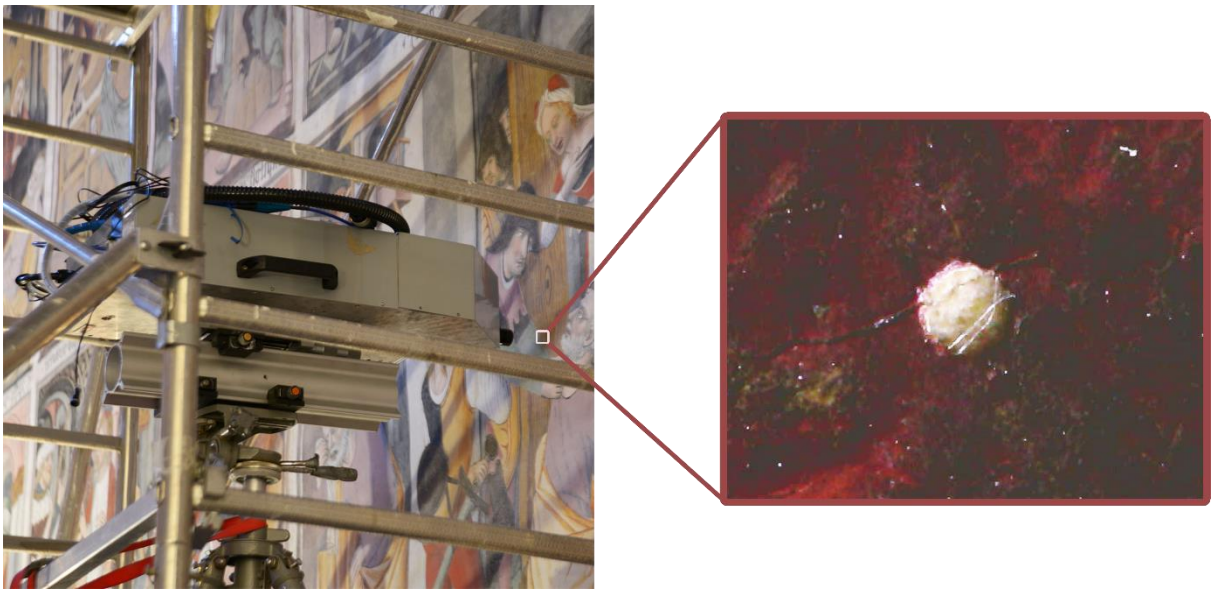


Figure 25 : Présentation de la mise en place du LIBS (à gauche), et cratère d'ablation du laser (à droite) vu par une caméra microscope (40x) (appareillage LRMH/C2RMF).

Grâce à des photographies acquises spécifiquement lors d'une précédente campagne et à l'aide de résultats obtenus en laboratoire, le protocole peut être préparé en positionnant les futurs tirs sur les images représentant l'objet d'étude et ses différentes zones à analyser.

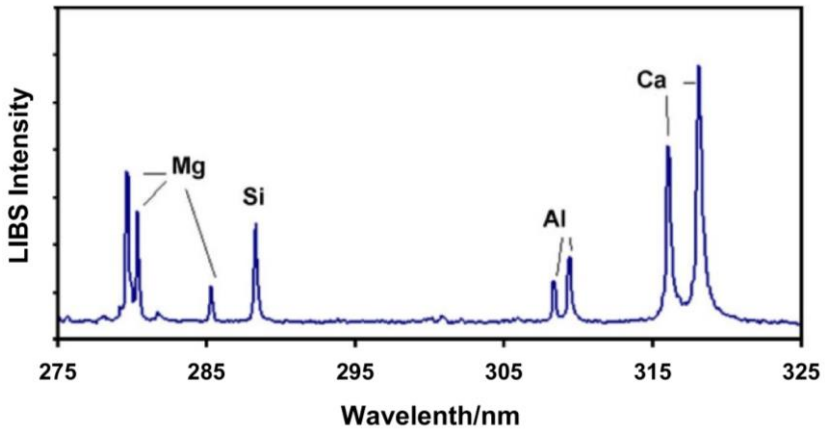


Figure 26 : Exemple de résultats affichés par le software dédié de la technologie : un spectre LIBS.

Le logiciel développé pour l'interprétation des résultats d'émission du plasma peut également nous donner l'éventuel matériau qui correspondrait le mieux au signal reçu par le spectromètre.
Une production documentaire précise est ensuite réalisée afin de constater la répartition spatiale des matériaux et leurs possibles interactions avec les agents intervenants dans le processus de dégradations des peintures murales.

2.2.2.2. Échantillon physique par carottage

Tout comme les échantillons obtenus grâce à un laser, le carottage est une technique qui implique la préparation précise d'un protocole, car il s'agit d'extraire un échantillon de taille conséquent pour ensuite réaliser des analyses en laboratoire [Janvier-Badosa S. et al., 2015]. Cette technique est utilisée pour réaliser des études plus poussées sur la base d'observations déjà réalisées sur le terrain. Comme autre technique, la thermographie IR est considérée comme étant une technique d'acquisition de données d'investigation essentielle. Elle permet de déceler des altérations qui, morphologiquement, ne se traduisent généralement pas par une modification de l'aspect en surface, mais dont nous soupçonnons l'existence par la mise en relation d'autres données acquises. La prise d'échantillon par carottage permet, d'une part, de confirmer la présence d'une défaillance au niveau de l'intégrité morphologique du bâti, et d'autre part, grâce à des analyses approfondies en laboratoire, permet de comprendre le phénomène d'altération correspondant.

Par exemple, pour l'analyse d'une altération caractéristique (la desquamation en plaque), identifiée sur un cas d'étude, qui a fait l'objet d'une importante quantité d'analyses (le château de Chambord), il y a une véritable nécessité d'obtenir des échantillons de pierre représentatifs de chaque étape hypothétiquement définie du processus de dégradation [Janvier-Badosa S. et al., 2014].

Selon les études documentaires réalisées a priori, la zone sélectionnée était construite en utilisant une pierre calcaire de taille : du tuffeau datant du 16ème siècle. L'échantillonnage a été effectué en utilisant la technique du carottage à sec. L'échantillon est de 3 centimètres de

diamètre pour une hauteur de 8 centimètres (Figure 27). Bien que l'échantillon soit une entité physique concrète, elle renferme une grande quantité de données que nous obtenons grâce à des analyses en laboratoire.

L'objectif était de comparer la pierre « en bonne santé » avec différents stades de desquamation sur la même portion de matériau : la pierre non-altérée (B1), la pierre avec une fissure subsurfacique (B2) et enfin une partie avec perte complète de matière due à la perte de la plaque superficielle (B3).

À la suite de cette activité de carottage, des analyses ciblées sont mises en place à travers des protocoles précis afin de croiser et de comparer les informations recueillies après traitement, et probablement permettre aux experts de valider les résultats grâce à des acquisitions futures.

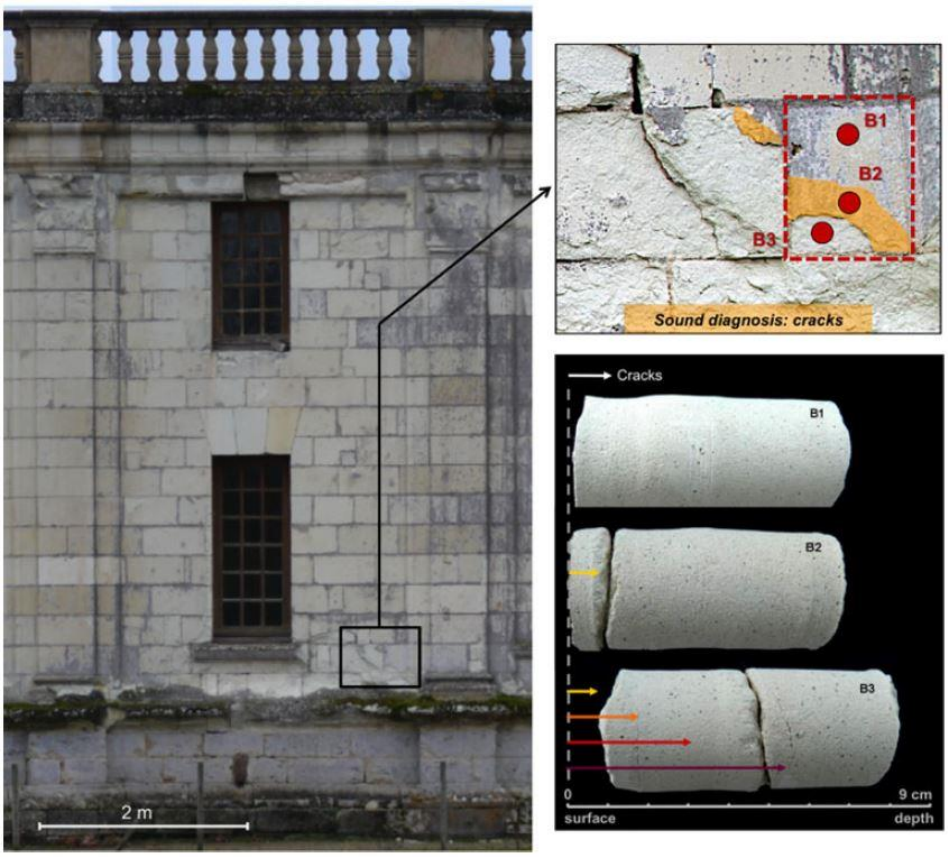


Figure 27 : Exemple d'échantillonnage pour l'analyse de la desquamation en plaque, montrant la position des échantillons et les trois états du processus d'avancement de la dégradation (à droite) [Janvier-Badosa S. et al., 2014].

2.2.3. Acquisition des conditions environnementales

Un grand nombre de phénomènes d'altération sont étroitement liés aux conditions météorologiques. C'est pourquoi l'utilisation de capteurs spécifiques paramétrables est essentielle afin de comprendre le comportement du bâti dans son environnement [Camuffo D., 2013]. Un capteur thermo bouton est un exemple de technologie généralement utilisé

(Figure 28). Plusieurs données peuvent être extraites de cet appareil par exemple la température, le point de rosée et le taux d'humidité.

Figure 28 : Thermobouton pour l'acquisition climatique (thermique, hygrométrique) et ses caractéristiques techniques.

In situ, ces données acquises sont simplement lues et récupérées par un ordinateur, grâce à sa connectique USB dédiée, pour être stockées, éditées et lues sous forme de fichiers tableurs (Figure 29).

Date	Heure	Température	Humidité	Point de Rosée
20/11/2014	18:00:01	2,5	100	2,51
20/11/2014	19:00:01	2,5	100	2,51
20/11/2014	20:00:01	3	100	3,01
20/11/2014	21:00:01	3	100	3,01
20/11/2014	22:00:01	3	100	3,01
20/11/2014	23:00:01	3	100	3,01
21/11/2014	00:00:01	2,5	100	2,51
21/11/2014	01:00:01	2,5	100	2,51
21/11/2014	02:00:01	2	100	2
21/11/2014	03:00:01	2	100	2
21/11/2014	04:00:01	2	100	2
21/11/2014	05:00:01	2	100	2

Figure 29 : Échantillon de tableau de valeurs, acquises par un thermo bouton positionné dans la chapelle Notre-Dame des Fontaines.

2.3. Données issues d'un processus de traitement

Certaines données acquises in situ peuvent être utilisées directement pour extraire des informations quand celles-ci sont contextualisées. Cependant, d'autres doivent faire l'objet de traitements numériques supplémentaires.

2.3.1. Données issues du recalage 3D des stations scanner

Les données 3D acquises in situ via l'utilisation d'un scanner laser 3D à décalage de phase, à travers différentes stations, ont été réalisées autour du bâti afin d'obtenir des informations essentielles sur la forme générale des supports et d'analyser les déformations. Bien que ces stations aient acquis des données du même objet architectural, elles ne sont pas spatialisées les unes par rapport aux autres. Les données brutes acquises sur le terrain nécessitent donc un traitement de recalage afin de ne produire qu'un fichier représentant l'ouvrage dans sa

globalité et orienté dans un système de référence absolue. Pour cela, nous utilisons le logiciel dédié fourni avec l'équipement du scanner laser. Pour l'ajustement, nous exploitons des références que nous avons positionnées pour l'acquisition : des sphères qui ont une équation mathématique géométrique connue par le logiciel et le scanner. Le nombre de référence entre chaque station doit être suffisant pour permettre un recalage (Figure 30).

Chaque station laser produit un nuage de points qui lui est propre (référence, résolution, angle de balayage, etc.).

Chaque sphère constitue une référence connue dans l'espace réel puis virtuel. L'ajustement des stations entre elles est facilité si l'acquisition a bien suivi le protocole notamment pour le référencement. À la fin du traitement en laboratoire, nous obtenons un nuage de points tridimensionnel de la morphologie de l'ouvrage avec une résolution choisie en vue d'une étude orientée (Figure 30).

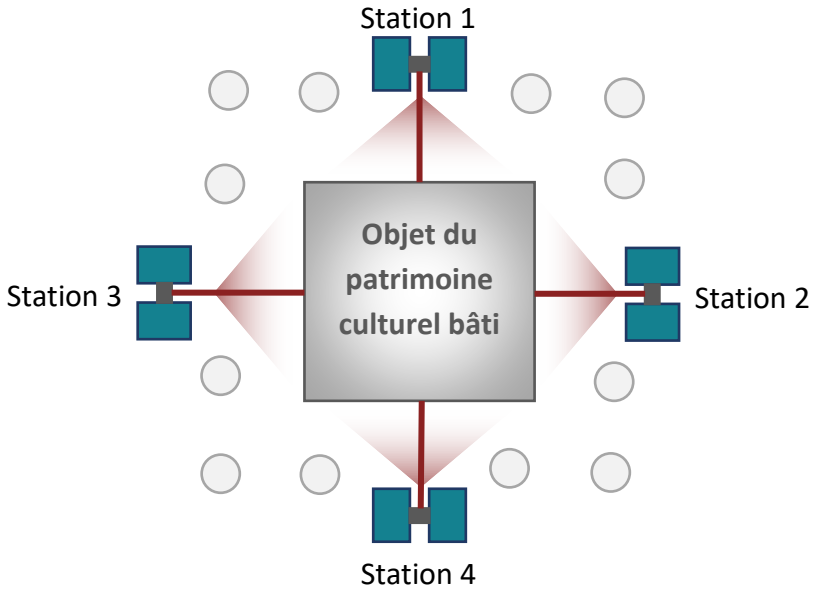


Figure 30 : Schéma d'acquisition multi-station utilisant des sphères de référence pour le recalage a posteriori.

De telles données tridimensionnelles permettent d'obtenir un modèle de référence métrique absolu afin de combiner la légèreté du nuage de points généré par photogrammétrie et son caractère abordable (section 2.3.2.) avec la précision métrique du modèle 3D issu du scanner après traitement (Figure 31).

Figure 31 : Nuage de points obtenu après recalage des stations, intensité en niveaux de gris : Église Saint-Maurice.

2.3.2. Génération de coordonnées 3D à partir de relevé photographique

Comme nous l'avons expliqué dans la partie précédente, il est possible d'acquérir des données 3D in situ à l'aide d'appareil très précis basé sur les lasers. De nos jours, il est également possible d'obtenir une représentation 3D en nuage de points à partir d'images. Les prises de vue ont été acquises in situ pour documenter le bâti, mais en suivant un protocole optimal il est également possible par traitement de ces images de générer des représentations 3D [Salonia P. et al., 2003].

Ces méthodes, dites indirectes, se basent sur l'exploitation de supports photographiques afin d'extraire des coordonnées spatiales, utilisant diverses techniques de restitution.

Il existe aussi des méthodes indirectes qui se basent sur l'exploitation du support photographique pour extraire les coordonnées spatiales à l'aide de différentes techniques de restitution : il s'agit de la photogrammétrie [Remondino F. et al, 2006] [Sturm P. et al, 2011]. La photogrammétrie se définit comme « la science ou la technique permettant d'obtenir des informations fiables sur l'espace naturel ou sur des objets physiques par l'enregistrement, la mesure et l'interprétation d'images photographiques… » [American Society of Photogrammetry, 1980]. Pendant longtemps, des chambres métriques et semi-métriques ont été utilisées pour l'acquisition photogrammétrique [Carbonnel M., 1968]. Les chambres métriques appartiennent à trois catégories : les chambres métriques, les chambres semi-métriques et les chambres à DTC (CCD) [Grussenmeyer P. et al., 2001]. Avec l'évolution des appareils numériques et des capteurs CCD, des images numériques peuvent être aujourd'hui directement acquises pour servir de bases à l'acquisition photogrammétrique et aux traitements sous-jacents.

La mesure se base sur le calcul des paramètres d'orientation internes et des paramètres d'orientation externes de l'appareil photographique [Kraus K. et al, 1997](Figure 32).

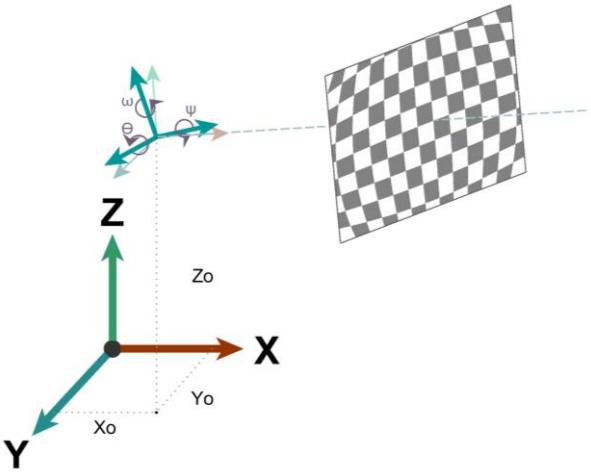


Figure 32 : Paramètres de calibration interne et externe.

L'orientation interne consiste à calibrer l'appareil, c'est-à-dire à fixer la position de la focale et à estimer la distorsion de l'image. L'orientation externe détermine la position et l'orientation de l'appareil dans l'espace-objet. Cette orientation est donc composée de six paramètres : trois pour la position (coordonnées suivant les trois axes: X, Y, Z) et trois pour l'orientation (angles autour des trois axes : Θ, ψ, ω).

À partir de ces paramètres, la restitution photogrammétrique va extraire un ensemble de coordonnées dans l'espace. Le nombre d'images utilisées détermine la méthode : mono, stéréo ou multi-images (Figure 33) [Grussenmeyer P. et al., 2001].

La restitution à partir d'une seule image se base sur la mesure de plusieurs points, puis le redressement est estimé par approximation en considérant que les surfaces sont identifiées par un minimum de quatre points d'appui. Cependant, l'extraction de mesures est contrainte à l'orientation du plan choisi pour la rectification. La restitution à partir d'un couple d'images utilise une configuration stéréo. Les coordonnées 3D peuvent être retrouvées en cherchant l'intersection dans l'espace de deux points homologues sélectionnés entre les images.

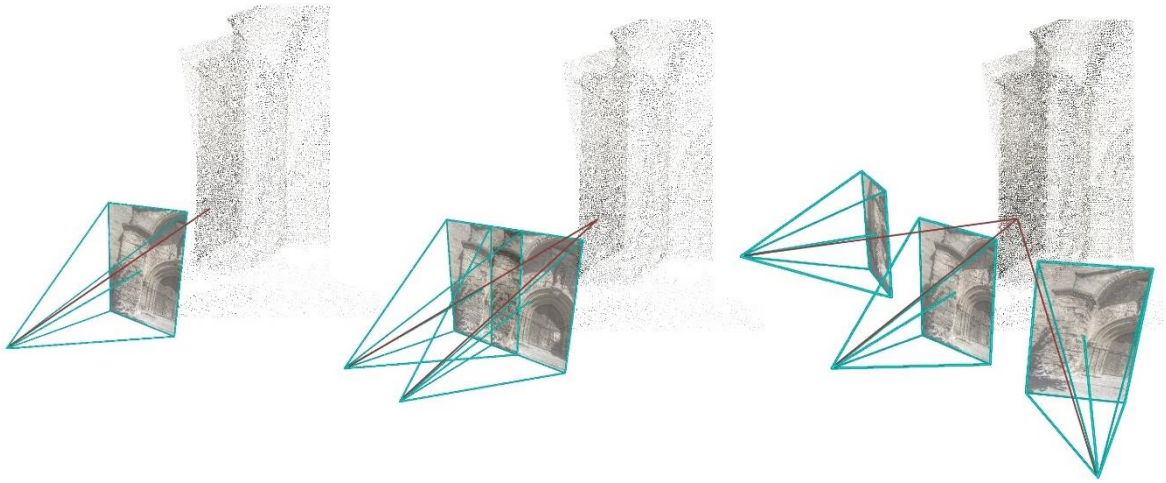


Figure 33 : Schéma représentant les trois techniques de restitution photogrammétrique. De gauche à droite : la restitution à partir d'une seule image, d'un couple d'images et d'un bloc multi-image.

Pour la restitution à partir de plusieurs images, la méthode se base sur l'ajustement des faisceaux à partir d'un ensemble de correspondances sélectionnées sur les photographies.
Sur cette méthode, le calcul des paramètres interne et externe peut être affiné par minimisation d'erreur. Ces trois méthodes ont été, à leur début, relativement manuelles, notamment sur la sélection des points homologues entre les images sur les deux dernières techniques.
Aujourd'hui, des solutions automatiques se développent pour les détections de points de correspondances et d'extraction de caractéristiques, permettant de développer une chaîne de reconstruction automatique à partir d'images non-orientées. Par conséquent, la génération de nuages de points avec différents degrés de densité est possible. Il y a différents outils qui permettent de produire une telle entité avec plus ou moins de performance : l'application [123D Catch] développée par Autodesk, PhotoScan [PhotoScan] de Agisoft, ou encore Bundler [Bundler].
Les paragraphes suivants montrent des exemples de ce qu'il est possible de générer après la phase d'acquisition photographique réalisée in situ en utilisant la suite d'outils photogrammétriques gratuits [Pierrot-Desseiligny M. et al., 2011a] [Pierrot-Desseiligny M. et al., 2011b]. La suite logicielle MIC MAC, développée par l'IGN, permet de réaliser des nuages de points à partir d'un ensemble d'images. Le nuage de points obtenu possède un niveau de cohérence important avec les images ainsi qu'une reproduction de la réalité et une résolution approximativement similaire à des données issues d'un laser. Avant d'obtenir un nuage précis multi-résolution, les outils de photogrammétrie procèdent à un traitement en trois phases. Les résultats (données) obtenus à la suite de ces étapes sont exploitables pour les traitements à venir notamment l'extraction des informations géométriques.

- **Calibration et orientation des images :** elle constitue la première phase qui est basée sur des méthodes open sources PASTIS et APERO [Pierrot-Desseiligny M. et al, 2011b], constituées de modules permettant de détecter et d'extraire des points communs entre les images, comme le ferait l'œil humain. Ces points sont appelés « Tie points » (points de correspondance ou homologue) (SIFT [Lowe D.G., 1999]) (Figure 34). Peu importe la position de l'individu par rapport à l'objet, un de ses points physiques sera toujours le même en fonction des prises de vue. Ces modules estiment également les paramètres internes et externes de la géométrie de l'appareil, calculent la solution initiale et enfin ajustent les faisceaux de correspondances pour les orientations relatives et absolues. De manière générale, ils calculent la position et l'orientation relatives des images. Cette première étape crée donc des fichiers d'orientation et de calibration, permettant ainsi de visualiser un modèle 3D constitué, d'une part, des points SIFT sous forme de nuage de points, et d'autre part, la position des caméras de chaque prise de vue (Figure 35).

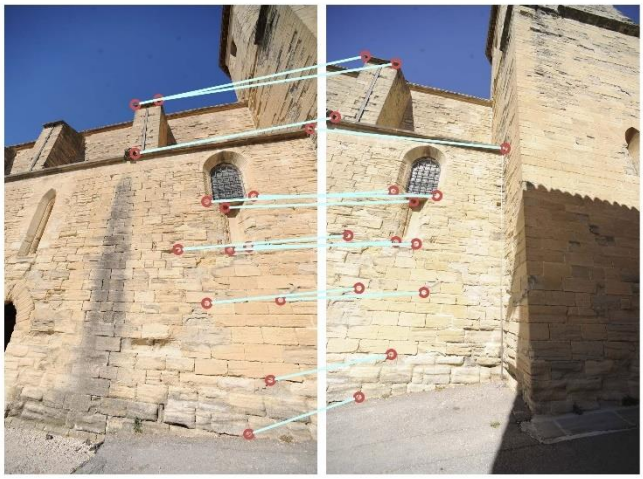


Figure 34 : Faisceaux des points SIFT en deux images d'un même objet : façade Est de l'église Saint-Maurice.

- **Corrélation dense multi-vues :** connaissant à présent la position des images, une méthode de reconstruction par appariement dense génère des cartes de profondeurs, pour chaque image, en utilisant une approche pyramidale d'appariement. Cette approche donne, pour chaque pixel ou pour un groupe de pixels de l'image, une valeur de profondeur. Ceux-ci sont enfin projetés dans l'espace tridimensionnel en sélectionnant les parties de l'image qui sont les plus pertinentes pour la projection par corrélation.

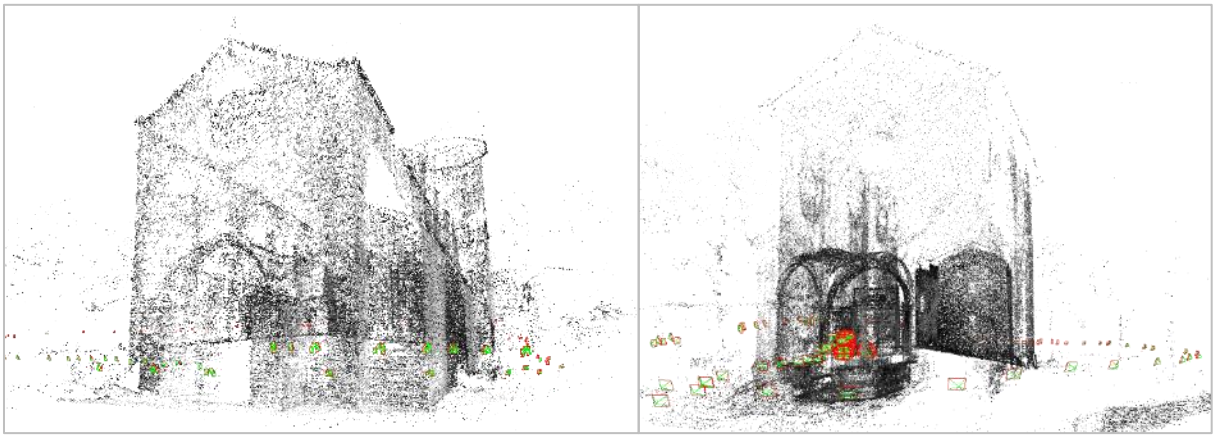


Figure 35 : Orientation des images autour du nuage du point SIFT: Église Saint-Maurice (à gauche), Chapelle Notre-Dame des Fontaines (à droite).

- **Génération du nuage de points :** Grâce aux résultats obtenus à travers les deux étapes précédentes, les cartes de profondeurs vont convertir les pixels en points 3D métriques dans un référentiel relatif. Cette conversion est basée sur la projection dans l'espace des pixels de l'image en tenant compte de l'orientation et des positions calculées dans la première phase. En outre, chaque image sert à générer une partie du nuage de points jusqu'à obtenir des coordonnées 3D pour chaque pixel. C'est l'agrégation de toutes ces parties qui permet de constituer le nuage de points final de l'objet étudié (Figure 36).

Figure 36 : Nuage de points final par photogrammétrie : église Saint Maurice (à gauche), Chapelle Notre-Dame des Fontaines (à droite).

Aujourd'hui par le développement croissant de cet outil, il est possible de créer ce même nuage de points avec une ligne de commande comprenant quatre actions (Figure 37).

Le procédé général pour générer le nuage de points permet également, à partir des images, de créer d'autres types de visualisation, qui renferment beaucoup d'information et s'avèrent très utiles pour obtenir un aperçu de la morphologie complexe de l'édifice patrimonial.

```
"AbsolutePath"/mm3D Tapioca All ".*JPG" 1200
&& "AbsolutePath"/mm3D Tapas FraserBasic ".*JPG"  Out=All
&& "AbsolutePath"/mm3D AperiCloud ".*JPG"  All RGB=0
&& "AbsolutePath"/mm3D C3DC QuickMac ".*JPG" All
```

Figure 37 : Ligne de commande tout-en-un pour la génération d'un nuage de points dense (MIC MAC).

Il est également possible de réaliser la même méthode sur des photographies montrant des détails caractéristiques de morphologies qui sont, elles aussi, orientées dans le même référentiel que le nuage de points général de l'objet étudié (Figure 38).

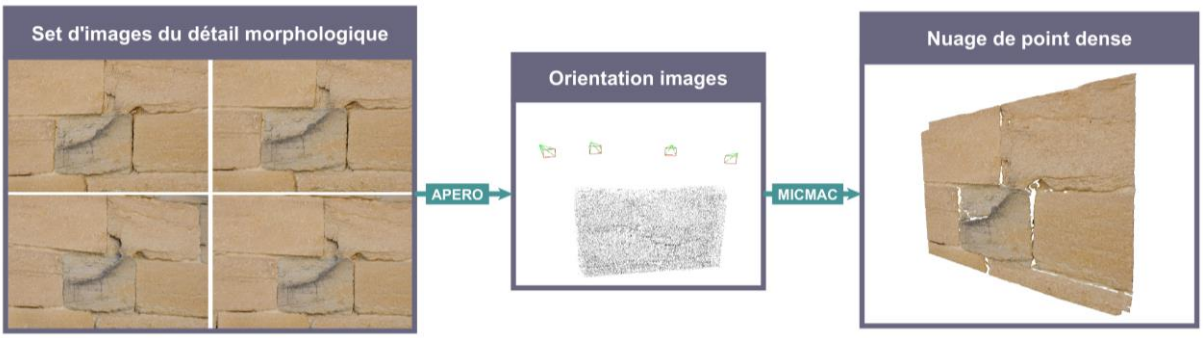


Figure 38 : Processus photogrammétrique appliqué à sur un détail morphologique : mur Est de l'église Saint Maurice.

Le processus général de modélisation 3D automatique, basée sur les images, se place dans un référentiel complètement arbitraire, donc même si le modèle 3D peut atteindre une résolution similaire à celle d'un scanner, il est essentiel de le mettre à l'échelle pour tout traitement futur.

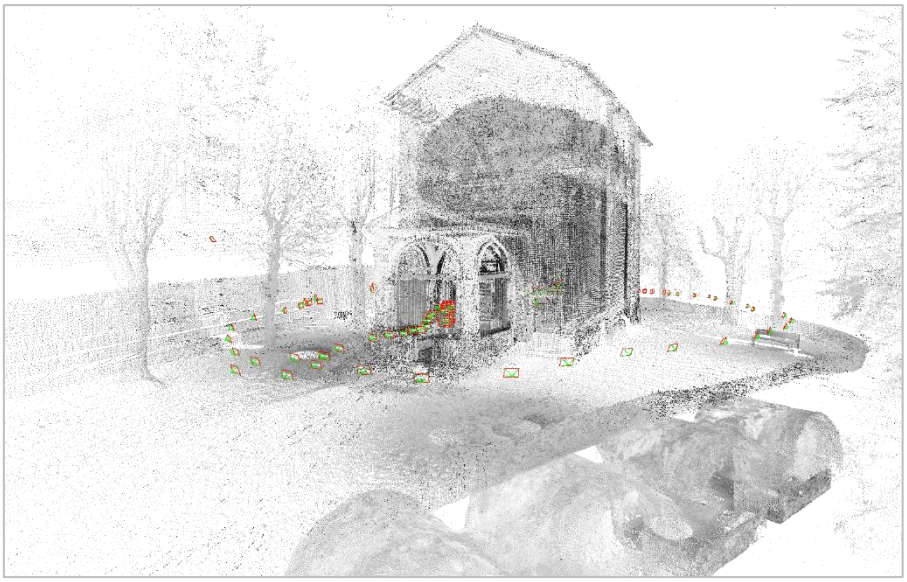


Figure 39 : Nuage de points scanner/Apericloud dans un même référentiel de coordonnées : chapelle Notre-Dame des Fontaines.

Afin de mettre à l'échelle l'ensemble du système image, il faut identifier un nombre de points suffisant en commun entre le modèle 3D du scanner et celui issu de la photogrammétrie puis de les faire coïncider : le modèle photogrammétrique sera alors positionné dans un référentiel de coordonnées métriques absolues (Figure 39). Cette représentation tridimensionnelle rend possible la réalisation d'analyses quantitatives précises et pertinentes d'informations morphologiques et spatiales.

2.3.3. Imagerie 2D produite par un traitement

Une importante quantité de données a été produite durant une phase d'acquisition de terrain. La plupart des données, en particulier 2D, générées après analyses, sont issues de données brutes de terrain et mettent en évidence davantage d'information.

2.3.3.1. Rendus 2D basés sur une reconstruction 3D

À partir du modèle 3D conçu photogrammétriquement, il est possible de produire des visuels 2D pour observer, analyser, et comprendre des phénomènes de dégradations distribuées spatialement sur une structure de maçonnerie. Donc, à partir d'un nuage de points généré par photogrammétrie, l'expert peut produire des cartographies sur des images issues de ce nuage de points.

2.3.3.1.1. L'orthophotographie

L'orthophotographie est, comme son nom l'indique, une image créée selon un plan choisi et dont l'axe de point de vue est perpendiculaire à l'axe de ce plan. Appelée également orthoimage, elle est obtenue par traitement d'un cliché photographique dont la géométrie a été redressée de sorte que chaque point qui le compose soit superposable à une carte plane qui lui correspond. Elle permet donc de corriger les inclinaisons (de certaines déformations), d'aplanir l'objet de la prise de vue, puis de corriger les erreurs de parallaxe commises lors de l'acquisition ainsi que les déformations optiques des objectifs de l'appareil utilisé [Pierrot-Deseilligny M. et al., 2011a].

Les modules *PIMS2MNT* et *TAWNY* de MICMAC servent à générer, à partir des photographies orientées, des orthophotographies (Figure 40).

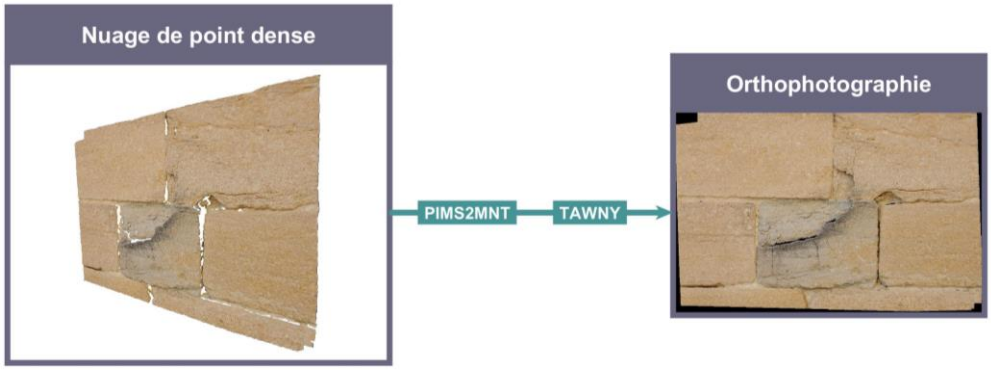


Figure 40 : Du nuage à l'orthophotographie.

Ce sont des images de projection sur un plan spécifique. Ces images permettent d'avoir un bon point de vue pour réaliser des observations scientifiques sans se soucier des reliefs quelconques ou de la perspective, et constituent ainsi un support utile pour la cartographie.

Spécifiquement, *PIMS2MNT* est un module de conversion des données en modèle numérique de terrain pour définir, par la suite, un plan moyen passant par l'ensemble des points. *TAWNY*, est un module qui génère des orthophotographies à partir des résultats et du plan de *PIMS2MNT*.

2.3.3.1.2. Rendu en carte de profondeur, en occlusion ambiante et en IgnE

À partir des résultats précédents, il est possible de réaliser d'autres types de visualisation permettant de nous rendre compte de la complexité morphologique du bâti. En utilisant le même point de vue des orthoimages, nous pouvons générer des images de type : occlusion ambiante, carte profondeur et rendu shade IgnE. Ce dernier, étroitement similaire à l'occlusion ambiante, propose la génération d'un autre type d'ombrage (Figure 41).

- Les cartes de profondeur : lors de la création des orthoimages, un plan a été défini pour sa génération. Ce plan est également utilisé pour gérer des cartes de profondeurs, dont le résultat est une image en niveau de gris. Pour chaque point 3D, il s'agit de mesurer la distance entre ce point et le plan. Plus le point est éloigné du plan (en avant

de celui-ci) plus son intensité de couleur tendra vers le blanc. À l'inverse, plus la distance est grande en arrière de ce plan (en profondeur) plus celui tendra vers une intensité noire.

- La carte d'occlusion ambiante : appelée aussi rendu en portion de ciel visible, est une visualisation populaire et très utile dans les systèmes d'infographie. C'est une méthode d'éclairage issue de la technique du lancer de rayon. Pour chaque élément à ombrer (que ce soit un pixel dans l'espace image, ou un sommet dans un maillage), la voûte céleste est échantillonnée et des rayons sont projetés pour obtenir l'éclairage. Donc pour chaque point de l'image un calcul, dit de portion de ciel visible, est réalisé c'est-à-dire que nous allons associer à chaque point un hémisphère dont la portion n'est pas stoppée par ses voisins. Un plan d'horizon est réalisé vu que nous sommes dans un espace 3D et un angle est défini par rapport à celui-ci : plus l'angle de l'hémisphère est grand plus le rendu s'oriente vers le blanc. À l'inverse, plus l'angle est petit plus le rendu s'oriente vers le noir [Duguet F. et al, 2004b]. Cette technique est utilisée pour accentuer de manière importante les reliefs même les plus difficiles à percevoir à l'œil nu. Les cartes IgnE sont d'autres types de visualisations très semblables au rendu en ambiante occlusion.

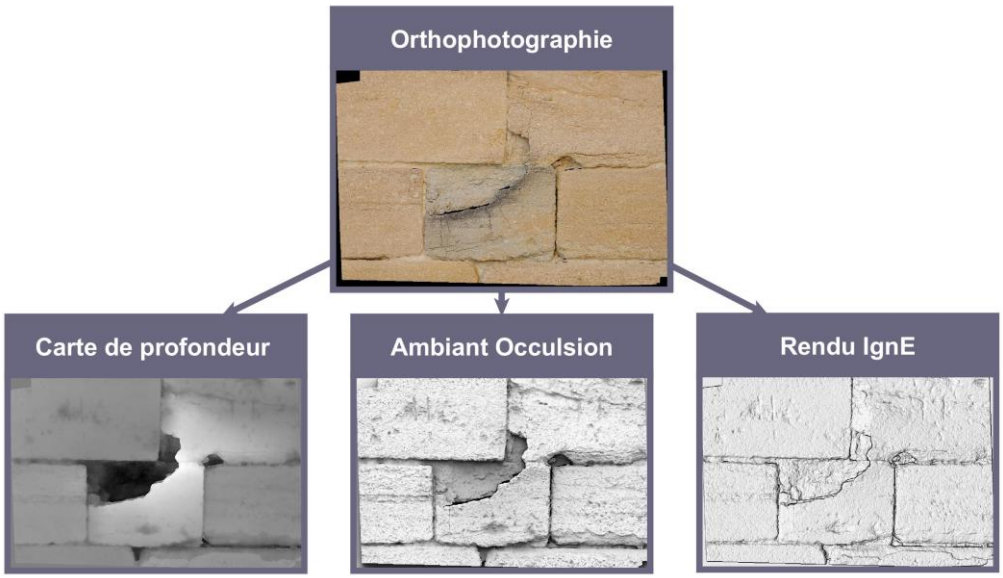


Figure 41 : Rendus générés sur la base des orthoimages : altération du mur Est, église Saint-Maurice.

2.3.3.2. Cartographies 2D en laboratoire

Dans de nombreux monuments historiques, différents types de pierres ont été utilisés en fonction des considérations architecturales artistiques ou tout simplement selon la disponibilité ou à l'aptitude de la pierre à être travaillée. De plus, la réponse de la pierre soumise à des contraintes environnementales est différente car elle multiplie la quantité de formes d'altérations. Des solutions ont donc été mises en place afin d'identifier et de

discrétiser ces caractéristiques visuelles : la cartographies 2D en laboratoire basée sur la photographie.

Similairement à la méthode de cartographie in situ, la technique de cartographie 2D en laboratoire se base sur l'utilisation d'images imprimées, acquises lors d'une précédente campagne d'acquisition. Dans un premier temps, les cartographes exploitent le papier calque qu'ils superposent à l'image pertinente, puis dessinent des caractéristiques remarquables de l'image en lien avec leur domaine d'expertise. D'autres méthodes préconisent l'utilisation de programmes informatiques multi-calques pour cartographier directement les photographies acquises.

Cette partie présente ces types de méthodes en énonçant le type de donnée récupérée. À ce stade d'acquisition, nous sommes à la frontière entre la donnée et l'information, car l'expert, en dessinant, analyse l'image et reconnaît quelques caractéristiques en faisant appel à ses connaissances propres. De cette façon, nous pouvons donner du sens aux régions annotées.

2.3.3.2.1. Cartographies manuelles sur calques physiques

En utilisant l'image comme un support, la technique est portée vers le dessin où les seuls outils sont le papier calque et des crayons de couleur pour représenter différentes caractéristiques morphologiques identifiées. La cartographie manuelle est un savoir-faire à part entière, car elle demande des compétences précises en termes de classification visuelle d'éléments. L'exemple ci-dessous nous montre notamment la structure pierre-à-pierre. Cette structure cartographiée peut ensuite être utilisée (en conservant l'image référence acquise) pour dessiner la distribution de plusieurs dégradations : la desquamation en plaque et la colonisation biologique. Enfin, grâce à la superposition de ces deux cartographies, il est possible d'identifier la localisation d'une altération particulière et connaître les matériaux spécifiques sur lesquels elles agissent (Figure 42).

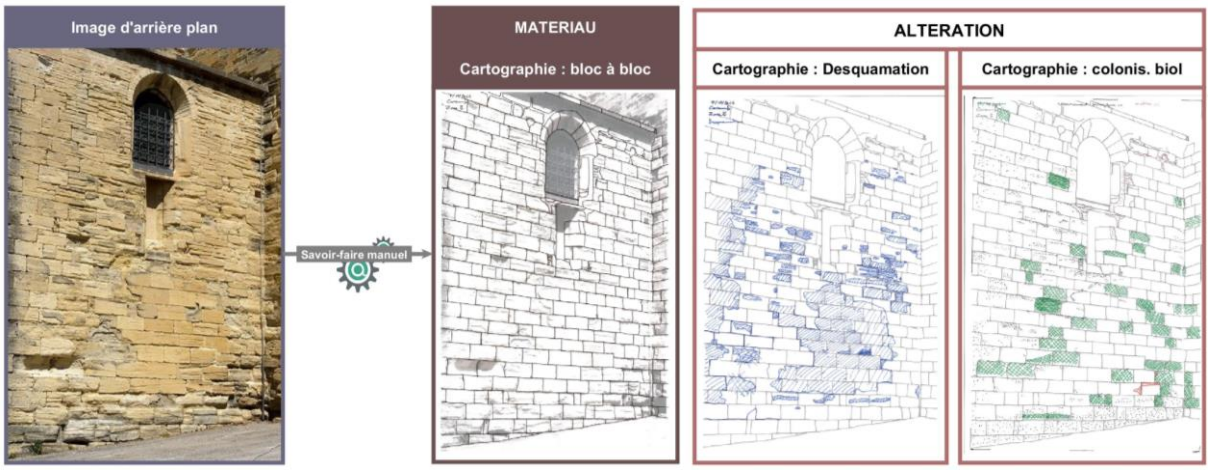


Figure 42 : Exemple de cartographies manuelles thématiques sur les matériaux et altérations : Mur Est de l'église Saint Maurice (CICRP.cartographies par Bromblet P.).

Ces documents sont primordiaux pour le suivi de la conservation, car ils donnent des informations sur l'état d'un édifice à un instant t. En superposant les différentes feuilles de papier calque, il est possible de donner du sens et tirer des diagnostics pertinents en rapport avec les phénomènes de dégradation agissant sur des matériaux identifiables.
Les régions sont dessinées sur des calques thématiques. Donc bien avant la procédure de dessin, le cartographe sait pertinemment quel concept/qualificatif il est sur le point d'utiliser parmi son panel de connaissances. À travers cette technique la dimension qualitative est bien présente par l'association d'une annotation à une connaissance. De plus, nous pouvons caractériser les éléments annotés à travers une analyse quantitative (par exemple : la pesée des parties annotées du calques correspondant à une altération par rapport à la masse du calque total donne une proportion précise de la surface altérée). Ce savoir-faire peut se combiner avec des logiciels de dessin vectoriel en mesure de prendre en compte des aspects plus précis en terme d'analyses morphologiques et spatiales.

2.3.3.2.2. Cartographie assistée par ordinateur

Sur le même principe que le précédent, des outils de traitement d'images vectorielles flexibles permettent de réaliser des cartographies précises via l'utilisation de calques numériques thématiques. En effet, l'emploi de tels logiciels augmente de manière notable la vitesse de production des données et leur pérennité. C'est le cas de l'outil open source Inkscape [Inkscape]. Ce logiciel donne des résultats très encourageants en termes de structuration et d'analyses. Une image de base est également utilisée en arrière-plan pour entreprendre la description cartographique sur des calques superposables. Voici un exemple appliqué aux dégradations de surface (Figure 43). Ce type d'outil rend possible la considération des différentes intensités des phénomènes d'altération [Fitzner B., 2002] [Fitzner B. et al., 2002] afin de diagnostiquer l'objet du patrimoine [Přikryl R. et al., 2007]. Notamment, la Figure 43 montre les différents degrés de perte de matière, en millimètre de profondeur, d'une altération (la desquamation en plaque) représentée par des couleurs différentes (nuances de rose et de violet).

Par cette méthode, il est possible de combiner l'expertise d'un cartographe avec la flexibilité d'un outil de dessin vectoriel. Les données générées, associées à chaque image de base, sont sauvegardées en format .SVG (un format vectoriel, ENG : Scalable Vector Graphic, FR : graphique vectoriel adaptable) basé sur une syntaxe XML. Le format SVG peut être réutilisé à des fins d'analyses notamment pour formuler des requêtes de distribution surfacique.

Il est également possible d'intégrer des orthophotographies de façade sur lesquelles nous pouvons réaliser des régions 2D sans se soucier de la perspective et réaliser des calculs de distribution de manière plus pertinente.

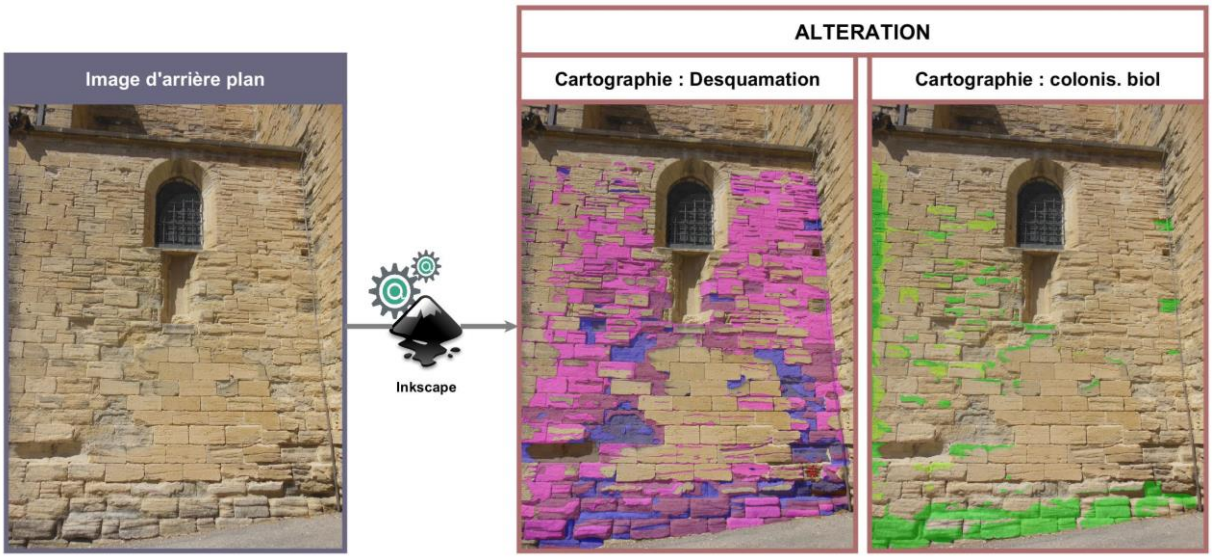


Figure 43 : Exemple de cartographies thématique d'altérations assistées par ordinateur : mur Est de l'église de Caromb (CICRP.cartographies Benard A.) [Benard A., 2015].

2.3.3.3. Imagerie scientifique : image en infrarouge fausse couleur

Cette image, dite composite, est réalisée en utilisant un logiciel de traitement photographique intégrant des fonctionnalités pour éditer les couches-couleur incorporées dans l'image. Celle-ci est produite en superposant une partie des couches de l'image noir et blanc en lumière directe et une des couches de l'image produite dans l'infrarouge [C2RMF, 2017]. Un protocole doit être défini au préalable pour travailler dans les mêmes références de couleur (Figure 44). Bien que l'image dans l'infrarouge ne nous fournisse pas d'information visuelle précise, sa superposition avec l'image en lumière directe (selon le même point de vue) améliore l'interprétation par la mise en valeur des niveaux de gris artificiellement transformés en une gamme de couleurs facilement lisible par l'œil. L'imagerie en IR fausse couleur permet de comparer voire même d'identifier des similitudes au niveau des matériaux présents sur l'ensemble des parties peintes.

Son analyse conduit notamment à entreprendre et orienter les autres campagnes d'acquisition (en aidant à la définition des zones d'analyses et de prélèvements), mais également à réaliser des cartographies 2D concernant la répartition spatiale des matériaux mis en valeur. La lecture du dossier documentaire, pour une œuvre étudiée, s'appréhende en croisant les différentes données obtenues.

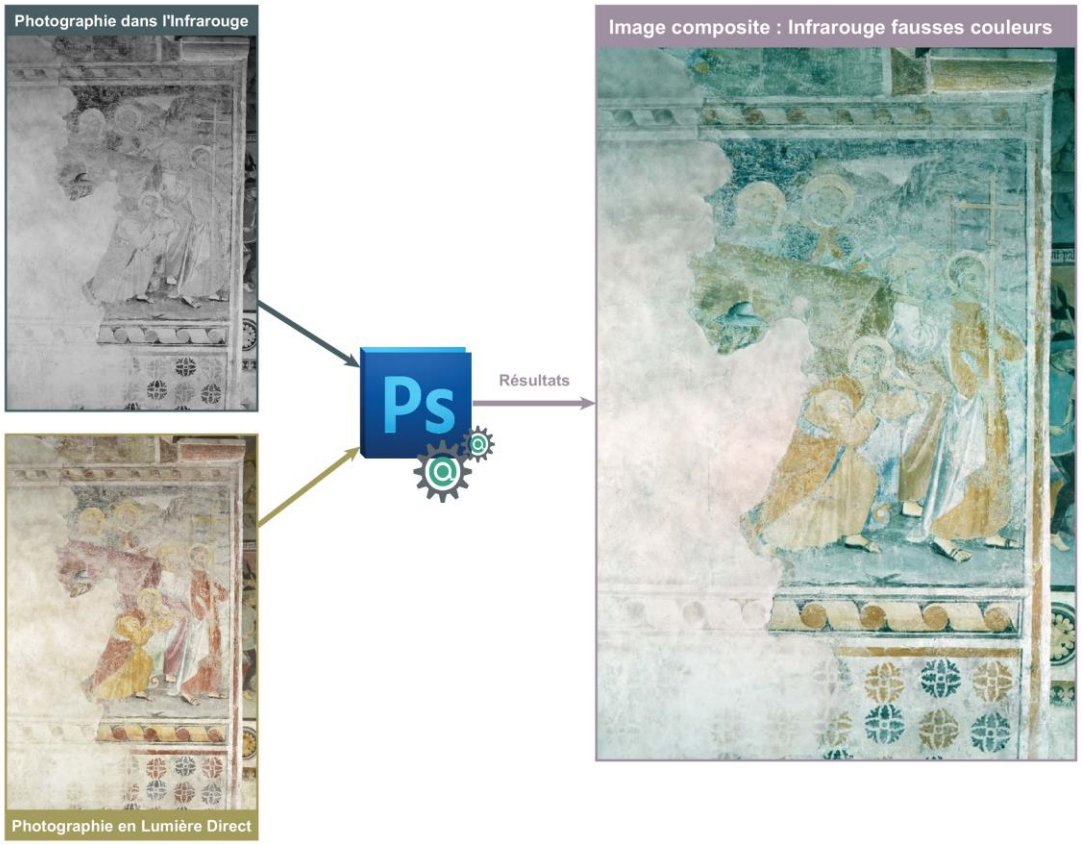


Figure 44 : Technique de création d'une image composite infrarouge fausse couleur : peinture Est du chœur de la Chapelle Notre-Dame des Fontaines (CICRP.Photo Odile Guillon).

2.3.4. Données résultant d'essais expérimentaux

Certaines pierres calcaires, simplement exposées aux pluies et aux ruissellements, développent des dégradations remarquables qui affectent le matériau sur plusieurs centimètres d'épaisseur, voire même au cœur du bloc. S'exprimant sous différentes formes, ces altérations entraînent des désordres physiques et chimiques considérables. Elles induisent d'importantes pertes de matière et obligent les maîtres d'œuvre à opérer des changements conséquents de pierre, coûteux et parfois peu conformes à la déontologie de la conservation.

En laboratoire, des expériences sur les matériaux sont menées afin de mettre en exergue des données telles que leur composition minéralogique, ou même de connaître le plus précisément possible l'état d'un bloc de pierre au travers de simulations variées. Les échantillons prélevés sur un monument, lors d'acquisition in situ, sont soumis particulièrement à différentes analyses en laboratoire : caractérisation de propriétés spécifiques et essais de dégradation. Ils permettent de fournir davantage de données. Pour chacun des essais, le protocole est présenté pour ainsi en comprendre les aboutissants.

2.3.4.1. Résultats de simulations expérimentales de vieillissement de la pierre

Protocole :

Ce type de simulation demande de préparer et suivre un protocole très précis [Janvier-Badosa S. et al., 2015] (Figure 45). Cette simulation permet d'observer le comportement d'une pierre face à un essai de vieillissement accéléré en émettant des hypothèses : par exemple la présence de gypse, est un des composés responsables de la desquamation en plaque des matériaux tuffeaux de type calcaire.

Pour se faire, une carotte du matériau, extraite lors d'une prise d'échantillon in situ, est nécessaire. La pierre étudiée, provenant d'une carrière d'extraction, est un matériau utilisé pour construire des structures maçonnées dans les pays de la Loire (Tuffeau pour le château de Chambord) et subit, de manière non négligeable, des contraintes environnementales lors du cycle de vie du bâtiment.

Un essai de vieillissement artificiel est effectué en appliquant des cycles partiels d'imbibition/ séchage sur plusieurs échantillons représentatifs du matériau utilisé sur des bâtiments existants, présentant différentes formes d'altérations.

Le but de l'expérimentation est de connaître les causes de dégradations de la pierre en simulant des conditions environnementales dans lesquelles l'eau (la pluie ou l'eau provenant de la nappe souterraine par exemple) est connue comme étant le principal agent d'altération. Les échantillons sont donc soumis à un certain nombre de phases variées d'imbibition/séchage dans soit :

- Une eau chargée en gypse (minéral, $CaSO_4.2H_2O$) en excès (un composé prouvé comme réagissant lors du phénomène de desquamation en plaque) afin de simuler les pluies, les ruissellements de l'eau sur le bâtiment, ou l'eau absorbée par la pierre sous l'effet d'un phénomène de remontée capillaire.
- Une eau chargée d'acide sulfurique (H_2SO_4) pour simuler la pollution atmosphérique notamment les pluies acides.
- En présence d'un gaz, le dioxyde de soufre (SO_2) pour simuler un autre type de pollution atmosphérique en saturant l'environnement de l'échantillon.

Ce type d'expérimentation permet de tester le matériau sous différents angles et différents états (fissuré ou non, isolé ou non) préparés préalablement. Ceci pour établir et pour comprendre les relations entre l'apparition de gypse et des fissures préexistantes dans la structure interne du matériau dans différents cas d'isolation. Une façon de reproduire les trois conditions possibles in situ (Figure 45).

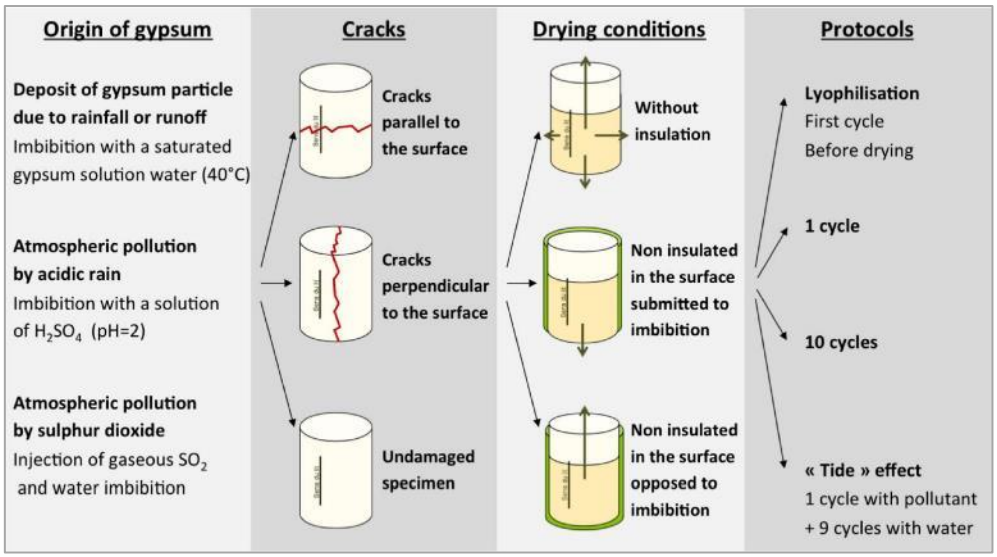


Figure 45 : Plan du protocole d'expérimentation pour la simulation de vieillissement du matériau [Janvier-Badosa S. et al., 2015].

Des analyses chimiques et cristallographiques par DRX (FR : Diffractométrie de Rayon X, ENG : XRD X-Ray Diffraction) ont été réalisées à chaque étape de simulation de vieillissement pour évaluer la distribution de gypse à différentes profondeurs en analysant la poudre prélevée sur les échantillons [Beck K., 2006].

Résultats :

Les figures suivantes montrent les résultats obtenus en rapport avec chaque étape d'exécution pris en compte dans la simulation de vieillissement. Ils nous fournissent des informations pour émettre des interprétations. Dans un premier temps, une donnée essentielle permet de connaître, à un instant T, la présence de gypse tout au long du protocole : le Diffractogramme de Rayon X. En effet, tous les sulfates quantifiés par chromatographie ionique sont sous la forme de gypse (Figure 46).

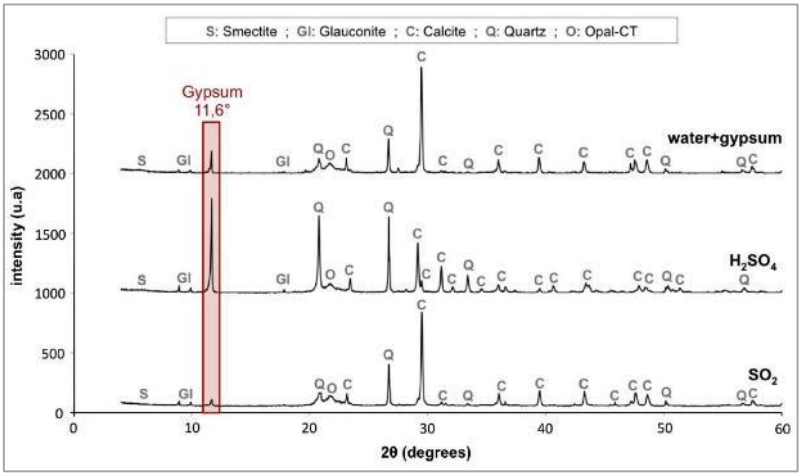


Figure 46 : exemple de diffractogramme rayon X réalisé sur la poudre des trois situations après le premier cycle d'imbibition [Janvier-Badosa S. et al., 2015].

D'autres exemples de données représentées sous forme de tableau ou schéma permettent, lors de la phase d'interprétation, de fournir des informations sur les phénomènes observés (Figure 47).

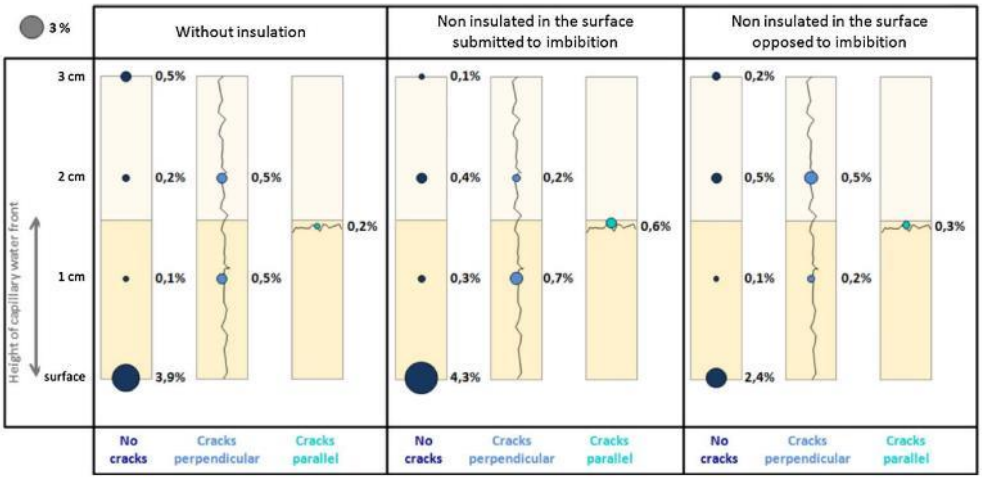


Figure 47 : Représentation schématique de la concentration en gypse (en poids) dans les échantillons sujets au protocole impliquant la solution de gypse saturé, influence de l'isolation et des fissures [Janvier-Badosa S. et al., 2015].

Les différentes données acquises pendant cette phase de simulation peuvent, en effet, en les croisant, générer des hypothèses quant à l'impact de différents agents chimiques ou minéralogiques impliqués dans le phénomène de dégradation (section 2.4.3.2.2.).

2.3.4.2. Résultats d'essais mécaniques de la pierre

Afin de caractériser l'état physico-chimique du matériau, des échantillons de matériaux choisis de la même façon que pour les simulations précédentes (lors d'une acquisition in situ), à travers un protocole bien précis, subissent des simulations dans le cadre des caractérisations expérimentales [Perales, F. et al, 2005]. C'est le cas des pierres utilisées pour la construction de l'église Saint Maurice de Caromb [Bagnéris M. et al., 2014]. Nous présentons, dans cette partie, deux essais caractéristiques afin de mettre en évidence la résistance à la rupture et la rigidité du matériau (Figure 48) :

- L'**essai de compression uniaxiale** permet de solliciter le matériau en compression pure à vitesse constante dans la direction longitudinale selon des normes spécifiques. Il utilise des échantillons cylindriques. Lors de l'essai, les déplacements horizontaux du matériau sont autorisés et sont possible par l'utilisation de disques en téflon intercalés entre les faces de l'échantillon et les plateaux de la machine, afin d'assurer un état de compression pure et homogène. Une caméra peut être placée devant le poste d'expérimentation afin d'acquérir des images à un intervalle de temps régulier et ainsi, par corrélation d'images, obtenir des champs de déformation de l'échantillon au cours de l'essai.
- **L'essai de fendage** ou **« Brésilien »** permet quant à lui de solliciter le matériau en traction, dans la direction radiale, en utilisant également des échantillons cylindriques.

Le dispositif contraint le matériau jusqu'à la rupture. La force maximale mesurée permet d'évaluer la contrainte de traction horizontale lors de l'apparition d'une fissuration verticale.

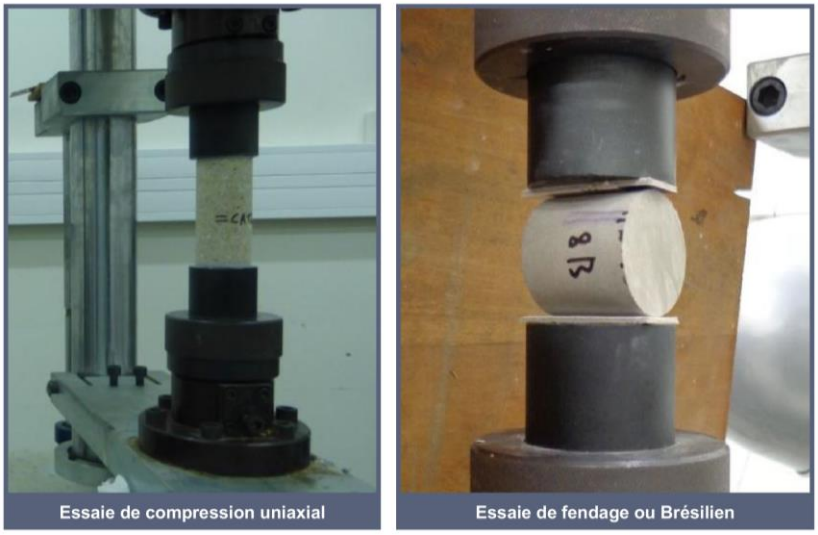


Figure 48 : Dispositifs pour la résistance à la rupture et la rigidité.

Protocole :

Les échantillons (carottes) sont tout d'abord soumis à un séchage (dans un four à 65 °C) pendant 48 heures afin de définir leur masse sèche. Étant donné que les propriétés mécaniques de la pierre dépendent fortement de la teneur en eau massique, les échantillons sont ensuite divisés en cinq groupes soumis à des taux d'humidifications différents pour obtenir des échantillons avec des teneurs en eau distincts ; ceci pour couvrir la gamme complète de l'état à sec de la pierre à l'état saturé.

Résultats :

Les résultats bruts montrent de très grandes variabilités en comparaison avec d'autres matériaux de construction.

La Figure 50 et la Figure 52 montrent respectivement l'évolution de la résistance en traction $\mathbf{R_T}$ et de la résistance à la compression $\mathbf{R_C}$, du module de Young $\boldsymbol{E}$ en fonction de la teneur en eau massique $\boldsymbol{w}$. Quatre types de pierre ont ainsi été étudiés, dont la pierre jaune (CA) et la pierre grise (CG) de Caromb, dans les deux directions d'orthotropie. Les symboles ∥ et ⊥ signifient respectivement, « parallèle » et « perpendiculaire » au lit de la pierre.

Pour chaque propriété, une modélisation empirique est proposée écrite sous la forme [Vásárhelyi B. et al., 2006] :

$$R_T\ ,\ R_C = a\ e^{-b\,w} + c$$

où a, b et c sont trois constantes dont les valeurs numériques sont données par les Figure 49 et Figure 51, définies grâce aux deux essais. Le pourcentage de chute, donné sur la dernière ligne, représente la baisse des propriétés mécaniques de l'état sec à l'état saturé en eau.

Ceux-ci sont des exemples de simulation qu'il est possible de réaliser. Il est possible de générer d'autres caractérisations, que ce soit chimique, physique et/ou acoustique [Beck K., 2006], comme par exemple, l'utilisation du coefficient de Poisson, des tests de sollicitations pour des contraintes à la rupture, pour des contraintes à la déformation, pour définir des propriétés mécanique. Il est possible de déterminer également des caractéristiques hydriques (rétention d'eau, capillarité, perméabilité, cinétique d'évaporation et diffusivité) et des caractéristiques thermiques (conductivité, capacité thermique ou calorifique).

	BM		BA		CA		CG	
	∥	⊥	∥	⊥	∥	⊥	∥	⊥
a [MPa]	4,69	3,65	3,59	3,55	2,06	1,80	2,03	1,23
b	1314	1363	511	559	240	224	216	187
c [MPa]	6,22	6,02	4,56	4,64	3,66	3,16	1,30	1,29
chute	43%	38%	44%	43%	36%	36%	61%	49%

Figure 49 : Coefficient du modèle décrivant la résistance en traction pour quatre types de pierre [Bagnéris M. et al., 2014].

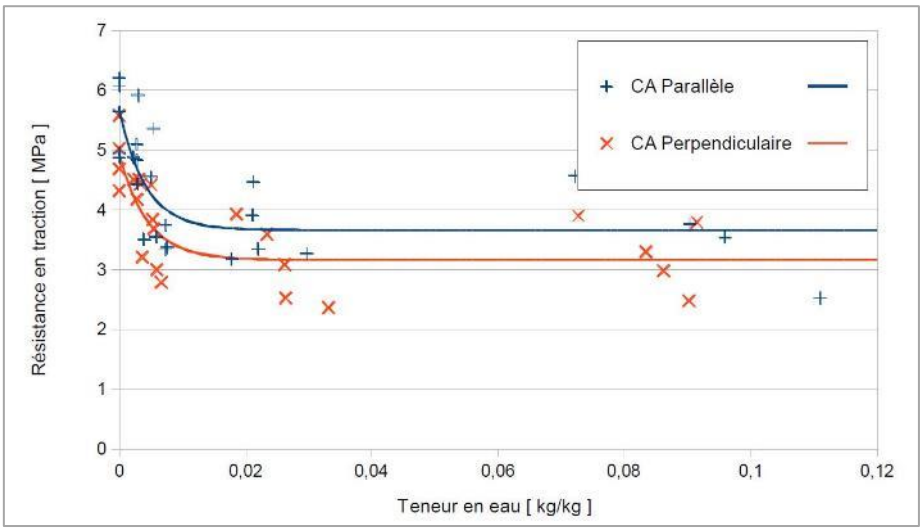


Figure 50 : Résistance en traction de la pierre jaune de Caromb (CA) en fonction de la teneur en eau [Berthonneau J. et al., 2012].

	BM		BA		CA		CG	
	∥	⊥	∥	⊥	∥	⊥	∥	⊥
a [MPa]	26,8	22,9	23,8	14,6	12,4	9,7	11,7	10,9
b	422	313	709	523	561	105	1006	143
c [MPa]	37,8	40,1	32,6	32,7	18,3	14,7	9,3	7,2
chute	42%	36%	42%	31%	40%	40%	56%	60%

Figure 51 : Coefficients du modèle décrivant la résistance en compression pour quatre types de pierre [Bagnéris M. et al., 2014].

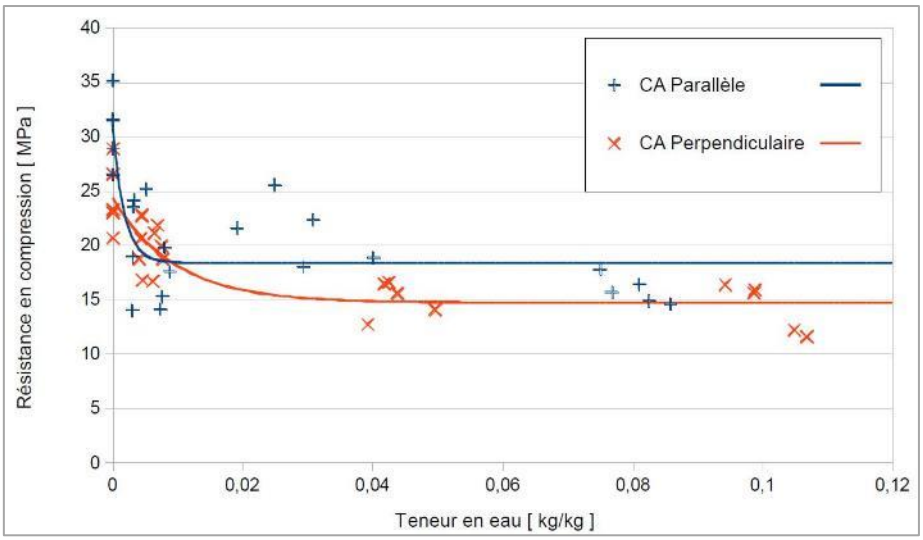


Figure 52 : Résistance en compression de la pierre jaune de Caromb (CA) en fonction de la teneur en eau [Bagnéris M. et al., 2014].

Toutes ces données obtenues peuvent être saisies dans des outils de simulations informatiques afin de rendre prévisible, l'apparition de phénomènes sur des structures complexes telles que les maçonneries, en créant des modèles géométriques numériques pour le calcul du comportement mécanique.

C'est le cas de la plateforme LMGC90 [Dubois F. et al., 2011] [Berthonneau J. et al., 2016] avec laquelle il est possible de créer un modèle numérique de calcul de bloc de pierre (contextualisé comme faisant partie d'un appareil de maçonnerie) dont la face extérieure, à l'air libre, est discrétisée très finement sur 5 cm de profondeur. C'est la face la plus soumise aux contraintes environnementales. L'objectif de ce modèle numérique est, dans le cas du projet MONUMENTUM, de décrire un phénomène de dégradation caractéristique présent sur la façade de l'église Saint-Maurice : la desquamation en plaque (Figure 53). L'outil LMGC90 récupère les propriétés (provenant des essais en laboratoire (transferts d'eau par capillarités, perméabilité de la pierre étudié et son comportement mécanique) afin de caractériser le modèle numérique de calcul pour la simulation. Dans cet outil, la pierre est décrite comme étant une entité matérielle élastique dilatante et dépendante du champ de teneur en eau.

Après une simulation sur le modèle numérique, appelée « simulation quasi-statique linéaire », il est possible de retirer des informations relatives à chaque pierre et ainsi faire des comparaisons en proposant de premières hypothèses quant à l'explication de l'apparition du phénomène complexe d'altération [Bagnéris M. et al., 2011] [Cherblanc F. et al., 2016]. Dans la section 2.4.3.2.1., nous présentons les différents types d'informations que l'on peut ressortir. Ce calcul numérique peut être étendu sur l'ensemble d'un bâtiment avec plusieurs niveaux de granularité (interaction des blocs jusqu'à l'interaction des composants architecturaux).

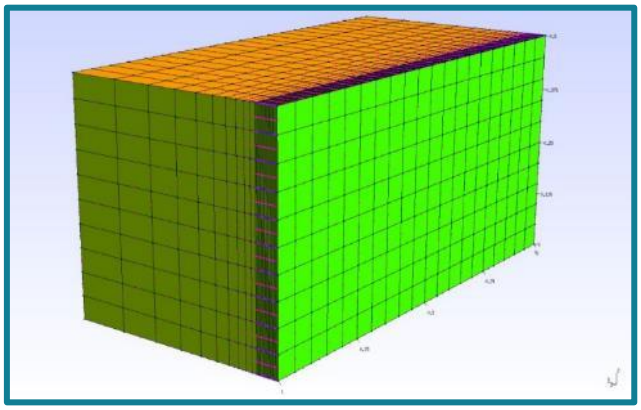


Figure 53 : Exemple de modèle géométrique maillé d'un bloc de pierre paramétré.

2.4. Extraction d'information : définition de descripteurs spécifiques

Une définition de la notion d'information est nécessaire afin de comprendre comment à partir des données, il est possible de produire du sens en y ajoutant une dimension sémantique [Bernstein J. H., 2011].

Dans le domaine des sciences informatiques, les chercheurs tentent d'imiter ou même de surpasser la vision de l'homme afin d'extraire automatiquement des informations à partir d'images, de modèles 3D ou des vidéos. Dans les prochaines parties sont présentés, dans un premier temps, les descripteurs de types images, donc des entités 2D, pour ensuite s'intéresser aux descripteurs inhérents aux objets 3D [Lowe D. G., 1999], avant de réfléchir sur l'extraction d'information relative aux analyses physico-chimiques et simulations présentées.

2.4.1. Extraction de descripteurs 2D d'images

L'image renferme des composants qui peuvent être exploités afin de ressortir des informations caractéristiques. Afin de tirer parti de celles-ci, il est en effet nécessaire de les extraire. Il est possible de distinguer deux types descripteurs : les caractéristiques globales [Tuytelaars T. et al., 2008] [Lisin, D. A. et al., 2005] qui sont relatives à l'ensemble de l'image, puis les caractéristiques locales qui font davantage appel à des parties plus spécifiques de l'image. La notion d'extraction d'images est un terme qui décrit la recherche d'images numériques dans d'importantes bases de données afin de ressortir des résultats (images) avec certaines caractéristiques, définies préalablement par l'utilisateur. Certaines méthodes ont proposé d'utiliser des requêtes textuelles, cependant celles-ci demandaient une association de toutes les images avec un texte particulier, et impliquait des processus fastidieux et coûteux en temps. C'est pourquoi une première approche a été développée, dans le cadre de récentes recherches, en se concentrant sur l'extraction d'images basée sur le contenu (ENG : content-based image retrieval) : une approche qui utilise des algorithmes d'extractions de caractéristiques. Elle a pour objectif de décrire et de comparer les images entre elles. La plupart de ces systèmes, qui exploitent ces types d'algorithmes, utilisent des caractéristiques de bas niveau (telles que la couleur, les formes, les textures) et des statistiques qui sont dites

globales ou **locales**. Ce sont deux notions que nous définirons dans la partie suivante. Elles constituent une base déterminante pour la génération d'information.

2.4.1.1. Caractéristiques globales

Le terme « global » est particulièrement utilisé pour des caractéristiques qui généralisent et prennent en compte l'image dans sa globalité. Un inconvénient notable est qu'il ne peut en aucun cas distinguer les informations de l'objet et son arrière-plan, ni donc les fusionner. Les caractéristiques globales sont liées à des représentations de types histogrammes, c'est-à-dire que l'on va chercher des informations qui seront liées au contenu de l'image. On parlera des informations obtenues par l'intermédiaire des formes, des couleurs et des textures.

2.4.1.1.1. Les histogrammes

Les histogrammes sont des représentations de dénombrement de données organisées en agrégats. Les histogrammes d'images peuvent être utilisés notamment pour la description d'une image entière en comptant la fréquence de chaque valeur d'intensité.

Par exemple, en ayant en entrée une simple image en niveau de gris, son histogramme est construit en créant des agrégats basés sur l'intensité de valeur de l'image (0 à 255), pour ensuite compter le nombre de pixels répondant bien à cette intensité (Figure 54).

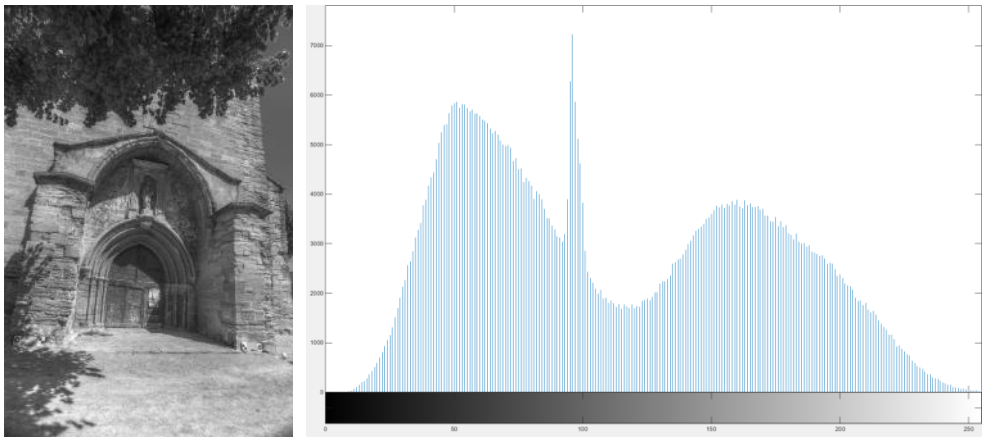


Figure 54 : Histogramme d'une image en niveau de gris.

La comparaison de deux images peut donc être réalisée en utilisant une fonction de distance (pour définir les différences d'intensité).

De tels histogrammes ont les moyens de révéler des informations quantitatives sur l'intensité des pixels, particulièrement en termes de fréquence d'intensité des valeurs [NIK, B., 2005]. Mais le contenu structurel de l'image ne peut pas être observé.

2.4.1.1.2. Les moments d'images

Ce sont des quantités scalaires utilisées pour caractériser une fonction et pour capturer ses caractéristiques significatives. Ils peuvent être utilisés pour dériver de simple propriétés images comme des aires (ou une intensité totale), barycentres et/ou orientations.

En 1962, [Hu M.K., 1962] fut le premier à introduire l'utilisation de moments d'image pour la caractérisation images 2D en définissant sept moments invariants en translation, en rotation et en mise à l'échelle, qui sont des dérivés provenant des moments géométriques. Depuis, de nombreux types de moments invariants ont été proposés [Teague M.R., 1980] [Li Y., 1992] [Wallin A. et al, 1995] [Flusser J., 2002]. Des invariants photométriques ont aussi été introduits par [Van Gool L. et al, 1996] pour la description de données multi-spectrales.

2.4.1.2. Caractéristiques locales

On s'intéresse davantage au point d'intérêt d'une image puis aux descripteurs spécifiques précis ou même aux groupes (ENG : bag of features, FR : groupes de propriétés). L'extraction de ce type d'information se réalise à travers des méthodes existantes qui ont subi beaucoup d'évolution au cours du temps.

2.4.1.2.1. La détection de point d'intérêt

De manière générale, les descripteurs locaux sont accompagnés d'algorithme de détection de points de correspondance dont la particularité est de trouver des points d'intérêt dans une image. L'extraction des caractéristiques peut donc être appliquée sur toute l'image autour de chaque point détecté. L'utilisation des points d'intérêt sert notamment à réduire considérablement les temps de calcul nécessaires pour réaliser l'ensemble des extractions sur chaque pixel de l'image. Cependant, de nombreux types de descripteurs se basent sur des grilles ou même des pixels au lieu d'utiliser des points d'intérêt.

Selon [Haralick R.M. et al, 1991], la sélection des points d'intérêt doit être réalisée en rapport avec leur invariance, leur robustesse, leur rareté et leur interprétabilité. Plus précisément, ces points doivent être uniques et distincts de l'arrière-plan, invariants aux distorsions géométriques et radiométriques et enfin robustes face au bruit. [Schmid C. et al, 2000] ont publié une évaluation des détecteurs les plus utilisés par rapport à ces critères.

[Moravec H.P., 1977] fut l'un des premiers à introduire un détecteur de points d'intérêt. Le principe est de calculer la somme des carrés des différences d'intensité sur des pixels adjacents, par groupe carré de 4 à 8.

À ce point-ci, il est d'ores et déjà possible de lier ces types de descripteurs images avec une sémantique. L'intensité est donc calculée dans une certaine direction et une carte spécifique est créée en utilisant la valeur de variation minimum pour chaque pixel. L'expert détecte comme point d'intérêt le point où la valeur est en dessous d'un certain seuil en utilisant une suppression non-maximale (technique d'amincissement des bords), afin de distinguer les vrais

points d'intérêt provenant du bruit. Cependant, cette technique utilise un système de coordonnées images et donc qui n'est pas invariant d'un point de vue des changements de rotation. De plus, elle est sensible au bruit, et bien que la technique de non-suppression maximale soit appliquée, il est facile de détecter du bruit en tant que points d'intérêt. L'opérateur détecte les points d'intérêt en calculant la matrice de covariance des pixels [Förstner W., 1994]. Chaque matrice décrit la distribution des gradients autour des pixels. Les points d'intérêt sont choisis parmi ceux ayant une grande différence de gradient.

Il existe plusieurs algorithmes pour détecter les arêtes et les coins comme SUSAN (ENG : Smallest Univalue Segment Assimilating Nucleus) [Smith S.M. et al, 1997], FAST (ENG : Features from Accelerated Segment Test) [Rosten E. et al, 2006]. Ils ne requièrent pas de réduction de bruit et ils sont très efficaces en termes de répétabilité.

TILDE (Temporally Invariant Learned Detector) est un nouveau détecteur de points d'intérêt introduit par [Verdie Y. et al, 2014]. Cet algorithme permet de résoudre les problèmes liés aux conditions d'éclairages et météorologiques, provoquant des changements entre les images. Il est très intéressant pour nous car il est en mesure de pallier les problèmes de diachronies, des problèmes que nous rencontrons souvent lors du processus de reconstruction tridimensionnelle d'un bâti patrimonial ou même de recalage multi temporel.

2.4.1.2.2. Descripteurs locaux

En 1999, a été introduit, dans la communauté de la vision par ordinateur, l'algorithme SIFT (ENG : Scale Invariant Feature Transform) qui a pour but de détecter, de décrire et d'extraire des caractéristiques qui sont utilisées pour la comparaison d'images et la reconnaissance d'objets [Lowe D. G., 1999]. SIFT utilise des caractéristiques invariantes par rapport à la taille de l'image, mais aussi en rotation et en translation. Ces caractéristiques sont aussi partiellement invariantes par rapport aux changements de lumières, aux projections affines et au bruit des images. Chaque caractéristique est décrite par un vecteur. L'algorithme passe notamment par la construction d'une pyramide de DoG pour extraire les points d'intérêt et le calcul de l'orientation des gradients (Figure 55) pour la définition de descripteurs de points d'intérêt (Figure 56).
C'est notamment une technique de transformation qui est utilisée pour l'appariement dense et l'extraction de points de correspondance, lors du processus photogrammétrique pour la reconstruction 3D (nuage de points) d'un objet.
Une alternative à SIFT, Dense SIFT, n'utilise pas la détection de point d'intérêt, mais exploite tous les pixels ou une grille de pixels dans l'image comme base, pour définir les caractéristiques.

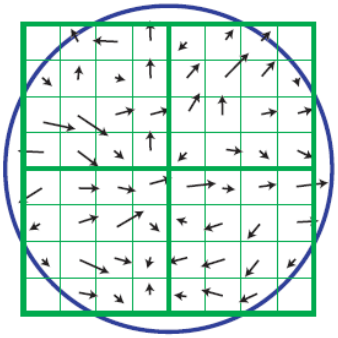


Figure 55 : Représentation du gradient d'image.

[Bay H. et al, 2006] ont introduit l'algorithme SURF (Speeded Up Robust Features), impliqué dans le logiciel MIC MAC, qui offre des résultats intéressants en termes de répétabilité, de distinction, de robustesse et de rapidité par rapport aux algorithmes jusqu'alors proposés. Cet algorithme est combiné à SIFT afin de donner plus d'efficacité aux nombres de points d'intérêts détectés pour générer un nuage de points dense plus précis.

DAISY est un autre descripteur local introduit par [Tola E. et al, 2010] qui a beaucoup de similarité avec SIFT (Figure 56).

BRISK (ENG : Binary Robust Invariant Keypoints) est une méthode introduite par [Leutenegger S. et al, 2011] qui combine la détection de points d'intérêt, la description et la correspondance. La partie détection est inspirée par les détecteurs FAST (Figure 56).

FREAK (Fast REtinA Keypoints) est un descripteur inspiré par le système de vision humain [Alahi A. et al, 2012]. Il est basé sur l'utilisation de valeurs binaires traitées pour comparer les intensités d'images à travers un motif rétinien (Figure 56).

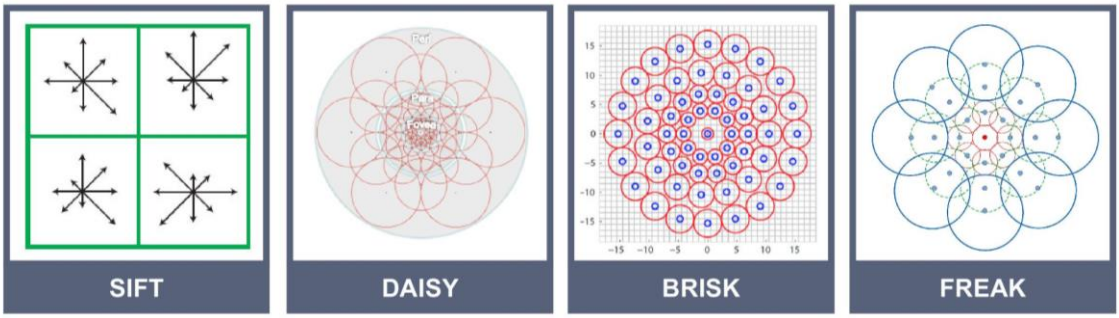


Figure 56 : Exemple de descripteurs locaux d'images.

À travers la prise en compte des différentes imageries scientifiques possibles de produire, nous pouvons mettre en valeur des informations internes à l'image, de manière quantitative et exploiter ces images accompagnées de leurs descripteurs dans une chaîne de traitement pour générer des informations. Ces informations peuvent se combiner avec des méthodes de description de la morphologie d'objet tridimensionnelle.

2.4.2. Extraction de descripteurs géométriques d'objet 3D

De nos jours, des approches de caractérisations de formes 3D s'orientent davantage vers des descriptions indépendantes du domaine de la topologie 3D. En effet, la topologie peut être diverse à cause des effets de déformations internes ou externes, ou tout simplement en rapport avec la manière avec laquelle l'objet tridimensionnel a été généré. De manière analogue aux images, les descripteurs 3D sont décrits par des caractéristiques locales et des caractéristiques globales.

2.4.2.1. Caractéristiques globales

Les descripteurs globaux ont fait l'objet de nombreuses recherches dans ce domaine. Des exemples existent, dont les plus connus sont les travaux de Fourier ou harmoniques sphériques [Saupe D. et al, 2001] [Kazhdan M. et al, 2003], les moments de forme et les distributions de forme [Osada R. et al, 2002]. Ces méthodes se répartissent en deux catégories : approche surfacique et approche volumique.

La distribution de formes constitue une signature pour un modèle 3D polygonal qui a pour caractéristique de mesurer les propriétés géométriques globales d'un objet. Les modèles tridimensionnels sont transformés en fonction paramétrique afin de construire une distribution continue de probabilité. Cette distribution permet ensuite de rechercher les similarités (Figure 57). Ces différentes approches posent plusieurs problèmes. Le premier est que ces caractéristiques ne peuvent pas servir à comparer des formes partielles ou des modèles segmentés. Dans le domaine de la conservation du patrimoine, les objets sont souvent endommagés et seules des parties de l'objet original persistent. Il est donc difficile de trouver des similitudes avec des modèles de la base de données causant ainsi de fausses classifications. Le second problème est que cette méthode ne fonctionne pas dans le cas d'occlusions. Enfin, de fortes variations au sein d'une classe affectent très fortement la performance de ces descripteurs.

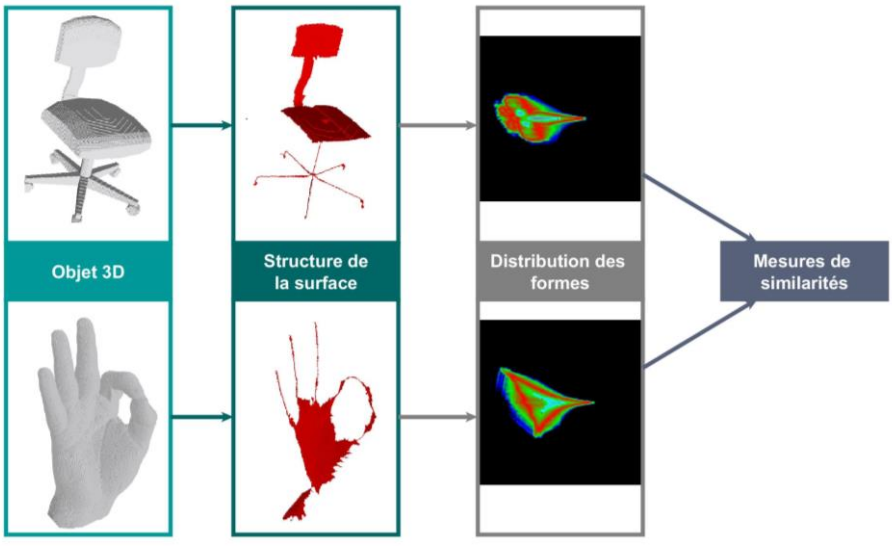


Figure 57 : Distribution de forme et comparaison [Osada R. et al., 2002].

2.4.2.2. Caractéristiques locales

Elles ont la particularité de posséder de nombreux avantages notamment pour compenser les manques rencontrés dans les descripteurs globaux.

Une des caractéristiques locales les plus efficaces en termes de reconnaissance d'objet pour des scènes complexes est l'Image Spin (SI). L'utilisation du mot « image » provient de la représentation 2D de régions et de spin (FR : tisser). Elle s'inspire du traitement de génération d'images qui est semblable à une filature « drap de filage » (EN : sheet spinning) sur les normales. Le descripteur est positionné sur une zone locale cylindrique (appelé patch) et se base sur l'orientation du point, déterminé par sa position et l'orientation de la normale à ce point. Cette normale est calculée par l'ajustement d'un plan moyen passant par ses voisins. Chaque point ou vertex est défini par ses coordonnées cylindriques (coordonnées radiales et coordonnées d'élévation). À l'aide d'un histogramme 2D, les valeurs des paires de coordonnées sont cumulées. Ainsi, une surface est décrite par trois composants : un nuage de points dense, les normales à la surface et une image liée à chaque point qui encode les propriétés globales de la surface dans un système d'orientation lié à l'objet plutôt qu'à la vue (Figure 58).

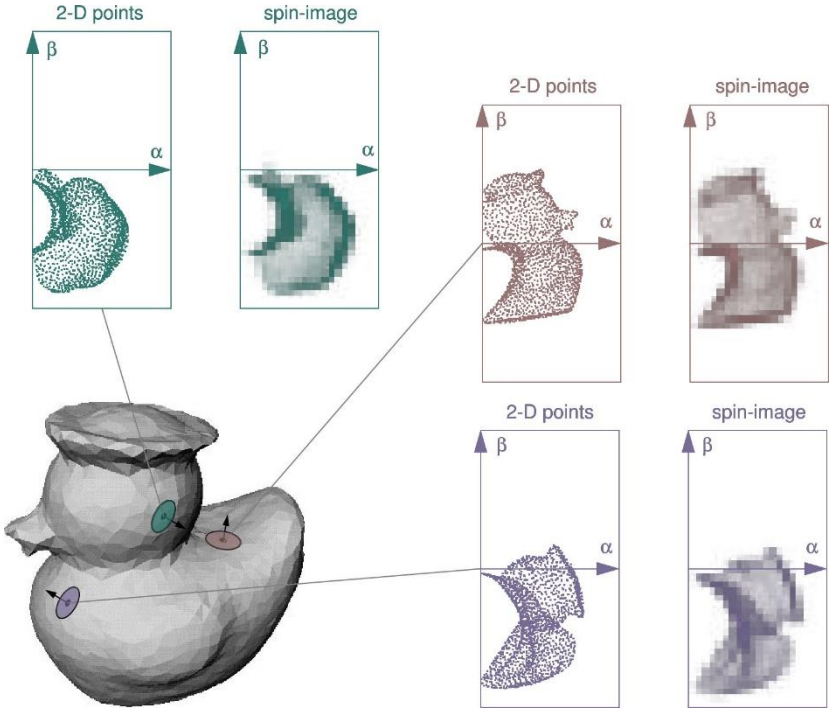


Figure 58 : Composantes de représentation de surface Image Spin.

Les images générées grâce à la technique présentée ci-dessus représentent une description locale de la forme globale. Elles sont ensuite comparées afin de chercher des correspondances entre les points.

Des adaptations de l'algorithme SIFT (dédié initialement pour l'extraction de descripteurs 2D) ont été développées pour des objets 3D.

La solution finale combine la détection de point d'intérêt et l'extraction de descripteurs basée sur la géométrie des voisins proches de ces points. SURF 3D [Knopp J. et al., 2010] construit des espaces d'échelles spatiales homogènes à partir de la version voxélisée du modèle volumique de base. Une mesure, dite de saillance S, est définie pour chaque groupe de la grille cubique. À partir de ces points d'intérêt, le descripteur SURF 3D est défini en calculant, par estimation, l'orientation des points d'intérêt, puis utilise cette orientation pour construire un système de référence tridimensionnel local pour chacun des points.
Les descripteurs 2D et 3D locaux étant très nombreux, une méthode nommée « sac de mots » (ENG : BoW, Bag of Words) permet de les gérer en décrivant, par un histogramme, la fréquence à laquelle chaque élément de vocabulaire apparaît dans le modèle de calcul.

2.4.3. Caractérisation physico-chimique des matériaux

Grâce au croisement entre les données d'acquisition, d'analyse LIBS voire même d'essais, les experts sont en mesure d'extraire des informations sous forme de rapports présentant les résultats et les interprétations (intégrables dans un Système d'Information).

2.4.3.1. Informations extraites d'analyse physico-chimique

Des informations peuvent être extraites en lien avec des études menées sur des échantillons en laboratoire.

2.4.3.1.1. Types d'informations issues d'analyse LIBS

L'analyse LIBS (associée à des techniques de microscopie optique d'observation d'échantillon) fournit un spectre LIBS nous donnant la composition chimique élémentaire de l'entité étudiée. Grâce à ce spectre et aux observations réalisées au niveau de la zone analysée, nous pouvons formuler des hypothèses quant au matériau utilisé pour réaliser les décors peints. Cette composition chimique élémentaire renvoie à un type de matériau particulier connu grâce à l'utilisation de standards normalisés [Bruder R. et al, 2007]. L'ensemble des acquisitions menées in situ font l'objet de compte-rendu (Figure 59) regroupant plusieurs informations telles que :

(1) La localisation des tirs du LIBS réalisés par les experts
(2) La composition chimique élémentaire locale au point associé à une analyse stratigraphique
(3) L'association de l'analyse chimique élémentaire à une nature de matériau voire de plusieurs matériaux grâce à un traitement statistique des données.
(4) L'appréhension de la stratigraphie des couches peintes du fait la succession de tirs au même point d'impact (« creusement du cratère »).

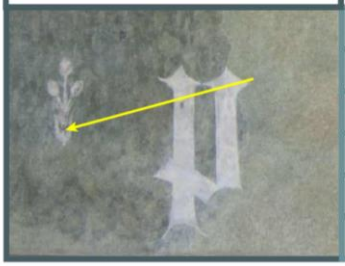
Localisation des tirs	Tirs	Compo. élémentaire	Matériau
	1	Sn, Cu, Pb, Ca, bandes orga, Al (traces)	Etain, couche organique (Bandes)
	2	Sn, Cu, Ca, Pb, bandes orga,	Etain, traces de vert au cuivre blanc Pb (fond)
	3	Sn, Cu, Ca, Pb, Fe (traces)	Etain, vert au cuivre (fond), trace de la préparation ocre
	4	Fe, Al, Sn Cu, Pb, Ca	Etain, vert au cuivre (fond), préparation ocre
	5	Fe, Sn, Al, Ca, Pb	
	6	Fe, Sn (-), Al, Ca, Pb	Préparation ocre, et trace prépa calcium

Figure 59 : Exemple d'un rapport pour une analyse d'échantillon sur 6 tirs avec caractérisations des matériaux (LRMH.données D. Martos-levif et V. Detalle)

Ces informations constituent un premier échelon pour définir et comprendre réellement les phénomènes d'altérations, notamment en déterminant tout d'abord la nature des matériaux originaux et en déduisant ensuite, du fait de la connaissance des experts dans les techniques picturales et des observations faites (cartographies), ce qui est, dans l'analyse, la résultante du phénomène de dégradation.

2.4.3.2. Informations extraites de simulations

Cette partie présente particulièrement le type d'informations, d'hypothèse et d'interprétation qu'il est possible d'extraire à la suite de deux exemples de simulations en laboratoire : la simulation de vieillissement de la pierre et simulation mécanique du bloc de pierre (présentées respectivement dans la section 2.3.5.1. et la section 2.3.5.1.).

2.4.3.2.1. Interprétation des données de la simulation mécanique numérique d'un bloc de pierre

D'après les résultats donnés par le logiciel LMGC90, il est possible d'émettre certaines interprétations de manière précise en rapport avec les zones d'intérêt du matériau, puis d'apporter des explications sur l'apparition du phénomène complexe de desquamation en plaque. Ceci se base également sur les données pétro-physique qui sont présentées par la suite.

Tout d'abord, d'un point de vue local (au niveau du bloc sur 10 cm de profondeur à partir de la surface), nous pouvons réaliser des observations et d'émettre des hypothèses en comparant les deux types de pierre étudiés. La pierre grise de Caromb CG et la pierre jaune de Caromb (CA). La pierre CG est plus poreuse et plus capillaire que CA, ce qui se traduit par un déplacement du front d'eau plus rapide lors des cycles imbibitions/séchages. La conséquence directe est que la pénétration d'eau depuis la surface s'arrête à 2 cm pour la CA et 3 cm pour la CG.

Une représentation des blocs en modèles de calcul permet d'observer les contraintes mécaniques. Seule la contrainte normale verticale est représentée (compression), c'est-à-dire la composante susceptible de conduire à la ruine du matériau. On observe également un état

global de compression et de traction étant donné que le bloc est simulé dans son contexte, dans un appareillage dont la couche extérieure se trouve affectée par les phénomènes hygromécaniques. Des graphiques montrent notamment que les contraintes maximales sont positionnées et sont importantes entre 2 et 3 cm de profondeur (par rapport à la surface) pour chacun des types de blocs, en admettant une valeur de descente de charge connue et maîtrisée pour l'ensemble du bâti (Figure 60). Une faible différence de profondeur d'application de la contrainte, sur les matériaux étudiés, est directement due à leur coefficient de dilatation respectif [Bagnéris M. et al., 2014].

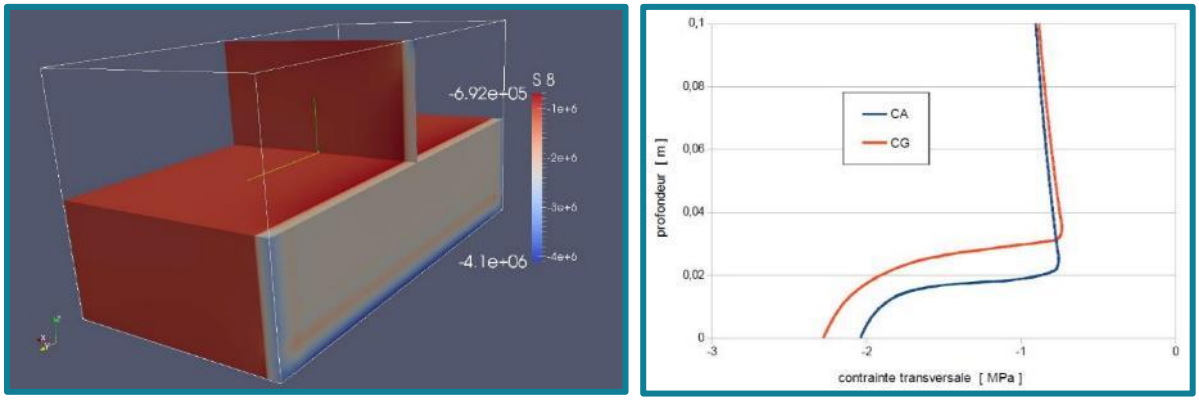


Figure 60 : Modèle numérique calculé à gauche et profile de la contrainte transversale à droite (LMGC.données F. Cherblanc).

Après comparaison des limites à la rupture de chaque pierre, il est possible de constater que la pierre CG est beaucoup moins résistante que CA. Il en résulte donc un facteur de risque de rupture trois fois plus important pour CG par rapport à CA. Un résultat qui se confirme à travers des observations in situ où le phénomène de desquamation en plaque affecte particulièrement les pierres grises.

Ces informations permettent de faire des comparaisons entre les différents matériaux et prévoir comment l'un ou l'autre va réagir à la mécanique du bâtiment et aux contraintes météorologiques. Il faut noter que les résultats sont observés en prenant en compte une section perpendiculaire au plan de surface, au centre de la pierre. Le modèle de calcul montre notamment que les contraintes sont très importantes sur la périphérie proche des joints avec des blocs voisins. Des calculs supplémentaires sont nécessaires pour confirmer ces observations.

Les résultats obtenus sont très utiles pour réaliser des croisements avec d'autres types de simulations.

2.4.3.2.2. Interprétation des essais de vieillissement de la pierre

En fonction des données obtenues lors de processus d'acquisition et d'analyse, les interprétations peuvent être diverses pour un type de pierre étudié. C'est ce qu'il est possible de souligner dans le travail de recherche de [Berthonneau J. et al., 2012]. En effet, ce travail de recherche a porté sur la pierre de Caromb et la compréhension des phénomènes de

desquamation en plaque. Ces études ont montré la présence d'un autre agent de dégradation, les argiles gonflantes, considéré comme étant responsable de l'apparition de cette dégradation caractéristiques. Ce travail est donc à mettre en relation avec les suppositions présentées par la suite, emblématique de la complexité de compréhension des mécanismes d'altérations.

Les expérimentations (Section 2.4.3.) ont conduit les experts à émettre des hypothèses quant à la provenance du gypse dans la pierre et son intervention dans la compréhension du phénomène complexe de desquamation en plaque (Figure 61). La définition du mécanisme de dégradation s'appuie sur des données tirées de [Charola A. E. et al., 2007], puis sur des conclusions d'observations d'échantillons vieillis artificiellement et enfin sur des échantillons de pierre in situ altérés par des contraintes météorologiques et environnementales.

Selon les données tirées de [Janvier-Badosa S. et al., 2015], la desquamation en plaque se déploie dans un environnement de pierre calcaire avec des caractéristiques poreuses importantes. Ce sont des propriétés que la pierre testée, le tuffeau, possède.

Quand la pierre est sujette à ce type de mécanisme, deux phénomènes sont observés : une **fissure** est localisée à 1 centimètre de profondeur dans laquelle le **gypse**, sous forme cristalline, s'accumule. L'observation séparée de ces deux phénomènes est nécessaire. La fissure localisée à cette profondeur est causée par des contraintes mécaniques verticales dues à des dilatations différentielles hydro-thermiques entre la surface et le cœur de la pierre. Cette contrainte est amplifiée par la présence d'argiles gonflantes dans ce type de pierre, qui peut conduire à la formation de micro-fissures parallèle à la surface de la pierre [Benavente D. et al., 2008].

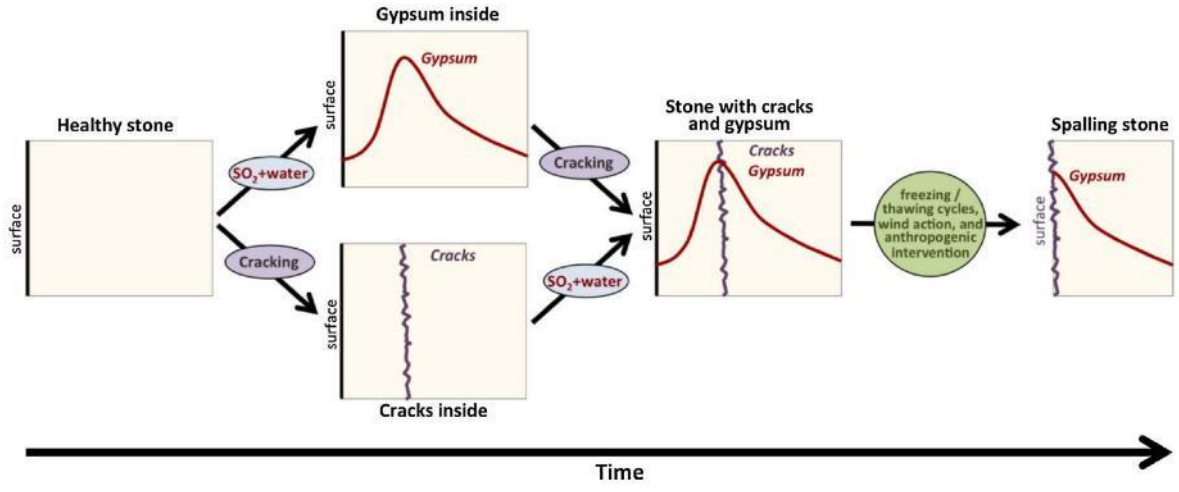


Figure 61 : Description hypothétique du mécanisme expliquant comment une plaque se développe dans la pierre tuffeau sujet à la desquamation en plaque [Janvier-Badosa S. et al., 2015].

Le gypse, présent dans les pluies polluées, s'introduit dans la pierre par un mécanisme de capillarité. Lors de l'analyse de l'échantillon in situ, la quantité de gypse est importante au niveau de la fissure et de la future fissuration (1 cm de profondeur environ) contribuant ainsi

à augmenter la contrainte mécanique locale, favorisée par les phases d'imbibition/séchage causées par la pluie et le vent.

La phase ultime du détachement de la plaque (de pierre) pourrait être causée par des facteurs environnementaux externes (gel/dégel, action du vent et/ou causes anthropiques comme le vandalisme). Ces altérations montrent des figures morphologiques spécifiques que ce soit à un stade initial ou avancé dans le mécanisme de dégradation. Toutefois, une même altération peut, la plupart du temps, présenter une « tendance morphologique » : une information qui peut être quantifiée et qualifiée par une analyse géométrique.

2.4.4. Extraction de descripteurs morphologiques

La morphologie est l'étude des formes. Cette entité identifiée renferme des caractéristiques connues et définit l'identité de l'objet. Ce terme est également utilisé dans le domaine de la conservation et l'informatique notamment dans le champ de la classification et reconnaissance des formes. En se basant sur les différents descripteurs 2D et 3D que nous avons définis dans les parties précédentes, il est possible d'arriver à décrire des morphologies à partir d'une analyse de données géométriques. En effet, nous pouvons classifier et reconnaître des formes similaires selon leurs caractéristiques « morphologiques » en lien avec certains paramètres de bases. Ces caractéristiques, propres à un objet, peuvent être utilisées pour segmenter, découper la forme. Pour donner un exemple, dans la littérature concernant les ouvrages architecturaux maçonnés, il est précisé qu'un bâtiment est composé de plusieurs parties désignées et répondant à des descripteurs de formes spécifiques. « *Une tour* » est caractérisée par exemple comme « une structure en hauteur construite en bois ou en pierre souvent cylindrique » [Pérouse de Montclos J. M., 2004]. Plusieurs particularités sont fournies dans cette expression notamment des informations qualitatives, dites sémantiques, et des informations quantitatives faisant référence à une nature géométrique générale renvoyant vers des instances existantes. La morphologie fait appel à ces deux composantes.
Plusieurs méthodes existent pour décrire et classifier ces formes. Selon [Blaise J. Y., 2003], dans le cas de l'analyse architecturale, les approches par intention (association d'un modèle théorique à un élément réel), sont incompatibles avec les exigences de l'étude complexe du patrimoine construit, alors que des approches par extension (extraction et groupage de descripteurs communs à plusieurs éléments) semblent plus pertinentes. En effet, des composants architecturaux ne sont pas parfaitement construits à l'image des objets définis théoriquement, mais ne sont que des instances répondant plus ou moins aux caractéristiques de ces objets.

En géométrie, les descripteurs des formes peuvent être de plusieurs types. Les plus simples à mettre en œuvre sont les normales et la courbure d'une surface. Les normales sont des propriétés importantes des surfaces et sont utilisées dans de nombreux domaines, comme l'infographie, afin d'appliquer des sources de lumière correctes pour le rendu d'un modèle 3D réaliste. De nombreuses méthodes d'estimation des normales existent. [Klasing K. et al, 2009]

proposent une comparaison de différentes méthodes d'estimation de normales. Une des méthodes les plus simples d'estimation est celle proposée par [Berkmann J. et al, 1994]. Le problème rencontré pour déterminer la normale d'un point d'une surface est approximé par le problème d'estimation d'une normale à un plan tangent à la surface, ce qui se rapporte à une estimation par les moindres carrés d'une surface [Shakarji C., 1998]. Cela nécessite donc d'avoir pu d'abord détecter les points voisins au point considéré pour estimer cette surface [Rusu R.B., 2009]. Avec l'estimation des normales, il est possible par la suite d'avoir une estimation de la courbure.

En effet, l'analyse des normales et des courbures d'un objet peut permettre de faire ressortir des informations importantes sur des objets. Son analyse peut facilement permettre de détecter des surfaces planes ou parallèles puisque de telles surfaces ont toutes la même direction de normales. [Adrian J. et al, 2014] et [Pamart A., et al, 2015] ont, par exemple, conduit la comparaison d'un ensemble de colonnes acquises du cloître de l'abbaye de Saint Michel de Cuxa (à Codalet, situé au sud de la France) à partir de l'analyse de la courbure des colonnes. Le résultat d'analyse constitue l'identité, la signature de l'objet architectural.

La reconstruction 3D, basée sur des procédures photogrammétriques et/ou lasergrammétriques, donne l'opportunité de réaliser des analyses métriques très précises. Puis, grâce à des traités architecturaux, il est possible par analyses morphologiques de transformer des données 3D brutes (nuages de points) en modèle tridimensionnel volumique intelligible voir même paramétrable [Jacquot K. et al., 2015]. Ajouté à ce types de méthodes d'études, d'autres travaux tentent de combiner des analyses radiométriques multi spectrales 2D et 3D afin de détecter des pathologies de façades [Del Pozo S. et al., 2016].

[Nespeca R. et al., 2016] introduit la notion de transformation d'un nuage de points en une base de données enrichie fournissant une utilisation, une gestion et une extraction de données rapide, facile et efficace pour les acteurs impliqués dans le domaine de la conservation. Celles-ci constituent de véritables supports pour les futures étapes d'analyses afin d'interpréter et décrire les caractéristiques morphologiques et l'apparence visuelle de l'ouvrage architectural. L'extraction d'information peut être réalisée grâce à l'utilisation de descripteurs 3D et à travers des calculs spécifiques tels que *RANSAC* (ENG : RANdom SAmple Consensus, FR : Consensus Aléatoire d'Echantillon) qui est un algorithme itératif. Il permet d'obtenir une géométrie cohérente, donne la possibilité de choisir des paramètres de calculs et peut fournir des cartes d'informations apparentes (Figure 62).

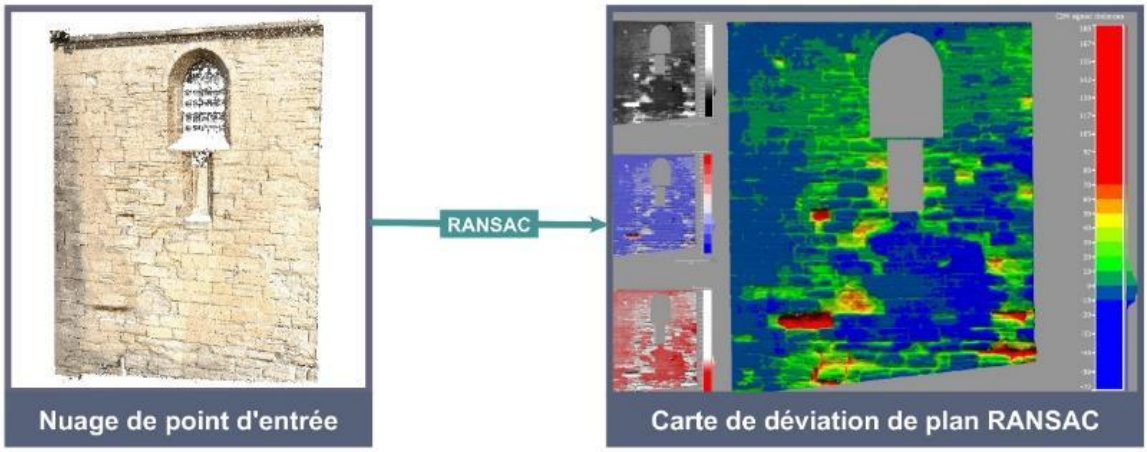


Figure 62 : Analyse RANSAC, apparentée à la perte de matière : Mur Est de l'église Saint Maurice [Nespeca R. et al., 2016].

Ces informations sont d'abord observables, mais peuvent également être quantifiées et documentées donc obtenir des représentations 3D intelligibles en y ajoutant un aspect sémantique.
Les informations générées par ces différentes analyses peuvent être partagées afin d'en générer d'autres. Lorsque celles-ci sont assimilées par une communauté, à travers des observations scientifiques régulières de phénomènes similaires, et qu'une certaine maîtrise est mise en place quant à leur définition, des connaissances et compétences peuvent être générées sous différentes formes.

2.5. Connaissances du domaine: interprétation d'informations

2.5.1. Intégration des connaissances métiers

Le domaine de la conservation fait graviter un nombre important d'experts pour un objectif commun : suivre l'état de l'édifice patrimonial en donnant du sens aux phénomènes complexes d'altérations. La connaissance métier est, par définition, une connaissance définie collectivement mettant en place des compétences et savoir-faire. La collecte et le croisement d'information permettent dans le meilleur des cas de définir des connaissances générales sous forme d'ouvrages présentant des résultats et des interprétations (rapports d'analyses, articles de journal scientifiques, livres, etc.). Afin d'obtenir de tels ouvrages, les experts doivent nécessairement passer par des phases d'observation scientifiques. Ces ouvrages doivent être croisés pour obtenir des savoirs au sujet des phénomènes spécifiques étudiés et en ressortir une stabilité dans la façon de les identifier. Afin que ces phénomènes et leurs mécanismes soient partageables, il est primordial de créer consensuellement des termes pour les reconnaître et pour communiquer. Ces termes font partie de ce que l'on appelle : le ***vocabulaire contrôlé*** du domaine d'étude (section 4.3.1.1.). Il doit rester immuable [Gruber T. R., 1993]. Dans le but de bien comprendre leur signification, chaque terme du domaine doit être défini précisément dans un glossaire par la communauté scientifique. Ces termes peuvent être considérés comme des connaissances explicites. Une connaissance n'est pas l'exactitude de la réalité, mais elle est le résultat d'une mûre réflexion sur un phénomène. Le glossaire est

le support principal utilisé pour exprimer les connaissances d'un domaine. Un glossaire est défini comme étant « un recueil de gloses, c'est-à-dire de termes étrangers ou rares associés à leurs définitions, et centré sur un domaine dont il détaille les termes techniques spécifiques » [Larousse].

Les différents glossaires, présentés par la suite, ont acquis une crédibilité en termes de connaissances de références dans le domaine, via leur construction avec la participation d'une communauté scientifique pluridisciplinaire. Le glossaire est donc le résultat d'un travail consensuel, transcrivant les connaissances partagées d'un domaine d'expertise. Ils constituent une base nécessaire pour créer des ontologies de domaine car permettent un gain de temps en termes de modélisation (section 4.3.1.1.). Certains d'entre eux ne renferment pas seulement une liste de termes définis mais propose également une structuration hiérarchique proche de la taxonomie et du thésaurus. Une taxonomie est définie comme une liste de termes contrôlés organisés de façon hiérarchique. Le thésaurus quant à lui, est constitué de ce même réseau de termes mais qui est enrichi par des relations associatives pré-définies (section 4.3.1.1.1.).

2.5.1.1. ICOMOS : le glossaire illustré des formes d'altérations de la pierre

Ce document a été réalisé afin de lister les différentes formes d'altérations de pierre existantes sur les structures maçonnées. Il est décliné en plusieurs langages montrant l'investissement international et la volonté de formaliser des connaissances dans un ouvrage commun [Verges-Belmin V., 2008].

Ce glossaire est composé de six familles d'altération ou groupe ayant les mêmes caractéristiques générales et comporte chacun de deux à onze termes : les termes généraux, fissure et déformation, détachement, figures induites par une perte de matière, altération chromatique et dépôt, et colonisation biologique (Figure 63).

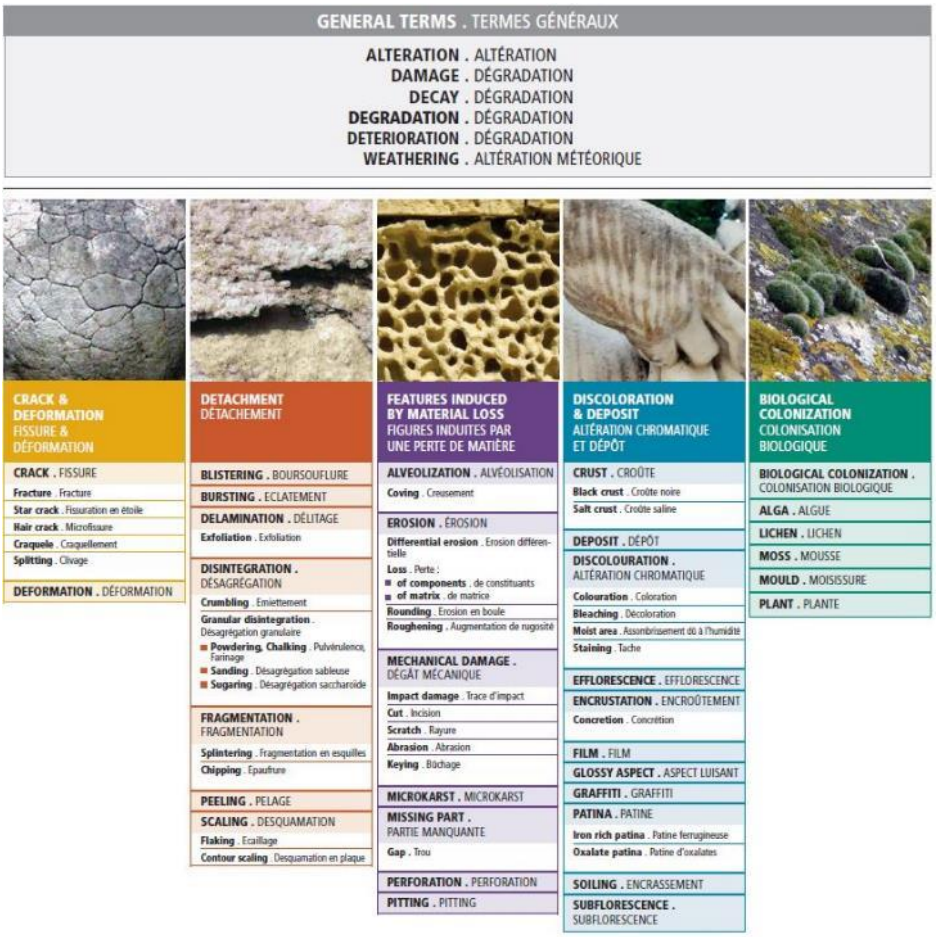


Figure 63 : Structuration des termes en famille du glossaire ICOMOS.

Chaque terme est également accompagné :

- D'images constituant des instances qui les illustrent dans différents contextes.
- De propos illustrant les relations de la forme d'altération avec le substrat (la pierre),
- De termes équivalents existants dans d'autres glossaires,
- D'une liste de sous-termes,
- De termes à ne pas confondre,
- De remarques concernant par exemple des interactions physico-chimiques connues.

Chaque figure d'altération possède une description phénoménologique basée sur une analyse visuelle. Cependant, certaines altérations, comme « Dégât mécanique », qui regroupent « traces d'impact », « rayures », « figures », « abrasion » sont manifestement liées à des causes particulières et évidentes. Une classification de terme a également été définie concernant des altérations superficielles : « Figures induites par une perte de matière ». Ils décrivent des surfaces abîmées, même si le phénomène a été connu comme étant inactif lors de l'observation de la figure.

Par exemple, une surface présentant une forme d' « alvéolisation » peut être active, auquel cas sa surface présentera une « désagrégation granulaire » ou une « desquamation », mais elle peut être aussi inactive, donc elle aura tendance à se noircir (par d'autres phénomènes d'altération), car la pierre ne perd plus de matière à ce stade. Il en va de même pour la forme « érosion » et « colonisation biologique », car une surface qui s'est préalablement érodée

peut ultérieurement être colonisée par des végétaux. Par ailleurs, certaines altérations montrent un état de surface qui résulte de la combinaison simultanée ou successive de plusieurs mécanismes de dégradation [Verges-Belmin V., 2008].

Le glossaire ISCS ne contient que des termes relatifs à la pierre en tant qu'élément d'un mur, ou en tant que sculpture.

2.5.1.2. EWAGLOS : glossaire illustré européen des termes de la conservation pour les peintures murales et surfaces architecturales

Ce glossaire, dédié à la collecte des termes de références dans le domaine de la conservation notamment des peintures murales et surface architecturale, a été édité sous le même principe que l'ICOMOS [Weyer, A., 2015]. La mobilité des spécialistes de la conservation et les appels d'offres au niveau européen augmentent à la même vitesse que l'intérêt du public envers leur patrimoine culturel et en termes de mesures prises pour les préserver. Étant donné une communication encore difficile à cause d'une terminologie non-standardisée en Europe et un manque de dissémination, un glossaire richement illustré a été réalisé par sept pays différents disposant de patrimoine varié. Cet ouvrage inclut au même titre que l'ICOMOS, des photographies et des esquisses accompagnées de textes concis et des illustrations démonstratives désignées spécifiquement pour permettre au lecteur de comprendre le terme qu'il rencontre malgré la barrière des langues. Le nombre de termes (environ 220) est également divisé en différentes familles. Chaque famille a été assignée à un groupe de recherche considéré comme responsable pour fournir l'ensemble des pré-requis afin que le terme soit intégré dans le glossaire. Ceci passe bien évidemment par des observations scientifiques en croisant les différentes ressources produites.

2.5.1.3. Architecture : description et vocabulaires méthodiques

Le glossaire de l'architecture est un ouvrage qui référencie les différents composants architecturaux existant, d'une part, dans les structures modernes et d'autre part, dans les structures de types maçonnerie [Pérouse de Montclos J. M., 2004]. Le domaine de la description est défini comme exact dans certains domaines des sciences notamment les sciences de la nature. Cependant, dans l'archéologie monumentale et en histoire de l'architecture, qui tendent à se confondre avec des valeurs littéraires, la description n'a pas de valeur scientifique. Toutefois par l'intermédiaire de dessin de restitution et de définition, il est possible de réaliser une littérature pertinente afin de donner la possibilité à l'expert de décrire un bâtiment complexe dont les composants, aux dimensions et aux proportions (morphologie) variées, sont représentés dans ce glossaire. Celui-ci a été rédigé en prenant en compte toutes les avancées méthodologiques de la renaissance jusqu'à aujourd'hui.

La définition du vocabulaire présentée ne s'appuie que sur des différenciations morphologiques dépendantes de toute qualification historique. Par exemple, la définition du terme « tour-lanterne » ne fait pas état de fait que ce mot, inventé par un architecte

spécifique, n'est employé que par les spécialistes de l'architecture médiévale. L'étude de l'architecture classique s'en trouve de fait à utiliser des expressions permettant de réduire les ambiguïtés d'un terme particulier. En outre, l'extension de chaque notion peut en effet renvoyer à une fonction. L'identification des formes doit précéder l'interprétation historique. Les styles disponibles dans cet ouvrage ne font que référence à des formes bien spécifiques. De la même manière, sa structure n'a pas préféré l'ordre alphabétique, mais davantage l'ordre méthodologique. Le regroupement des notions, propres aux différentes parties ou aux différents genres de l'architecture, permettent le passage de l'observation scientifique à l'identification et à la désignation. Ces groupes attirent l'attention sur les différentes corrélations existantes dont les connaissances sont la condition d'une mûre analyse.

De plus, une table est conçue pour faire référence à des synonymes, à des termes désuets, aux variantes orthographiques et sémantiques.

Ce glossaire se découpe en trois parties importantes, dont deux sur lesquelles nous nous intéressons davantage : « le vocabulaire commun à tous les édifices » et « le vocabulaire des différentes parties d'un édifice ».

Cette première partie est structurée en plusieurs chapitres, qui fournissent des connaissances générales sur le vocabulaire commun :

- Vocabulaire général
- Les divisions
- Les constructions en pierre et en terre
- Les constructions en bois et en fer

Dans une deuxième partie, appelée « le vocabulaire des différentes parties d'un édifice », nous retrouvons des termes relatifs à la morphologie et à la structure générale du bâti :

- Les fondations et sols,
- Le mur, le garde de corps et la clôture,
- La baie,
- Le support et organe de stabilité,
- Le couvrement,
- La couverture,
- Le décor d'architecture.

[Jacquot K. et al., 2015] a notamment utiliser ces connaissances afin de réaliser de la rétro conception de bâtiments à partir de données 3D d'acquisition.

2.6. Conclusions

Dans ce chapitre, les différents types de ressources, obtenues par les différents acteurs pour l'étude de la conservation, ont été répertoriées. Nous pouvons classifier ces données selon trois composantes fondamentales : l'observation de l'état de surface de l'édifice, la définition de sa géométrie pour en identifier les formes, et enfin l'analyse des matériaux de

construction (Figure 64). Chacune de ces composantes intervient dans le diagnostic patrimonial, et fournit plusieurs niveaux de compréhension : des données, des informations et des connaissances (Figure 65).

En tentant de croiser ces composantes diagnostiques, les observations scientifiques permettent par leurs multiplications d'accéder à des résultats permettant une collecte appropriée d'information sur l'identité d'un phénomène étudié. Mais elles permettent également de définir consensuellement des connaissances formalisées dans des glossaires renfermant des vocabulaires contrôlés. Chaque concept ou terme dans cette formalisation est une connaissance acquise par la communauté scientifique.

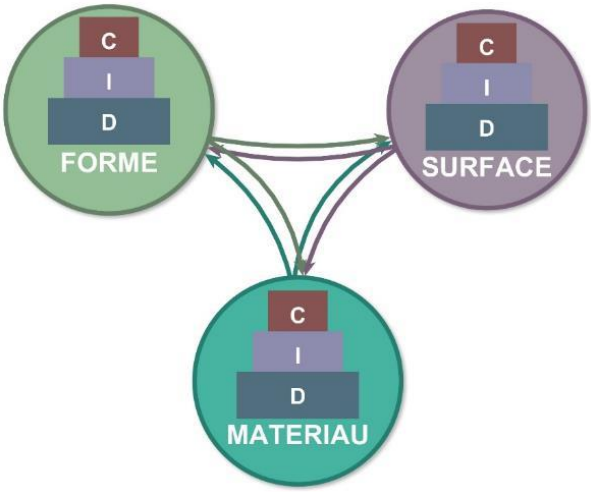


Figure 64 : Croisement des Données-Informations-Connaissances des trois composantes d'étude du domaine de la conservation.

De nos jours, chaque domaine d'expertise peut produire et gérer des connaissances à travers un savoir-faire. Un véritable enjeu est alors de concevoir un système permettant de croiser données (D) - informations (I) - connaissances (C) sur les interactions entre la composition des matériaux, la géométrie de la forme ainsi que l'apparence visuelle de la surface de l'édifice considéré.

Figure 65 : Tableau, bilan des données, informations et connaissances pour l'étude des surfaces, des formes et la physico-chimie du bâti patrimonial.

Chapitre 3. État de l'art : Outils et techniques de gestion de données, informations et connaissances sur la conservation

L'introduction des technologies numériques dans les pratiques de documentation, d'observation, d'analyse et de diffusion des objets patrimoniaux constitue un enjeu majeur qui investit fortement les sphères des sciences de l'information et de la communication (analyse et traitement d'images, modélisation et simulations 3D), des sciences humaines et sociales (renouvellement des méthodologies d'étude, interopérabilité des ressources) et des sciences de l'environnement (par exemple l'intégration des archives numérisées dans les démarches d'étude, de sauvegarde et de valorisation du patrimoine naturel et culturel). C'est pourquoi aujourd'hui il y a un fort besoin de corréler ces données issues de telles technologies en donnant le moyen aux experts de la conservation de rechercher de nouvelles informations en relation avec leurs domaines d'expertise.

Au vu de l'élaboration et de la génération d'une importante quantité de données, un enjeu important est de connaître le moyen de les gérer, voire de les corréler. L'objectif est de de permettre à l'utilisateur final d'obtenir automatiquement des informations utiles pour observer, analyser, comprendre le bâti patrimonial dans sa complexité physique, morphologique et conceptuelle à travers des systèmes de gestions appropriés. Des techniques connues, ont été proposées pour gérer d'une part des données, d'autre part des informations et enfin des connaissances respectivement à l'aide de systèmes de gestion de bases de données, des systèmes d'informations et enfin des systèmes basés sur les connaissances. Ces techniques ont été employées dans différents domaines.

Dans ce chapitre nous étudions les méthodes et techniques actuelles pour gérer ces ensembles notamment pour le stockage des données, la gestion des informations et la représentation des connaissances dans le domaine de la conservation du patrimoine.

Dans un premier temps, nous présentons les grandes familles de systèmes de gestion pour chaque catégorie, et proposons un état de l'art des applications relatives dans le domaine de la conservation du patrimoine bâti. Nous nous intéressons ensuite à la notion d'ontologie qui est une suite logique aux différents systèmes, un champ émergeant dans le domaine du patrimoine que nous présentons à travers des exemples pertinemment choisis. L'ontologie de domaine est la solution vers laquelle nous nous sommes orientés pour développer notre approche. Nous terminons ce chapitre avec une conclusion soulignant les différents concepts manipulés sur lesquelles s'est basée notre orientation scientifique.

3.1. Système de Gestion de Bases de Données (SGBD) pour le patrimoine culturel

3.1.1. Les types de SGBD existants

Aujourd'hui plus que jamais, le succès d'un service expert dépend de sa capacité à acquérir des données précises et en temps voulu, et à gérer efficacement ces données en vue de les analyser afin de guider ses activités. La quantité d'informations qu'il est possible d'extraire grâce à ces données, est littéralement immense. Pourtant, sans cette capacité de gérer ces vastes jeux de données, et pour trouver des informations pertinentes en rapport avec une requête, cela peut tendre à devenir confus, voire être handicapant au lieu de constituer un atout compte tenu de la quantité d'information en forte croissance [Ramakrishnan R. et al., 2000].

Une base de données gère l'entité constituant le plus bas niveau en matière d'expressivité d'information, car elle ne stocke que des données et a nécessairement besoin d'être exploitée par une couche supplémentaire : le système d'information. La base de données est définie comme étant une collection de données interreliées, stockées ensemble, pour servir une ou plusieurs applications en parallèle, et de façon optimale. Elle constitue un ensemble où le processus de stockage est totalement indépendant des programmes d'utilisation. Elle décrit typiquement l'agencement d'une ou plusieurs organisations reliées. Par exemple, la base de données d'un laboratoire peut contenir des **éléments** tels que l'identité des chercheurs, leurs domaines d'expertise puis des **relations**, et des projets dans lesquels ils sont impliqués, voire même les **données** produites par ces personnes.

Un Système de Gestion de Base de Données (ENG : DBMS, Data base Management System) est un ensemble de logiciels conçus pour assister dans des fonctions de maintien et d'utilisation de grande collection de données, et le besoin de tels systèmes, aussi bien que leur utilisation, est en rapide croissance. Les SGBD recouvrent l'ensemble des domaines de l'informatique et sont composés de programmes assurant la structuration, le stockage, la maintenance, les mises à jour et la recherche des données d'une base de données. Afin de permettre à un utilisateur d'accéder aux données facilement, la construction d'une interface est souvent réalisée pour un accès à l'information plus efficace, dédiée pour fournir une orientation sur les différentes formes d'utilisation de la base.

Dans la plupart des cas, la création d'une base de données est initié par la définition d'un cahier des charges spécifiant la méthode de structuration par une approche dédiée et les éléments (données, tables, etc.) à prendre en compte dans la conception et l'utilisation du futur outil de gestion.

Plusieurs types de bases de données existent dans le domaine de l'informatique, dont trois en particulier qui sont en rapport avec notre travail de recherche : les systèmes de gestion de bases de données relationnelles (SGBDR), les bases de données déductives (SGBD noSQL), et les bases de données en graphes (noSQL graphe) [Ramakrishnan R. et al., 2000].

3.1.1.1. Systèmes de bases de données relationnelles (SGBDR)

Les bases de données relationnelles renferment une structure formelle qui est aujourd'hui très utilisée dans le domaine de l'étude du patrimoine. C'est en 1970 que [Codd E. F., 1982] a intégré l'utilisation des modèles relationnels. À cette époque, la plupart des bases de données utilisaient des modèles de données plus anciennes (le modèle hiérarchique et le modèle de réseau). Le modèle relationnel a révolutionné le domaine des bases de données. Aujourd'hui, il est de loin le plus utilisé et constitue la base conduisant la production de système de gestion de base de données (ENG : DataBase Management System (DBMS)).

Une base de données de ce type est constituée d'une ou plusieurs relations qui lient des tables avec des lignes et des colonnes. La représentation simple en table permet même aux utilisateurs novices d'en comprendre le contenu et de réaliser, à travers un langage de haut niveau, de simple requête pour récupérer les données. Les avantages majeurs des modèles relationnels, en lien avec les plus anciens, sont leur représentation simple de données et la facilité avec laquelle des requêtes, mêmes complexes, peuvent être exprimées.

3.1.1.2. Systèmes de base de données orientée graphes (SGBDG)

Les bases de données graphes ont une toute autre représentation par rapport aux bases de données relationnelles. Comme leur nom l'indique, elles sont désignées comme étant une base de données particulièrement dédiée au stockage de structure de données de types graphes. Les données se stockent donc uniquement dans des nœuds ou des arcs [Luyen L. N., et al., 2016] [Ghrab A. et al.2016]. Une base orientée graphe correspond à tout système de stockage fournissant une adjacence entre éléments voisins sans utiliser d'indexation : donc tout voisin d'une entité est accessible via un pointeur physique. Premièrement, ce type de graphe permet un stockage optimisé notamment pour stocker des nœuds et des graphes. Deuxièmement, la lecture de la base est très rapide car on n'a pas recourt à un index pour parcourir les relations, contrairement aux bases de données relationnelles. Troisièmement, le modèle de données est flexible, car il n'y a pas de nécessité de créer explicitement un élément pour les nœuds ou les arêtes. Enfin, il existe des APIs (ENG : Application Programming Interface, FR : Interface de programmation d'Application) intégrant des algorithmes classiques de la théorie des graphes, notamment « le plus court chemin », pour récupérer une donnée concernant une entité (nœuds). Afin d'extraire une donnée dans un graphe, il suffit de suivre les relations et les pointeurs physiques, là où les bases de données relationnelles fournissent des pointeurs logiques. Prenons l'exemple suivant pour illustrer nos propos (Figure 66).

Dans une BDR, pour une requête SQL donnée, « Quelle(s) altération(s) agi(ssen)t sur l'église de Caromb ? », le système parcourt toutes les tables énoncées pour respecter les critères et fournir l'information. Dans ce dernier exemple, il y a trois tables à parcourir, dont la vitesse est optimisée avec les clés primaires et étrangères. Le système en graphe, quant à lui, cherche tout simplement le premier critère qui est « CarombChurch » et parcourt les pointeurs physiques des relations dans le graphe. *Neo4j* [Neo4j, 2016], *inifiniteGraph* [InfiniteGraph,

2016] sont deux exemples de systèmes de gestion de base de données graphes très populaires.

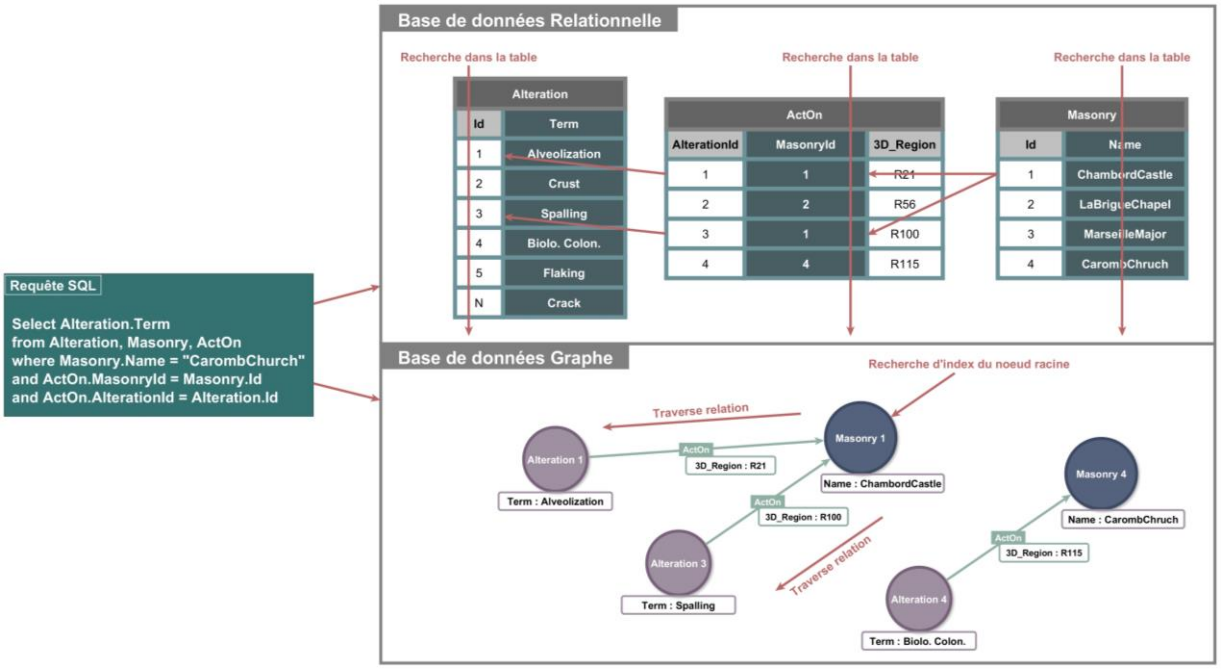


Figure 66 : Différences de représentation et de comportements en réponse à une requête pour des bases de données relationnelles et les bases de données graphe.

3.1.1.3. Systèmes de Bases de Données Déductives

Les SGBD déductives sont des systèmes offrant la possibilité de définir des règles logiques. Ils permettant de déduire ou d'inférer des informations à partir de données connues déjà stockées dans la base. Lorsque ce système est positionné en tant qu'extension des bases de données relationnelles, on obtient ce que l'on appelle des systèmes experts [Minker J., 2014]. Il y a une notion de « contraintes » auxquelles les données doivent se conformer. Ce système est composé d'une base de faits (sous la forme *: famille(Père, Mère, ListeDesEnfants),* de règles et d'un moteur d'inférence. Ce moteur permet de déduire de nouveaux faits à partir de la base de données en interprétant les règles par l'utilisation du langage nommé « DIALOG ». Les problèmes rencontrés sont liés d'une part à l'efficacité lorsque le système doit manipuler de nombreuses règles de déductions et accéder à d'importantes quantités de données, et d'autre part, l'absence de normes concernant autant le langage de description de règles que les modèles de données. Les SGBD déductives constituent une passerelle entre les SGBD relationnelle et les bases de connaissances, mais très vite, le système est abandonné laissant place aux systèmes basés sur les connaissances (SBC) et le web sémantique pour la description de ressources web. C'est à l'apparition de ces derniers systèmes que les bases de connaissances et les bases de données relationnelles coexistent.

3.1.2. Bases de données du patrimoine culturel.

Des bases de données relationnelles existent et sont mises à disposition afin d'extraire des informations concernant notamment le domaine du patrimoine culturel. De nombreux

types de données sont fournis, comme le recensement du patrimoine monumental français sur la diversité liée au patrimoine culturel. Nous pouvons citer notamment la base de données *CASTOR,* accessible via le site internet du Ministère de la Culture et de la Communication [MCC, 2015]. Nous présentons également des exemples de bases de données internationales sur lesquelles les scientifiques se basent, et qui ont été créées exclusivement pour disséminer et gérer les données du patrimoine culturel, pour les chercheurs et même le grand public. De manière générale, ces importantes sources de données ont été conçues dans le cadre de projets institutionnels.

3.1.2.1. Bases de données CASTOR et IMAGE (France)

Deux bases de données permettent l'exploitation des fonds documentaires du Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques (LRMH) : « *Castor* » est une base de données de références bibliographiques pour les documents écrits du laboratoire. Y sont indexés : les rapports d'études du LRMH sur les œuvres d'art ou édifices, des ouvrages scientifiques ou techniques, des livres d'art, des publications dans le domaine de la conservation/restauration, des actes de congrès, de nombreux articles publiés dans les revues, des tirés à part, mémoires, thèses, et bien d'autres encore. La deuxième base est « *Image* » où sont stockées les photographies illustrant les études réalisées par le LRMH et à disposition sous forme numérique : par exemple des illustrations de l'utilisation du LIBS lors d'acquisition in situ (section 2.2.2.1.).

3.1.2.2. Base de données 3D du patrimoine

Plusieurs bases de données proposent de mettre à disposition des ressources 2D et 3D d'objets patrimoniaux. Nous allons présenter, dans cette partie, deux bases de données qui ont été créé dans le cadre de projets internationaux : 3D-COFORM et 3D-ICONS.

Ce sont des projets qui ont été établis pour faire évoluer l'état de l'art dans la numérisation 3D pour rendre la documentation 3D disponible en tant que choix pratique pour les campagnes de documentation numérique, dans le secteur du patrimoine culturel. Ils ont abordé le problème de l'intégration de toutes les étapes impliquées dans de telles campagnes et dans l'utilisation ultérieure d'artefact numérique dans la recherche et la dissémination, visant le grand public et les scientifiques du domaine correspondant [Arnold D., 2009].

Ce qui est intéressant est que ces plateformes organisent les données en fonction de plusieurs critères de recherche, et permet également de les obtenir et les documenter au sein d'autres systèmes d'information. Malgré la présence d'une base de données enrichie, ils proposent d'intégrer, de stocker, de manipuler, et d'exporter des modèles 3D, leurs objets numériques reliés et les métadonnées en utilisant des outils de recherches dédiées (par une description sémantiques, par des analyses de formes, par analyses pigmentaires, etc.).

Ce projet cible à compléter des collections d'objets qui sont accessibles via des plateformes ayant également produit du contenu pour le patrimoine culturel. Les bases de données de tels

projets fournissent généralement une diversité de ressources hétérogènes : modèles 3D, reconstruction, modèles très détaillés, des ressources iconographiques, des livres, et des vidéos. Elles incluent également la possibilité de re-contextualiser un objet appartenant historiquement et structurellement à un monument, dont les objets physiques sont entreposés dans des emplacements différents. La réalisation de larges bases de métadonnées, reliées aux ressources acquises, a été une volonté première pour assurer l'interopérabilité lors de l'échange et le partage de données [Leoni C. et al., 2013]. Les données stockées peuvent également être accessibles par des utilisateurs externes, via des outils performants de navigations et de visualisation, supportés par 3D-COFORM.

La base de données produite n'est pas seulement utilisée pour stocker et mettre à disposition des ressources à l'utilisateur, mais elle fait également l'objet d'une description sémantique à travers l'exploitation de modèles conceptuels de description [Doerr M. et al., 2010].

3.1.3. Conclusion, limites

L'utilisation de bases de données de différents types nous permet en effet de stocker, d'organiser et de structurer formellement les données par le biais de relations entité/associations. Le domaine de création des bases de données, depuis des décennies, visent à augmenter la prédisposition des représentations de l'information, comme à travers la modélisation de bases de données dites relationnelles, déductives, graphes, etc. Cependant, ces travaux contribuant à de nouvelles représentations n'ont pourtant pas diminué la complexité d'intégration de données hétérogènes au sein d'une même base [Pierra G. et al., 2005].

Un élément primordial absent lors de la construction de bases de données et qui est complexe à modéliser, est le contexte d'acquisition. Il nous donne des informations sur le traitement et le stockage des ressources, pouvant en effet fournir plus d'intelligibilité aux données produites et/ou disponibles. De plus, malgré la capacité de stockage des appareils, qui de nos jours ne constitue plus une limite, les données stockées ne permettent pas de faire ressortir des informations pour mener une action quelle qu'elle soit.

La base de données constitue une première base en termes de ressources et de stockage, mais un fort besoin est de créer des interfaces utilisateurs, afin de générer des informations pertinentes via des requêtes dédiées et mises en place par l'intermédiaire de systèmes d'information.

3.2. Systèmes d'informations 3D pour la documentation du patrimoine architectural (SI)

Les bases de données stockent différentes ressources ; il est nécessaire de les interroger de manière pertinente afin de les mettre en avant et de fournir des informations appropriées et adaptées à l'utilisateur expert ou non. Le domaine du relevé et de la représentation architecturale, a tiré profit de l'utilisation de la 3D, notamment dans la documentation

graphique particulièrement concernant le patrimoine culturel. La réalisation de modèle tridimensionnel d'objets du patrimoine architectural dans leur état actuel, comme la reconstruction hypothétique de leur état passé, requiert une méthodologie de qualité capable non seulement de capturer et de reconstruire numériquement des détails géométriques fins et l'apparence de tels objets, mais également d'interpréter leurs morphologies afin de composer des représentations intelligentes. La phase d'acquisition que nous avons développée dans le chapitre 1 constitue évidemment une première base de reconstruction qui semble inévitable pour l'analyse a postériori, mais l'utilisation de ces entités pour faire émerger de l'information est un besoin essentiel. Des bases de données existent renfermant des artefacts 3D (d'édifices architecturaux) de volumes importants et d'une précision certaine, mais ne sont pas exploitées à leur juste valeur pour de l'analyse sémantique. L'utilisation de systèmes d'information peut en effet permettre d'utiliser des entités entreposées dans ces bases de stockages. De nos jours, la donnée 3D, qui est la base de notre travail, est une composante essentielle pour enregistrer et constater de manière permanente la morphologie d'objets et de sites emblématiques, de sorte qu'au moins, dans une forme digitale, ils puissent être transmis à de futures générations. Comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, la modélisation 3D basée sur des objets réels est devenue aujourd'hui une solution efficace pour fournir des représentations tridimensionnelles précises. Ils constituent des bases pour de nouvelles utilisations telles que des productions matérielles de documentation, des politiques de restaurations et de conservation, et même pour réaliser des répliques physiques. Dans cette partie, nous nous intéressons aux différents outils technologiques émergeants. Nous avons des exemples d'outils [Boehler W. et al., 2002] [Debevec P. et al., 1996] qui ont été intégrés dans les méthodes de reconstructions 3D d'artefacts physiques, afin de reproduire la complexité du patrimoine architectural et de supporter les différents besoins d'analyses. Plusieurs méthodes d'acquisitions demandent des protocoles bien précis dépendant directement de l'objectif fixé préalablement, notamment un but de construction de différents systèmes d'informations. Premièrement, plusieurs approches sont enclines à représenter la géométrie de l'ouvrage acquis à travers une représentation 3D de qualité, principalement basées sur des méthodes standards de maillages à partir de nuages de points de scanner laser. Deuxièmement, d'autres approches sont basées sur des descriptions spécifiques à un type d'analyse caractérisée par une stratégie d'acquisition de données et de traitement constituant un but spécifique de représentation. Troisièmement, d'autres techniques se concentrent sur la reproduction de l'apparence visuelle de la surface de l'objet à observer, en prenant en compte les informations photographiques. Et finalement, d'autres travaux de recherche axent leurs efforts sur des représentations simultanées de multiples facteurs à plusieurs échelles d'observations, pour lesquelles différentes procédures techniques d'acquisitions sont utilisées de manière complémentaire.

Par la prise en considération de ces états de fait et l'aspect des données hétérogènes que nous avons largement mis en avant, plusieurs travaux ont tenté de rassembler cette diversité de ressources concernant cet artefact complexe, qui est le patrimoine culturel, au sein de système d'information, incluant des sources documentaires d'analyses, de suivi et de

maintenance du bâti, visualisation d'hypothèses historiques et de dissémination culturelle de l'information. En ce sens, le but à atteindre est d'accéder à un large panel d'information qui ne serait pas essentiellement qualitatif, mais également quantitatif à travers l'extraction d'information des données de relevés. La fusion de ces deux aspects (qualitatif et quantitatif) au sein d'une même plateforme de travail, est depuis longtemps un challenge, mais constitue une solution essentielle pour se rapprocher le plus possible d'une analyse objective et complète du réel dans sa complexité (Figure 67).

Afin de représenter un artefact du patrimoine culturel dans toute sa complexité sous forme de modèle numérique, il est nécessaire de passer par ces thèmes de recherche. Le but étant d'obtenir une entité intelligible en exploitant des techniques émergentes. Le principal objectif ici est d'obtenir suffisamment de données, d'informations et de connaissances manipulables dans un seul et même système, pour permettre l'observation scientifique de l'aspect visuel des surfaces, de la morphologie et de l'aspect physico-chimique de celui-ci.

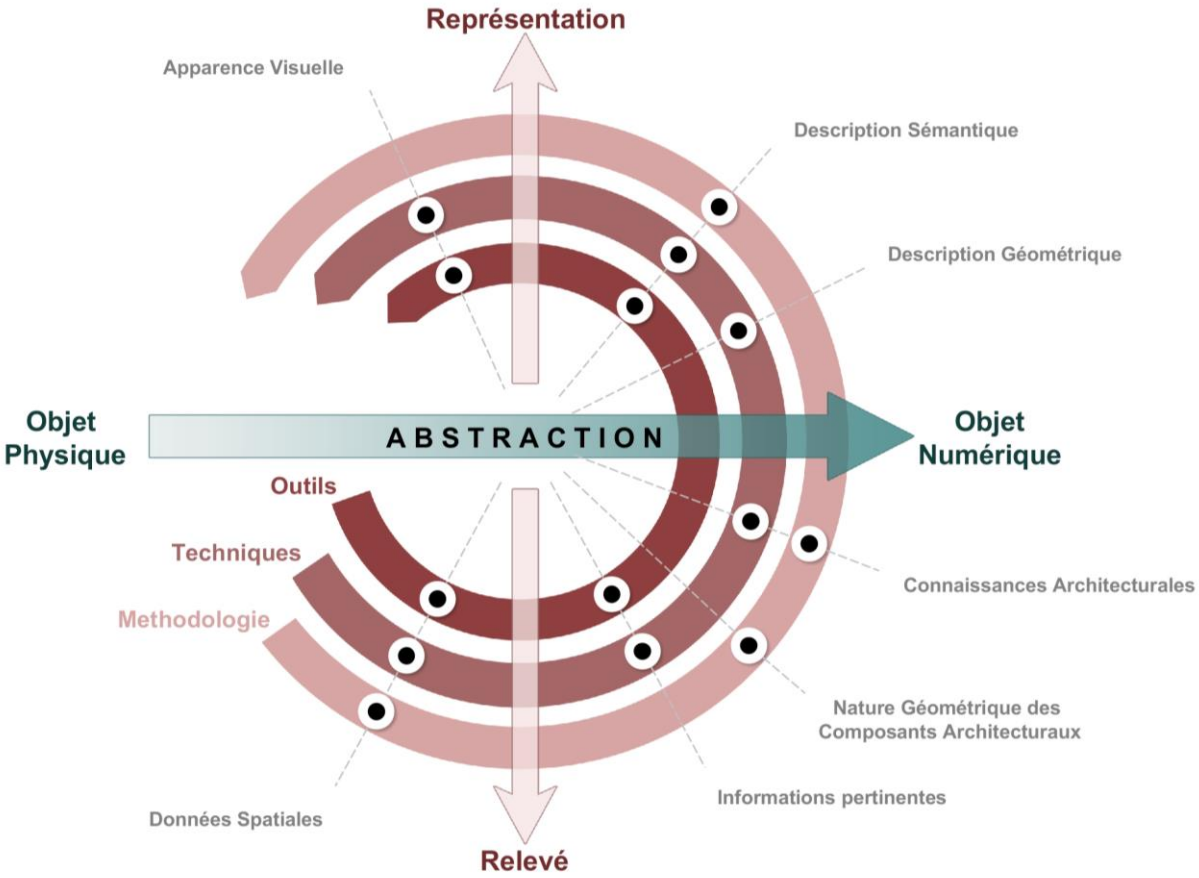


Figure 67 : Diagramme montrant les prises en considération dans le processus de relevé-modélisation-représentation [De Luca L., 2014].

3.2.1. Le projet NUBES

Le projet NUBES, développé au sein du laboratoire MAP, propose un Système d'Information 3D à l'échelle de l'architecture. Ce projet prend en considération les relations qui peuvent être établies entre la représentation du bâti (forme, dimension, état de

conservation, restauration hypothétique) et les informations hétérogènes (documents techniques, historiques, administratifs) provenant de domaines variés. Le but principal de ce projet est de proposer à l'expert la possibilité de visualiser des informations avec plusieurs niveaux d'observations pour l'analyse du bâti patrimonial. Ce projet a abouti à la réalisation d'une plateforme informatique multidomaine dont nous allons présenter les méthodes mises en place [NUBES, 2017].

Cette plateforme propose une application technologique web permettant de supporter plusieurs applications dédiées à différentes analyses. Elle est composée d'une architecture informatique divisée en trois parties.

- Espace de stockage des données hétérogènes : une base de données, développée en MySQL, organise des données brutes provenant de différents types de relevés, de multiples représentations et d'informations associées selon les différents profils utilisateurs.
- Espace de manipulation de représentations géométriques tridimensionnelles en temps réel : une scène interactive 3D en Virtools (logiciel de création d'application 3D temps réel) permet à des représentations 3D d'être téléchargées, visualisées et manipulées.
- Espace de consultation et de gestion de données en ligne : l'application est développée en PHP, un site web qui permet donc le stockage de données dans une base de données accessible par les utilisateurs et qui fournit la possibilité de dialoguer entre la scène 3D et la base de données.

Afin de traiter les représentations géométriques produites, des fonctions spécifiques pour interagir avec les entités ont été développées : outils pour la navigation spatiale, des procédures afin de télécharger des modèles 3D de la base de données, des outils pour la mesure et l'extraction de profils, des procédures pour l'intersection géométrique spatiale d'entités et enfin des outils d'interpolation, d'orientation et de position des prises de vue d'appareil photographique. L'application web est basée sur le dialogue entre la base de données SQL relationnelle et la scène 3D de l'outil. Ceci permet à l'application générale d'être mise à jour à chaque interaction. Plusieurs dispositifs visuels pour l'annotation sémantique de contenu comme les images et les graphes temporels que nous allons présenter, sont développés en .SVG (Scalable Vector Graphics).

3.2.1.1. Description de la nature sémantique d'éléments architecturaux

Ce type d'application est dédié à la description sémantique des composants architecturaux [De Luca L., 2006] [De Luca L., 2014]. Lors du chargement de modèle 3D d'édifices patrimoniaux numériques, la plateforme nous donne la possibilité d'ajouter des attributs pour décrire précisément l'entité (comme des termes disponibles dans un ou plusieurs thésaurus). Ceci afin d'établir dans un second temps des relations hiérarchiques entre les entités représentant les composants architecturaux par exemple [De Luca L. et al., 2007].

À partir de l'importation d'un modèle tridimensionnel, auquel une représentation géométrique basique est associée, l'utilisateur peut interactivement construire un graphe de description en insérant des groupes finalisés ou des marques de références dans la scène 3D. La notion de groupe est liée fortement à l'attribution d'un concept, regroupant une collection d'entités. Dans le graphe, un symbole 3D est créé et est affiché à la position du barycentre de la surface que décrit l'élément (ou la surface englobant toutes les entités sélectionnées). Grâce au lien entre la scène 3D et l'application web, la structure est mise à jour à travers une hiérarchie d'entité représentée par un réseau sémantique. L'utilisation de graphes 3D pour organiser les entités décrivant morphologiquement le bâti est un véritable avantage pour localiser spatialement toutes les informations.

Chaque entité, liée au graphe construit, possède donc trois types d'informations : des informations spatiales (position dans l'espace), des informations sémantiques (termes d'un vocabulaire) et des informations géométriques (extraction de profils et de dimensions).

Des formulaires pour réaliser des requêtes sont disponibles et impliquent une relation mutuelle entre les informations de la base de données et les composants morphologiques. Des graphes hiérarchiques peuvent être générés en 2D. De cette manière un lien privilégié entre la représentation tridimensionnelle et les informations les décrivant, est établi dans un espace de connaissance.

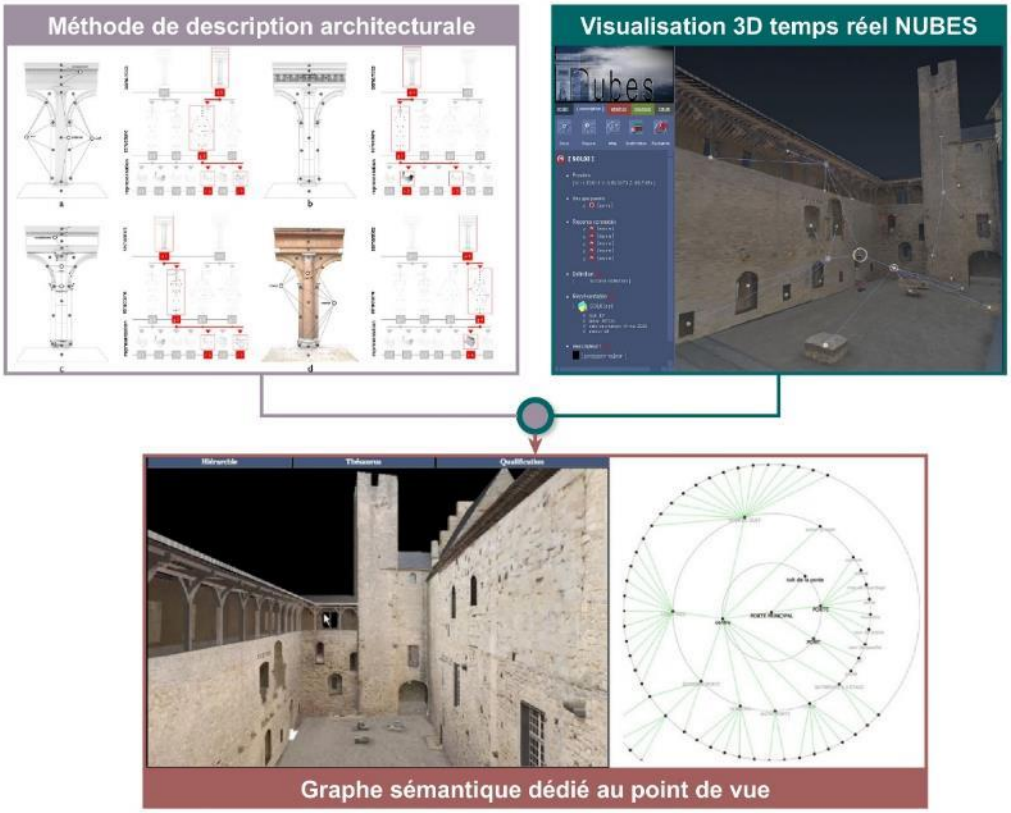


Figure 68 : Méthode de génération de graphe pour la description architecturale d'une vue dédiée.

Une dernière fonctionnalité intéressante dont le principe est utilisé dans notre approche, est la possibilité de réaliser des requêtes par filtrage d'information : par des concepts, et des attributs (spatiales, morphologiques ou même temporels). Des graphes représentant la manière dont les spécialistes ont décrit le bâti selon « leur point de vue » peuvent être construits interactivement en format SVG pour créer un support d'analyse (Figure 68).

3.2.1.2. Annotation sémantique 2D/3D de sources iconographiques

Les images renferment une quantité importante d'information, au niveau des formes, et des couleurs. Elle constitue donc un support de description pertinent pour étudier le patrimoine culturel bâti. Pour accéder à de telles fonctionnalités, l'idée essentielle, dans un premier temps, est de trouver un moyen de référencer spatialement des sources iconographiques autour d'une représentation 3D dans le but d'obtenir cette relation 2D/3D. Afin d'insérer des sources 2D dans le système, trois fonctions principales ont été développées : (1) par orientation manuelle interactive, (2) par sélection de points correspondances 2D/3D respectivement sur l'image puis sur le modèle 3D, et (3) par orientation automatique via l'intégration de paramètres d'orientation internes et externes de l'appareil photographique. Pour tous les cas d'intégration d'images, des méthodes ont été choisies pour réaliser cette relation entre les ressources 2D et le modèle tridimensionnel.

À la suite de cette phase de spatialisation, une fonction essentielle d'annotation d'images orientées est proposée, et utilise une méthode développée par [Busayarat C., 2010]. Grâce à cet outil d'annotation, l'utilisateur peut projeter sur de nouvelles images orientées les annotations qu'il a réalisées, puis extraire des informations concernant la géométrie de l'ouvrage issu des données intégrées dans la base (Figure 69).

Cette application constitue, une première tentative et une solution flexible pour décrire, via un vocabulaire, des éléments architecturaux à travers l'annotation de ressources iconographiques diverses et orientées. Grâce à la relation 2D/3D entre les images et la représentation tridimensionnelle, les experts peuvent extraire et obtenir des informations sur les éléments à travers des requêtes. Celles-ci peuvent, pour un concept particulier (terme : « Pilier ») fournir toutes les ressources iconographiques faisant apparaître cette entité.

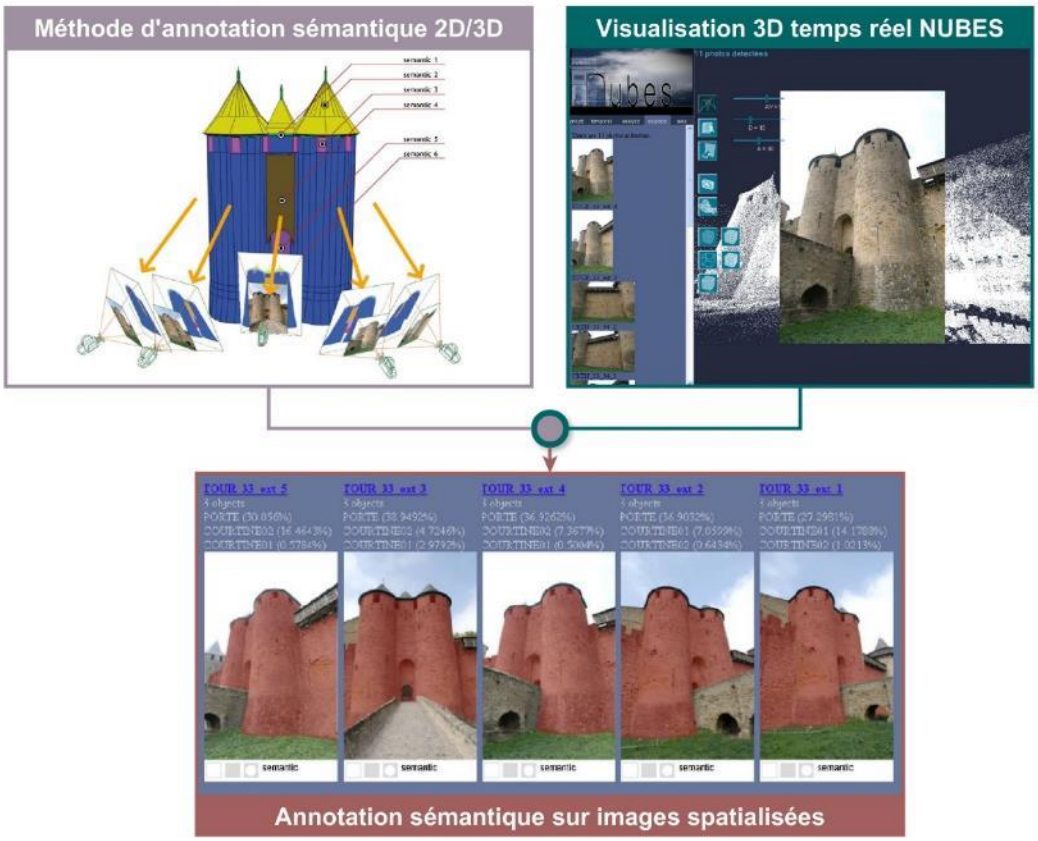


Figure 69 : Méthode d'annotation sémantique 2D/3D avec affichage du calque sémantique superposé aux images où est présent l'élément architectural [Busayarat C., 2010].

3.2.1.3. Modélisation et représentation des transformations spatio-temporelles

Dans le cadre de ce projet, une étude s'est portée particulièrement sur l'aspect du suivi temporel et des changements hypothétiques d'édifices patrimoniaux [Stefani C., 2010]. L'observation de ses évolutions morphologiques dans son cycle de vie est un intérêt. Dans ce cas, la structuration sémantique doit prendre en compte, d'une part, la fragmentation temporelle et d'autre part, être intégrée avec un modèle capable de gérer, stocker et représenter les transformations du bâti. L'ensemble des travaux est basé sur un point de départ relevant de la modélisation conceptuelle : le cycle de vie de l'édifice est caractérisé par une série de transitions (représentant les changements morphologiques et structuraux) et des ensembles d'états (indiquant la période de temps pendant laquelle le bâti n'a subi aucun changement particulier). De plus, la plupart de ces changements concerne l'ensemble du cycle de vie de l'édifice (construction, démolition, reconstruction, union, distribution, etc.), tandis que d'autres changements incombent seulement plusieurs parties de sa morphologie, telle que des variations, des déplacements, des altérations.

Pour cela, une association entre des graphes historiques et une visualisation 3D en temps réel a été mis en place. D'un point de vue graphique, le modèle présenté décrit les changements à travers une succession d'état (rectangles) et de transitions (rectangles lissés) (Figure 70). Le modèle traite six types de transformations : la création, la destruction, l'altération, l'union, la division, la reconstruction, qui peuvent durer plus ou moins longtemps, ou même des

transformations qui peuvent intervenir soudainement. Dans l'ensemble du système, des symboles sont utilisés pour mettre en avant les différents changements appliqués sur le bâti étudié. Le modèle 3D est quant à lui bien adapté pour représenter des objets multiples et des transformations ayant différentes résolutions temporelles et spatiales.

Plusieurs types de requêtes peuvent être mises en place sur le système général (Figure 70) : (1) visualiser des informations concernant les changements, (2) afficher les états temporels, (3) afficher différentes hypothèses, et (4) afficher les incertitudes spatiales.

La modélisation générale est basée sur le référencement spatial des sources iconographiques historiques. Une base constituant l'état de l'édifice actuel, dont nous sommes sûrs, est déjà modélisée grâce à des techniques de relevé laser et photogrammétriques. Afin d'interpréter et restituer les formes, des connaissances concernant les formes architecturales sont nécessaires. En effet, bien que les formes d'architecture classique soient connues et aient été référencées par de nombreux traités d'architecture, la restitution 3D des états manquants, basés sur les études archéologiques, joue un rôle important dans l'interprétation et la déduction de formes architecturales incomplètes. Cette interprétation est généralement basée sur l'analogie avec d'autres sites étudiés.

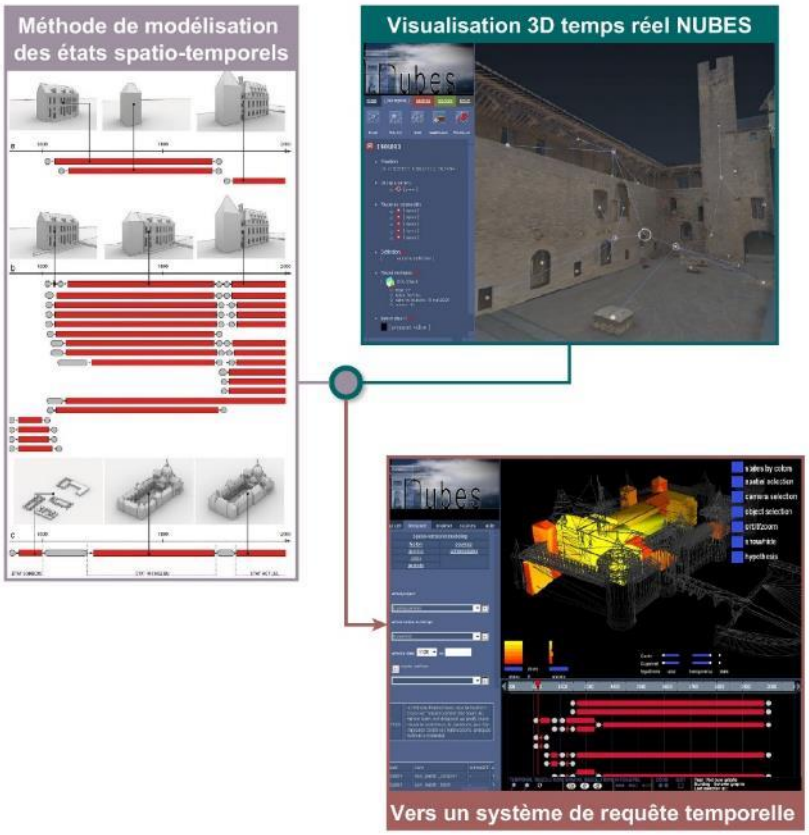


Figure 70 : Méthode et système de visualisation des transformations temporelles d'édifices patrimoniaux [Stefani C., 2010].

Cette approche orientée vers les aspects temporels est essentielle afin de prendre en compte les modifications morphologiques et structurelles rencontrées dans le temps et dans l'espace. C'est une composante que nous souhaitons prendre en compte dans notre approche

notamment sur l'évolution temporelle des formes d'altérations de la pierre responsable de la ruine de certains bâtiments.
À travers la description de ces trois systèmes d'information, nous nous rendons bien compte de l'importance de relier les données relatives à un même édifice. Les données brutes ne nous permettent pas de créer de l'information. Donc à travers des techniques de mises en relation spatiale ou même sémantique, il est possible de créer des entités intelligibles donnant place à l'information.

3.2.2. Systèmes pour la documentation et le suivi d'altérations

3.2.2.1. Spatialisation d'observations et d'analyses pour l'étude de l'état de conservation de peintures murales

Dans le cadre d'un autre projet, toujours en relation avec le développement de la plateforme NUBES, des expérimentations ont été réalisées sur des peintures murales [Vallet, J. M. et al., 2012]. À travers ce projet, l'équipe de recherche a tenté de spatialiser, et d'enrichir une représentation 3D, en exploitant les données et les informations hétérogènes produites lors du processus d'acquisition et d'extraction d'informations. La conservation de peinture murale est complexe à gérer car sa dégradation au cours du temps, tout comme les altérations sur pierre, dépend de plusieurs paramètres comme nous l'avons développé dans le cadre des acquisitions menées sur le patrimoine (chapitre 2). Par exemple, l'interaction physico-chimique d'un matériau d'origine avec des matériaux de remplacement (potentiellement incompatible) mis en place lors de campagne de restauration, peut être un paramètre à prendre en compte.

D'après ce constat, il y a bien un besoin de construire un outil de gestion opérationnel pour le suivi de la conservation, tel qu'une base de données 3D interactive intégrant des sources hétérogènes d'information. Dans ce contexte, les applications hébergées dans la plateforme NUBES ont été exploité pour permettre le suivi des décors peints dont le créateur est Matteo Giovannetti (1355-1356) dans la chapelle Innocent VI de la chartreuse du val des Bénédictins Villeneuve-lès-Avignon (France). Ces murs ont été décrits comme étant très sensibles aux altérations. Ils nécessitent donc un suivi dans le but d'entreprendre des actions de restaurations. Du fait de la complexité géométrique de l'édifice et de son environnement, sa conservation dépend principalement des analyses de toutes les informations qu'il est possible de collecter. La première collecte de données a porté sur les mesures architecturales à travers l'utilisation de scanner laser 3D (section 2.2.1.2.) dont le résultat (nuage de points) a été maillé. De plus, une campagne d'imagerie scientifique, pour la documentation, a été réalisée, et comprend des photographies standards, en fluorescence sous UV, en infrarouge (section 2.2.1.1.2.). Des documents historiques incluant des faits de restaurations et produits utilisés ont été collectés et intégrés. D'autres études ont été menées concernant les résultats d'analyses physico-chimiques des matériaux utilisés pour concevoir les décors. Et enfin, des cartographies d'altérations ont été réalisées, accompagnées de diagnostics d'état de conservation. Chacune d'elle est réalisée sur une orthophotographie générée préalablement

puis projetée sur le modèle 3D en guise de texture afin de les spatialiser, affichable et éditable à la demande. Pour une entité 3D, il est possible d'avoir plusieurs cartographies thématiques.

Toutes les données acquises ont pu être intégrées au sein du système d'information par le biais d'une base de données afin de générer des informations pertinentes sur l'état de conservation des peintures murales. La Figure 71 montre quelques points de vue de la chapelle à travers le système : l'état actuel, les précédentes restaurations, les parties manquantes du mur et les techniques d'exécution de l'auteur.

Grâce à toutes les méthodes précédentes, il est possible d'orienter, dater, annoter et enrichir le modèle tridimensionnel avec des sources documentaires iconographiques, des résultats d'analyses, et des données métriques 3D. La base de données NUBES contient toutes les informations insérées par l'utilisateur, pour qualifier des entités à l'aide de termes sur la description et la représentation géométrique, ainsi que les documents en relation avec la chapelle. Plusieurs exemples de ces blocs d'informations spécifiques sont affichés sous forme de cartes analytiques et cartes de matériau.
La carte des matériaux comprend : les photographies donnant la localisation d'un échantillon, l'aspect de celui-ci accompagné d'une vue de sa coupe stratigraphique, les commentaires concernant les différents problèmes rencontrés lors de cette acquisition physique, puis le contenu de l'échantillon, et enfin sa structure interne.

Cette première tentative nous donne un point de démarrage pour appréhender la construction de notre approche. Malgré l'utilisation d'un modèle 3D précis et un système d'annotation sémantique spatialisé pertinent, ce système, basé principalement sur la 3D, peut être lourd à gérer et ne permet pas de générer et croiser les informations (annotations et données analytiques) pour gérer automatiquement d'autres informations, voire même des connaissances pour les structurer.

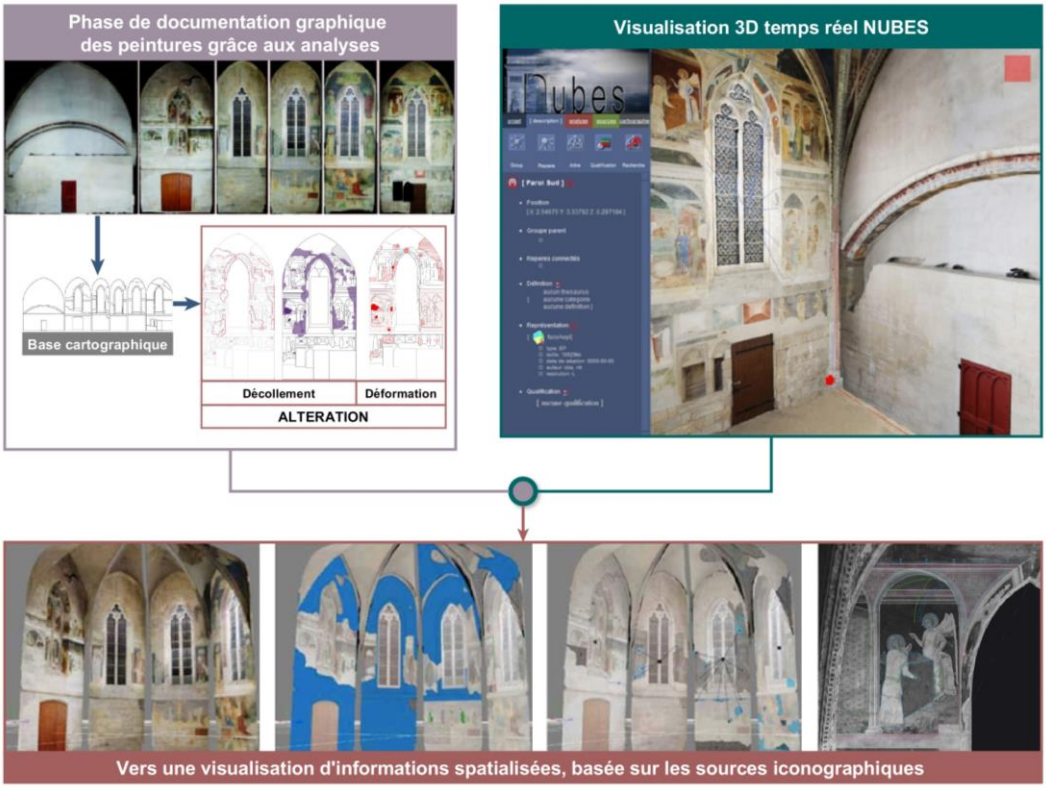


Figure 71 : Cas d'étude utilisant la plateforme pour le suivi de la conservation du patrimoine.

3.2.2.2. Projet SACRE : documentation numérique dédiée à la conservation

Ce projet de description de suivi de la conservation du patrimoine culturel bâti fait partie des dernières expérimentations liées au développement de la plateforme NUBES. De nombreuses investigations appliquées sur le patrimoine, soulignées par la quantité de données et informations hétérogènes acquises par des experts (dont le domaine d'origine est aussi différent), ont permis de se rendre compte du fort besoin d'obtenir un système capable de relier et croiser de manière optimale toutes ces données et informations [Stefani C. et al., 2012] [Stefani C. et al., 2014].

Le cas d'étude de ce projet est le Château de Chambord, un édifice que nous avons déjà présenté dans le chapitre 1 (section 2.2.2.2.). La partie du bâti exploitée pour l'expérimentation, est la Tour du Chaudrons.

Le projet se base sur un ensemble de corpus acquis et intégré au sein de la base de données qui héberge l'application (textes, données 3D, ressources iconographiques, etc.).

Le modèle tridimensionnel généré par des méthodes de reconstruction photogrammétrique (photomodélisation) et lasergrammétrique, utilisé comme support d'observation et d'analyse, est exploité au sein de NUBES. Afin d'identifier l'état de conservation du patrimoine construit, ce système a été implémenté avec des outils disponibles spécialement conçus pour réaliser des cartographies sur pierre et les afficher à la volée sur le modèle 3D construit.

Au même titre que les techniques de cartographies usitées par les experts, la plateforme offre donc à l'utilisateur le moyen de créer une analyse visuelle et spatiale d'entité remarquable comme, des blocs de pierres, des altérations, etc. Ces régions dessinées sont qualifiées, en utilisant un vocabulaire spécifique dédié au domaine de l'architecture. Elles sont ensuite mises en relation pour obtenir davantage d'informations sur leurs interactions au sein du modèle 3D, via les données intégrées. Ces informations sont nécessaires afin d'orienter les futures opérations de restauration.

Lorsque toutes les annotations sont référencées sur le support de description, il est possible de réaliser des requêtes pour générer des informations (Figure 72). En effet, le but de l'interface est de fournir aux experts une nouvelle méthode pour afficher et croiser les annotations sémantiques. Voici les types de requêtes réalisables : (1) distribution spatiale de cartographie à la volée, (2) Analyses statistiques de surface par calques thématiques, et (3) Intersection entre différentes cartographies (en particulier, des corrélations entre dégradation -> matériau ou dégradation -> datation).

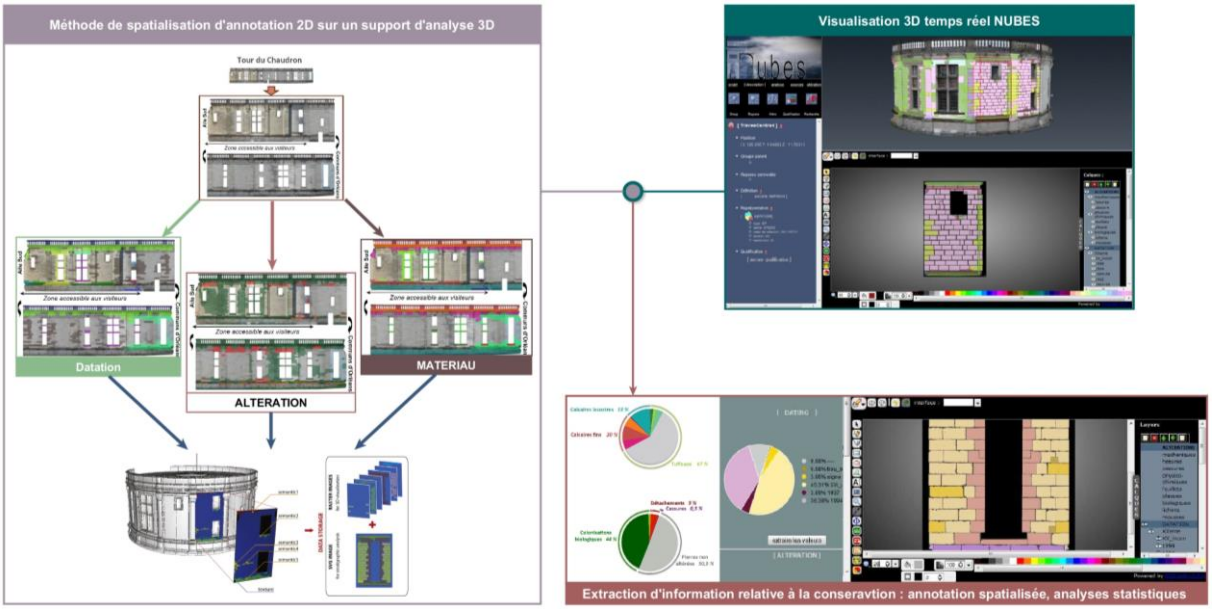


Figure 72 : Méthode d'annotation sémantique au sein du système NUBES et extraction d'informations statistiques et spatiales.

3.2.3. Conclusion, limites

Les différents systèmes présentés dans les paragraphes précédents ont été réalisés dans l'objectif de développer des méthodes, des formalismes, et des outils pour la documentation, l'analyse et la compréhension du patrimoine culturel bâti dans toute sa complexité. Malgré la tentative de prise en considération des ressources permettant de décrire le patrimoine, les systèmes d'informations établis autour des bases de données, munis d'interfaces dédiées, ne permettent pas immédiatement de faire ressortir toutes les informations inhérentes des ressources à disposition. La structuration des informations dans de tels systèmes manque d'un niveau de description basé sur la connaissance des experts qui les manipulent et les partagent au sein de sa communauté. La conservation a pour objectif de maintenir le patrimoine bâti en

état par des interventions tentant de pallier les phénomènes de dégradation. La compréhension de ces phénomènes est un véritable défi pour les scientifiques ; la preuve étant que pour deux altérations morphologiquement différentes, les mécanismes sont parfois similaires. À ce stade, la gestion des données et des informations seules, ne suffisent plus pour documenter et suivre l'état de conservation d'un objet patrimonial. Elles sont isolées et ne sont pas mises en relation dans un cadre de référence connu. Il est donc nécessaire d'être capable de documenter avec précision, d'une part, les systèmes d'interaction qui existent entre les différents acteurs participant à l'observation du bâti, et d'autre part, établir un lien entre ces données et informations en exploitant les connaissances mobilisées pour leurs analyses et leurs interprétations.

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, chaque domaine d'expertise a des connaissances tacites, des savoir-faire et des compétences, qu'il est possible d'acquérir lors d'un processus d'apprentissage. Lorsque celles-ci sont disponibles, des connaissances formelles peuvent être définies par le domaine d'expertise. Ces connaissances sont intégrables dans un système complexe afin d'ajouter une plus-value par l'intégration d'un plus haut niveau de raisonnement. Nous accédons à un niveau supplémentaire dans la pyramide de Données-Information-Connaissances-Sagesse (DIKW pyramid [Liew A., 2013]). Le système d'information est une couche permettant à l'utilisateur de créer des informations (représentées visuellement ou graphiquement) en accédant à des données stockées dans une base de données, lui permettant de faire sa propre conclusion en fonction de ses propres connaissances partagées ou non. Il s'agira donc de réussir à intégrer et représenter les connaissances partagées dans un système d'information afin de décrire la phénoménologie d'altération par des informations basées sur des connaissances partagées.

3.3. Systèmes basés sur les connaissances (SBC)

Depuis plusieurs années, l'ingénierie de la connaissance constitue un domaine actif. Des recherches menées notamment dans le domaine de l'intelligence artificielle où l'utilisation de systèmes basés sur les connaissances est exploitée, émergent autour de la conception. En effet, les connaissances acquises dans un domaine d'expertise peuvent être collectées au sein de système afin de connaître et proposer des solutions face à des problèmes posés. Cela a été le cas lorsque les communautés construisaient des systèmes experts via l'utilisation de Système de Gestion de Base de Données Déductives. Dans le domaine de la conservation, peu de travaux s'orientent vers la définition d'un système permettant de prendre tous les paramètres pris en compte (aspects quantitatifs et qualitatifs).

L'objectif premier, consiste donc à créer des systèmes dont le fonctionnement permet d'une part d'intégrer des connaissances acquises et d'autres parts d'en créer de nouvelles en rendant opérationnelles celles déjà intégrées face à un nouveau problème posé [Luyen L. N., et al., 2016]. Nous pouvons souligner deux étapes pendant ce processus de résolution : poser le problème et obtenir une solution satisfaisante. Premièrement, il faut déterminer la façon de poser le problème : par quels moyens pouvons-nous modéliser l'obstacle ? Deuxièmement,

dans quel cadre théorique doit-on se positionner pour espérer avoir une solution satisfaisante ? Une première tentative a été de modéliser le processus d'acquisition des connaissances par un expert, en se plaçant d'un point de vue psychologique puis d'un point de vue empirique, dans le but de les coder dans ce que l'on appelle un système expert. Malgré l'ambition de la tâche, c'est une méthode qui n'est plus utilisée. De nos jours, le travail s'oriente davantage sur la modélisation conceptuelle du monde. Par exemple à partir d'un texte, d'une interview, d'une description technique, on tente parfois de réaliser des représentations dites qualitatives en formalisant le problème. [Bourigault D. et al., 2004] énonce que le recours au texte ou au corpus comme donnée d'entrée n'est pas la façon de penser unique de l'ingénierie des connaissances. La formulation linguistique a été définie comme étant une description qualitative du monde qui contribue à déterminer en contexte, le contenu de l'information véhiculée. Par conséquent, nous faisons des textes le mode préféré d'accès aux connaissances d'un domaine. En outre, toute recherche menée sur les systèmes basés sur les connaissances se rapporte en grande partie à l'ingénierie des connaissances. Lorsque l'on souhaite créer de tels systèmes, il faut se demander : quelles connaissances sont pertinentes, en vue de les exploiter pour résoudre un problème particulier ? Cela pose la question de la modélisation du raisonnement dans le domaine de l'ingénierie des connaissances et des modalités d'activités dans lesquelles ce modèle est susceptible de s'insérer. C'est ainsi que l'on modélise un modèle conceptuel dédié au système basé sur les connaissances considérées comme étant la représentation abstraite d'un système en termes de domaine intégrant des méthodes de raisonnement liées, recouvrant une réalité concrète, qui diffère notamment de celle admise dans d'autres types de systèmes comme les Systèmes d'Information [Charlet J., 2009].

Malgré le caractère abstrait du modèle conceptuel, tous les acteurs doivent être capables de le comprendre et de se l'approprier car il exploite des connaissances spécifiques en lien avec leur domaine d'expertise.

Les systèmes basés sur les connaissances concernent tous systèmes informatiques utilisant des connaissances explicitement modélisées. Il est possible d'exploiter les systèmes basés sur les connaissances dans un but bien précis, par exemple pour produire des systèmes de raisonnement basés sur des cas d'études, que nous présenterons par la suite.

La conception d'ontologie, dans le domaine de l'ingénierie des connaissances, est apparue et s'est développée dans le cadre de démarches d'acquisition des connaissances pour des SBC. Les ontologies font suite aux modèles structurant des systèmes experts. La tendance ontologique spécifie d'un côté les connaissances d'un domaine modélisées, et de l'autre, des connaissances sur le moyen de réaliser des « raisonnement » sur les données intégrées au sein du modèle de connaissances selon des règles d'utilisation. Ceci semble être une tout autre approche dans le but de gagner en temps de modélisation [Van Heijst G. et al., 1997].

3.3.1. Systèmes de raisonnement basé sur les cas d'études (SRBC)

Les SRBC sont des systèmes spécifiques très similaires au SBC par l'utilisation des connaissances d'un domaine particulier, mais utilisent ce que l'on appelle des « cas » (ou des « faits ») pour instancier et enrichir le modèle. Les SRBC sont donc des dérivés possibles des SBC.

Les systèmes de raisonnement basé sur les cas ou Case-based Reasoning (CBR) sont des systèmes capables [Bergmann R. et al., 2003]:

- d'exploiter d'anciennes solutions intégrées pour prendre en compte des nouvelles demandes ou des nouveaux problèmes
- d'utiliser des cas passés, afin d'expliquer de nouvelles situations pour critiquer de nouvelles solutions, ou tout simplement pour raisonner à partir des réponses précédentes en interprétant de nouvelles situations (comme le feraient les avocats pour défendre leurs clients)
- de créer une solution considérée équitable à un nouveau problème (comme le ferait des managers médiateurs entre deux désaccords).

Ce qui en ressort de ces analyses, est que dans le RBC, un raisonneur se base sur de précédentes situations, semblables au problème actuellement posé, et les utilise pour proposer d'autres solutions.

Si nous regardons la manière dont les gens résolvent les problèmes, nous pouvons dire que ceux-ci tentent de résoudre des problèmes similaires à l'aide des connaissances et des cas qu'ils ont déjà rencontré dans leur vie, leur permettant inévitablement de s'améliorer, dans l'hypothèse où ils apprennent de leurs erreurs et de leurs réussites.

Par exemple, dans le domaine de la médecine, un docteur doit appréhender la justesse des procédures thérapeutiques et doit juger laquelle de celles-ci est plus appropriée en relation avec une pathologie. L'expert à cet instant doit se remémorer des exemples de pathologies utilisant ces protocoles et enfin, réaliser un jugement basé sur sa propre expérience. Les cas problématiques d'utilisation de procédure sont particulièrement utiles ici. Dans le monde des humains le problème est énoncé de manière générale par le patient en spécifiant notamment le type de douleur, sa localisation et le ressenti anormal du fonctionnement de son corps. Les explications peuvent être complètement subjectives, car elles sont dépendantes également de l'expérience du patient. À la suite du recueil de cette personne, et lorsqu'une observation est disponible expliquant pourquoi le problème est présent, l'expert de santé se concentre sur une solution appropriée et fera en sorte que le patient n'éprouve plus de douleur via l'utilisation d'un protocole de soin pertinent [Kolodner J., 2014].

La référence à des situations passées est un avantage certain dans le traitement de situations qui se reproduisent. Car la référence à des situations similaires est souvent nécessaire pour traiter avec la complexité d'une nouvelle situation. En outre, se remémorer un cas à utiliser

dans la résolution d'un problème (en associant le cas avec ce qui est déjà connu) est nécessairement un processus d'apprentissage.

D'une part, la description du problème est souvent incomplète et donc la future étape de compréhension ou d'interprétation du problème est un prérequis pour raisonner. Un raisonneur basé sur des cas ne peut pas se souvenir d'un cas pertinent à moins qu'il ne comprenne la nouvelle situation qui lui est imposée. D'autre part, au vu de la progression sur la résolution des problèmes (ENG : problem solving), un raisonneur peut gagner une meilleure compréhension pour une situation donnée. Ceci permet à des cas plus pertinents d'être exploités. Cela suggère que la compréhension et l'interprétation d'une situation est une part nécessaire, voire essentielle, dans le cycle de raisonnement. Cependant, ce besoin de comprendre le problème ne tient pas spécifiquement au domaine du raisonnement basé sur les cas. Toutes les formes de raisonnement ont besoin d'avoir à leur disposition une situation élaborée avec suffisamment de détails et représentée avec suffisamment de clarté. Cela passe par l'utilisation d'un vocabulaire approprié, afin de permettre au raisonneur correspondant de reconnaitre la connaissance dont il a besoin, pour répondre aux exigences du problème à résoudre.

Il faut également se poser la question sur ce qu'est un cas. En effet, par similarité le système de raisonnement des cas considère que ce qui a déjà été réalisé pour une situation peut également être mis en place pour une situation analogue. Si nous savons intrinsèquement ce qui a fonctionné dans une situation précédente, similaire à la nouvelle, nous pouvons commencer avec ce qui a déjà été proposé comme solution pour en fournir une nouvelle plus adaptée.

Cette approche de raisonnement par les cas est très intéressante en matière de résolution de problème. En effet, la combinaison de ce type de système avec des modèles de représentation de connaissances (ontologie) (section 3.4.1.), dans la mesure où ceux-ci peuvent trouver un domaine favorable, permettrait de proposer une tout autre approche de résolution. Cette nouvelle approche pourrait être propice dans un domaine qui a besoin, d'une part de documenter ses données informatiques, et d'autre part, de permettre au système « d'apprendre » sur des problèmes soulevés par ce domaine d'expertise. Dans les perspectives de notre approche, nous souhaitons tendre vers cette solution, de créer, à partir d'une base de données et une base de connaissances enrichie, un système basé sur les cas pour la compréhension des phénomènes d'altération.

3.4. L'ontologie de domaine

3.4.1. Qu'est-ce qu'une ontologie ?

Dans la littérature, la définition d'ontologie prend un nombre important de sens et ne fait pas l'unanimité en termes de caractérisation et de contenu. Chaque communauté étant susceptible de l'exploiter adopte sa propre interprétation en relation avec les usages et les objectifs.

L'ontologie peut en effet prendre différentes formes et être utilisée dans tous les domaines pour formaliser des connaissances expertes. Le potentiel de cette entité émerge notamment de la technologie du web sémantique qui est de nos jours une entité omniprésente notamment dans le monde du web.

3.4.1.1. Définition

Le terme « ontologie » a été utilisé tout d'abord dans le domaine de la philosophie et est défini comme étant « l'étude de l'être en tant qu'être » [Brague R., 1988]. De manière plus précise, c'est la « Partie de la philosophie qui a pour objet l'étude des propriétés les plus générales de l'être, telles que l'existence, la possibilité, la durée, le devenir » selon le Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales [CNTRL, 2016]. Le terme ontologie est étymologiquement constitué de deux racines grecques : « *ontos* » qui signifie « être, ce qui est, l'existant » et « *logos* » qui désigne « étude, et discours ». Ce terme philosophique renvoie à l'étude des êtres eux-mêmes par ce qu'ils sont et non tels qu'ils nous apparaissent. « *Avant toute science positive et toute physique, s'affirme une métaphysique plus ou moins consciente, une sorte d'ontologie spontanée qui sert de cadre général pour la compréhension des faits* » (Encyclopédie Universelle sur Academic).

Lorsque l'on analyse ces définitions, nous comprenons que c'est une étude de vérités fondamentales concernant un ensemble constituant l'être [CNTRL, 2016]. Cependant, à ce stade de la définition, nous ne pouvons pas nous permettre de comprendre l'intérêt que cela pourrait avoir avec notre travail de recherche de base, notamment concernant ces aspects de partages de données dans un domaine commun en vue de l'enrichissement consensuel des connaissances. L'Ontologie, en tant que discipline, se donne un objectif principal de caractériser les différents modes d'existence des objets, suivant les types d'objets existants ou qui ont existé (naturels, artificiels, esthétiques, etc.).

Par exemple la notion de « *pierre* » (matériau) selon le [CNTRL, 2016] est définie comme étant une « Matière minérale solide plus ou moins dure qu'on rencontre en masses compactes à la surface et à l'intérieur du sol ». Dans la forme de ces définitions, le concept à définir placé entre guillemets est systématiquement mis en relation par rapport à un autre concept définissable que nous avons souligné, renvoyant à d'autres propriétés caractérisant l'objet. Ce mode de définition provient de pratiques plus anciennes grâce au philosophe Porphyre qui a classé l'ensemble des objets du monde en huit catégories abstraites. Cela constitue un premier exemple d'ontologie (Figure 73).

Cette notion a été utilisée par la suite par d'autres domaines tels que l'informatique et les sciences de l'information, où elle est définie comme un ensemble structuré de termes et concepts représentant le sens d'un champ d'informations.

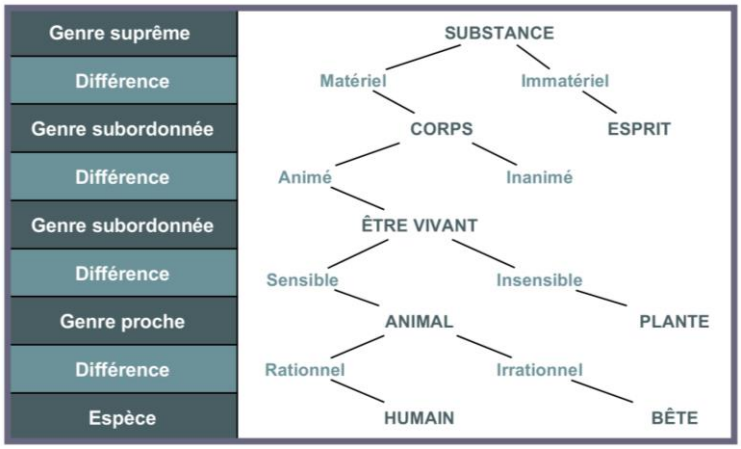


Figure 73 : Arbre de Porphyre.

La nature du concept peut d'ailleurs être représentée dans le triangle sémantique où son expression dépend de trois axes principaux (Figure 74) [Dumez H., 2011].

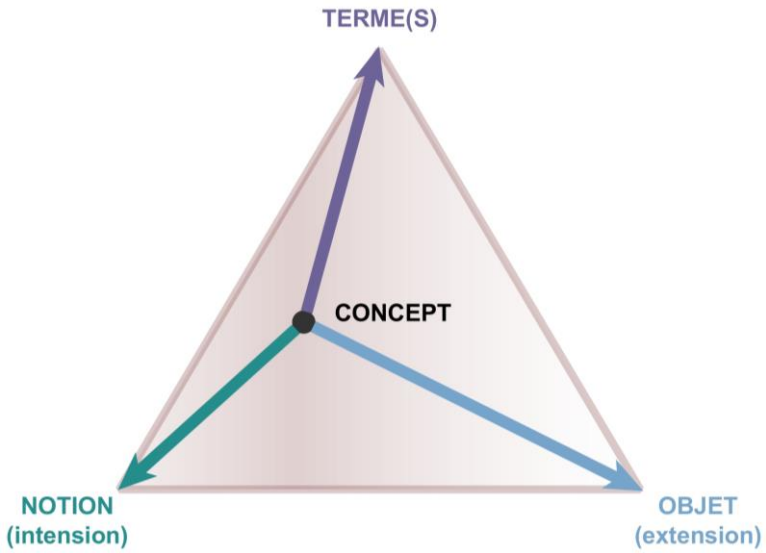


Figure 74 : Le triangle sémantique de la notion de concept.

S'il on prend l'exemple de la « *pierre* », son terme est le nom commun « *pierre* », sa notion est d'être un matériau minéral que l'on peut trouver dans des carrières, et enfin son extension peut être l'ensemble des matériaux utilisés pour construire la structure d'un bâti du patrimoine. Mais cet exemple est particulièrement valable dans le domaine de la conservation. Un concept est donc une entité définissable en relation avec son domaine contextuel d'application. Cette clarification du terme concept permet d'introduire la notion d'ontologie dans le domaine de l'informatique.

Selon Grüber [Gruber T. R., 1993], une ontologie générique ou de domaine est « *une spécification explicite et formelle d'une conceptualisation partagée* ». Il est possible de définir ces différents termes un par un afin de comprendre en détail ce concept complexe dans le domaine de l'informatique. Le terme « *spécification explicite* » fait référence à la présence de concepts, de relations, de contraintes, de règles, de fonctions et d'axiomes du domaine dans

lequel on se trouve, permettant de le décrire le plus précisément et le plus concrètement possible. En outre, cela signifie également que les types de concepts utilisés et les contraintes sur leurs utilisations sont explicitement définis. Cette spécification peut être représentée dans un langage formel ou naturel. Le terme « *formelle* » signifie que l'ontologie est une entité qui doit être compréhensible par l'ordinateur via un langage, dit formel, comme la logique de premier ordre ou à travers un réseau sémantique spécifique. Cette précédente notion est fortement liée à « *la conceptualisation* ». Cette composante concerne la modélisation abstraite et conceptuelle, que l'on veut définir à travers des phénomènes intervenant dans un domaine spécifique. En outre, cette modélisation passe par la structuration de termes et de concepts. Et enfin, « *partagée* », est un des termes principaux qui renvoient aux partages et à l'utilisation des connaissances d'un domaine, qui est la plupart du temps composé de plusieurs sous-domaines d'expertise fournissant des connaissances orientées et spécifiques. La modélisation n'est donc pas propre à un individu, mais est acceptée consensuellement par un groupe ou une communauté scientifique intégrant leurs connaissances.

Une ontologie permet la communication entre les experts du domaine, la communication entre les machines et enfin la conversation entre l'utilisateur et la machine. De manière générale, une ontologie de domaine est caractérisée comme étant une formalisation des connaissances partagées dans un domaine spécifique.

L'ontologie renferme plusieurs langages. Dans un premier temps, un expert représente des connaissances (en RDF par exemple), qui seront, dans un second temps, transformées en un langage de logique de description (DL) pour être compris et interprété par un raisonneur. Ce dernier produit des raisonnements sur les données (instances intégrées dans l'ontologie de domaine).

La notion d'ontologie dite générique et d'ontologie de domaine sont légèrement différentes. L'objectif est le même, mis à part que le « domaine » va borner l'échelle de sa conception. Nous ne nous intéressons qu'au domaine en correspondance : le domaine de la conservation, tandis que l'ontologie générique propose une ouverture beaucoup plus large au monde extérieur.

De par leur étroite ressemblance avec les bases de connaissances, pour les systèmes experts (notamment les SRBC), la volonté de concevoir une ontologie s'est identifiée dans l'idée de construire mieux et plus rapidement. Cette modélisation passe nécessairement par la réutilisation de composants génériques issus des SBC, d'un point de vue des raisonnements via un moteur d'inférence « procédural ». Le but de réaliser des ontologies est à la base de décrire et documenter des artefacts informatiques exploités via des systèmes eux aussi informatiques.

3.4.1.2. Les types d'ontologies existantes

Lors de nos propos précédents, nous avons souligné la possibilité d'obtenir des ontologies différentes en fonction de leur niveau d'expressivité, d'un point de vue de l'extension vers le monde extérieur et également d'un point de vue du langage utilisé pour les modéliser. Le langage peut être : totalement informel (proche du langage naturel), ou semi-formel via l'utilisation d'une sémantique (tout de même compréhensible par l'ordinateur), ou formelle (niveau d'expressivité sémantique supérieur) [Gruber T. R., 1993]. [Hernandez N., 2005] décrit également la présence de deux types d'ontologie sous d'autres aspects de comparaison : l'ontologie légère qui renferme des concepts connectés par des associations générales via une classification multi langages, mais les concepts ne sont pas utilisés ou très peu dans le cadre d'inférence ; puis l'ontologie lourde qui renferme des règles d'inférences, des axiomes pour structurer et raisonner sur les données.

Les ontologies peuvent être classées en quatre typologies selon [Guarino N., 1998] [Guarino N., 1997] [Niang, C. A. T., 2013] en se positionnant sur le niveau d'expressivité de celle-ci :

- **L'ontologie générique** : il s'agit, comme son nom l'indique, d'ontologies qui peuvent être utilisées dans de nombreux domaines de par leur conceptualisation très générique. De manière générale, elle peut résulter de la concaténation de différentes ontologies de domaine existantes. Ce type de modèle spécifie des concepts de très haut niveau. Dans la littérature elles sont appelées « Top-ontologie » et ont l'avantage de constituer une bonne base de réflexion pour leur spécification. Exemple : SUMO, DOLCE, CIDOC-CRM.
- **L'ontologie applicative** : elle contient et représente des connaissances du domaine nécessaires pour une application ; ce qui fait d'elle une ontologie dédiée, spécifique et, dans la plupart des cas, non réutilisable.
- **L'ontologie des représentations** : elle conceptualise les primitives des langages de représentations des connaissances. Elle a l'avantage de contenir des représentations de primitives par l'utilisation de règle, et donc fournit une manière de constituer des axiomes et une structuration de concepts, sous-concepts, propriétés (objet ou donnée) en vue de produire, dans certains cas, des ontologies génériques.
- **L'ontologie de domaine** : elle constitue une ontologie qui modélise les connaissances d'un domaine particulier dont les termes bornés sont spécifiés, provenant la plupart du temps de vocabulaires contrôlés, pour ne pas empiéter sur un autre champ d'expertise. Celle-ci possède l'avantage d'être réutilisé pour des applications conçues dans le cadre d'un domaine bien défini. L'utilisation de top-ontologie constituant le cœur du futur modèle, peut être une bonne option pour modéliser le domaine d'expertise.

Dans notre travail de recherche, nous exploitons les ontologies de domaine pour représenter les connaissances dans le domaine de la conservation des édifices patrimoniaux.

3.4.1.3. Le web sémantique

Tim Berners-Lee est un des fondateurs du World Wide Web Consortium (W3C). Voici sa vision du Web sémantique lors d'un entretien pour l'UNESCO : « J'ai un double rêve pour le Web. D'une part, je le vois devenir un moyen très puissant de coopération entre les êtres humains. Et dans un second temps, j'aimerais que ce soit les ordinateurs qui coopèrent. Les machines deviennent capables d'analyser toutes les données circulant sur le réseau: contenus, liens et transactions entre les personnes et les ordinateurs. Le Web sémantique ira chercher l'information dans diverses bases de données, aussi bien dans des catalogues en ligne que sur des sites météo ou boursiers, et il permettra que toute cette information soit traitée par les ordinateurs. Ce n'est pas possible dans l'état actuel des choses parce que les données en ligne ne sont pas compatibles ni formatées de manière à être directement analysées par des machines. Les pages Web sont uniquement destinées à la lecture humaine. Le Web sémantique répondra aussi aux vœux de tous ceux qui voudraient disposer d'un moteur de recherche solide. Pour l'instant, les moteurs de recherche vous livrent des milliers de pages en réponse à une seule demande. Or, il est impossible d'étudier le contenu de toutes ces pages. Avec le Web sémantique, le moteur de recherche répondra : « Voilà un objet dont je peux mathématiquement garantir qu'il répond au critère souhaité ». En bref, les moteurs de recherche deviendront plus fiables et plus efficaces. Quand mon rêve sera réalisé, le Web sera un univers où la fantaisie de l'être humain et la logique de la machine pourront coexister pour former un mélange idéal et puissant » [Berners-Lee T. et al, 2001].

De manière générale, le web sémantique ne constitue pas quelque chose de nouveau en termes de technologie, mais plutôt une suite logique dans la manipulation des informations dans le monde du web de données. En effet, une quantité immense de ressources circule et il faut trouver le moyen de les décrire en les annotant sémantiquement via des technologies spécifiques. Celles-ci ont été développées dans le cadre de l'émergence du web sémantique. Il constitue une infrastructure, reposant sur une suite d'outils produits et standardisés par le W3C, et dont le but est de donner la possibilité de structurer de l'information de manière efficace en utilisant de la connaissance. Grâce à l'émergence de ces outils, les ressources du web de toute sorte peuvent être décrites et annotées par l'utilisation et l'association d'informations structurées et descriptives sous la forme de métadonnées. Puis, ces annotations, décrivant les ressources, peuvent être interprétées en vue d'en produire une meilleure exploitation [Berners-Lee T. et al, 2001].

Ces technologies ont pris beaucoup d'ampleur grâce à leur rapidité dans la recherche d'information. Ceci est démontré par la création de nouvelles applications regroupant plusieurs domaines informatiques orientés web. Les applications de type réseaux sociaux, blog, forum et même e-learning ont largement profité de ces avancées et trouvé un véritable intérêt pour leur émergence, grâce à la description de contenu proposant des analyses plus poussées en termes de structuration et génération de résultats [Niang C. A. T., 2013]. Par exemple, pour les réseaux sociaux, de nombreux vocabulaires ont été proposés comme *FOAF* (FriendsOfAFriend) qui est un modèle structuré et normalisé permettant de décrire les

personnes, leurs relations et leurs fonctions. Un autre modèle de connaissances *SKOS* (Simple Knowledge Organization System) est très utilisé pour décrire des représentations terminologiques et thématiques telles que les glossaires, les thésaurus, etc.

Conformément à ces exemples, nous comprenons bien l'utilité d'obtenir des moyens pour la description de ressources avec des connaissances. Les entreprises, via la production de système expert et de systèmes d'intégration d'informations, se sont en effet inspirées du web sémantique pour les réaliser : c'est ce que l'on appelle le « web sémantique d'entreprise » dont la volonté principale était de partager, mettre à disposition, gérer et diffuser les connaissances internes (ENG : Knowledge management).

Le web sémantique est composé de plusieurs couches (Figure 75) constituées de plusieurs langages que nous expliquons plus en détail dans la section 3.4.4., et dont la plupart sont exploités pour les ontologies.
Le web sémantique, qui ne souhaitait que structurer et décrire des données, a exploité les ontologies pour exploiter les avantages de la structuration de donnés par les connaissances. L'ontologie constitue donc la base de la représentation formelle des connaissances du web sémantique.

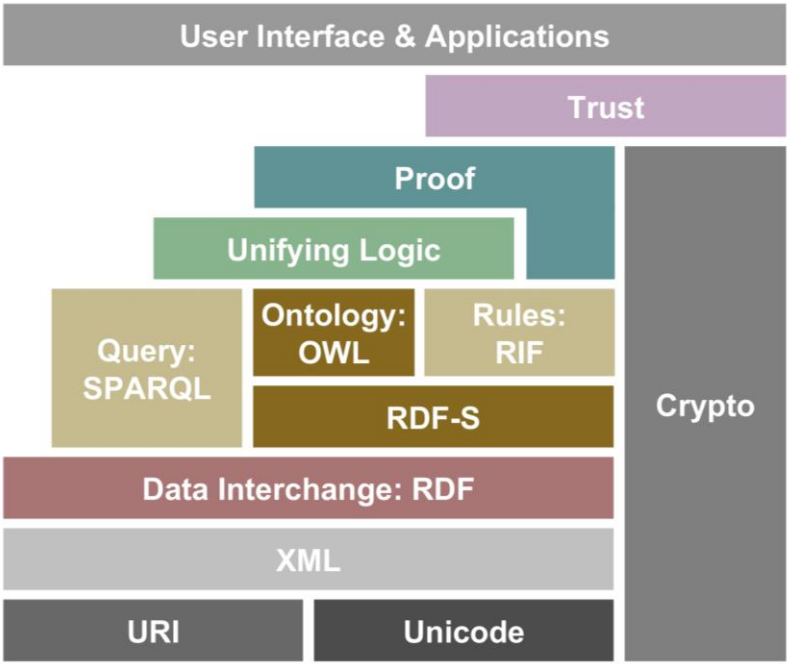


Figure 75 : Les différentes couches du web sémantique.

3.4.2. Les différents niveaux d'abstraction conceptuelle d'une ontologie

De manière semi-informelle, une ontologie se définit comme un quintuplé : $\boldsymbol{O = \{C, R, H^c, Z, I\}}$ selon [Staab S. et al., 2013]

- ***C***, est spécifiquement l'ensemble des concepts qui définissent des triplets (c, A^c, V^c), respectivement le terme littéral, les attributs décrivant le concept, et le domaine de valeur.

- ***R***, correspond à l'ensemble des relations le décrivant : ***R*** (C_1 , C_2).
- H^c identifie la hiérarchie (taxonomie) de concept, qui est défini par un ensemble de concept relié par des relations dites de « subsumption »: $H^C \subseteq C \times C$, $H^c (C_1, C_2)$ et ici C_1 est un sous concept de C_2, donc C_2 est subsumé par C_1. Donc si un concept subsume un autre concept alors par héritage, il obtient également le domaine (V^c) et les attributs (A^c) du concept qu'il subsume.
- ***Z*** est l'ensemble des axiomes (des vérités admises indémontrables) de l'ontologie, qui sont interprétés concrètement par des contraintes et des restrictions entre deux concepts, qui sont des spécifications des relations (**R**).
- ***I*** est l'ensemble des instances ou individus de l'ontologie ***O***.

La Figure 76 présente l'échantillon d'une ontologie dans un domaine de connaissance qui est la conservation.

À gauche les concepts sont de couleurs jaunes, (relié à chaque concept s'il y en a) puis, les attributs en vert définissent les propriétés des concepts (entier, date, etc.) en vert. À droite, le modèle a été instancié remplaçant les concepts (jaune) par des instances de concept (violet), accompagnées des informations renseignées ou non au niveau de leurs attributs. Les flèches bleues sont des relations définies entre les concepts selon les connaissances intégrées.

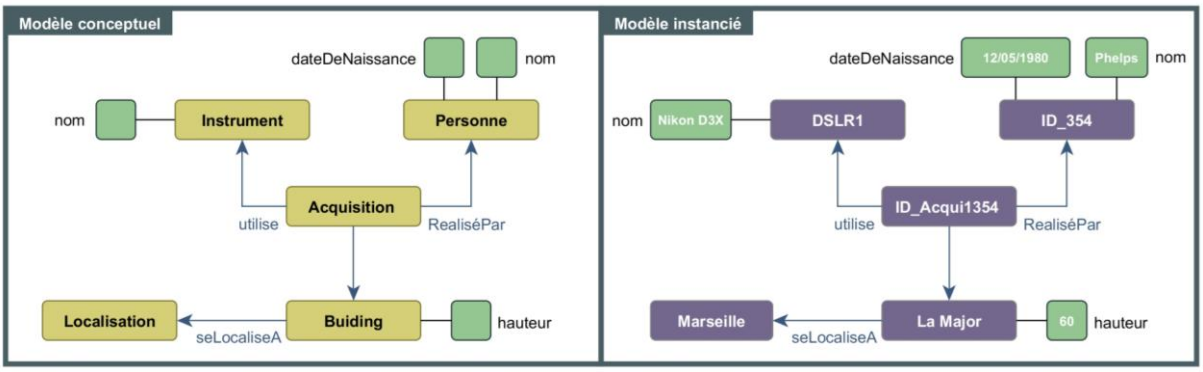


Figure 76 : Échantillon d'ontologie de domaine.

3.4.3. Langages pour la représentation des connaissances

Les ontologies issues du web sémantique se construisent de différentes façons en utilisant différents langages et différents niveaux de conceptualisation. Comme nous pouvons l'observer sur la Figure 75, présentant les différentes couches du web sémantique, la racine (première et deuxième couche) de cette structuration se compose de trois éléments : *URI*, *Unicode* et *XML*.

Tout d'abord l'URI (Uniform Resource Identifier) permet de considérer l'élément décrit comme unique : c'est en quelque sorte un identifiant (universel) décrivant une unique ressource dans le réseau. Cette entité doit être écrite et syntaxée selon des normes standards du W3C [W3C, 2016]. L'IRI (International Resources Identifier), un dérivé d'URI, sensiblement similaire, est tout simplement une version internationale de description de ressources. C'est-

à-dire que plusieurs langues peuvent être utilisées pour décrire la même chose cependant l'identifiant de base ne change pas. L'URI constitue ainsi une forme d'identifiant sous la forme :

http://example.org/URI/absolu/avec/chemin/absolu/vers/une/ressource

L'URI se spécialise sous deux autres formes : URL (Uniform Resource Location) que le grand public connait sous le nom de « lien internet » et URN (Uniform Resource Names). L'URL a les mêmes caractéristiques que l'URI, car ils décrivent et identifient aussi les ressources, mais l'URL possède aussi la particularité de localiser cette ressource par un système d'adressage informant son accès, par exemple :

http://www.culture.gouv.fr/culture/inventai/patrimoine/

L'URN, quant à lui, est un identifiant qui est utilisé en général pour donner un nom à une ressource, fournie par des systèmes de gestion extérieurs [W3C, 2016], mais mis à disposition. Par exemple, dans le domaine des finances, l'IBAN (International Bank Account Number) d'un client dans une banque est une donnée disponible et est représenté sous la forme :

urn:iban:BE43068999999501

Le troisième élément de base (deuxième couche) du web sémantique, c'est XML. XML (eXtensible Markup Language) est un langage utilisé usuellement, depuis très longtemps, pour décrire des documents et des données. Il est fortement recommandé par le W3C [W3C, 2016], car il permet de produire, entre autres, ce que l'on appelle des métadonnées. Ce langage propose au même titre que d'autres, comme HTML, un jeu de balises spécifiques permettant de structurer un document ou des données. Il définit notamment des espaces de nommages qui peuvent avoir un vocabulaire, mais qui n'incluent malheureusement pas de dimension sémantique. Cependant, il constitue une syntaxe de base pour réaliser des langages d'un niveau sémantique supérieur : le langage RDF.

Présentons donc la troisième couche, RDF (Resource Description Framework). C'est également un langage basé sur XML, dont les capacités sont de décrire des ressources grâce à des triplets de la forme : « **Sujet** (URI) – **Prédicat** (URI) -> **Objet** (URI) » par exemple « Hansel pratique de la natation » (exemple1) et « Jimmy a construit une église » (Exemple 2):

<http://foaf/ressource/#Hansel> <http://relation/#pratique>
<http://sport/aquatique/#Natation>

Ou

<http://foaf/ ressource /#Jimmy> <http://relation/#aConstruit>
<http://conservation/bati/#Église>

Tout ce qu'il est possible de décrire, nous pouvons le faire avec RDF : une page web, une personne, un document, un lieu, un bâtiment. Le **sujet** est la source à décrire, et dans notre exemple ici Hansel ou Jimmy ; le **prédicat** relie la ressource à l'objet, et peut être exprimé sous

forme d'URI ou URL ; l'**objet** est tout simplement un URI, ou une donnée (texte, date, entier par exemple). En RDF ces ressources peuvent également être représentées en graphe (Figure 77) :

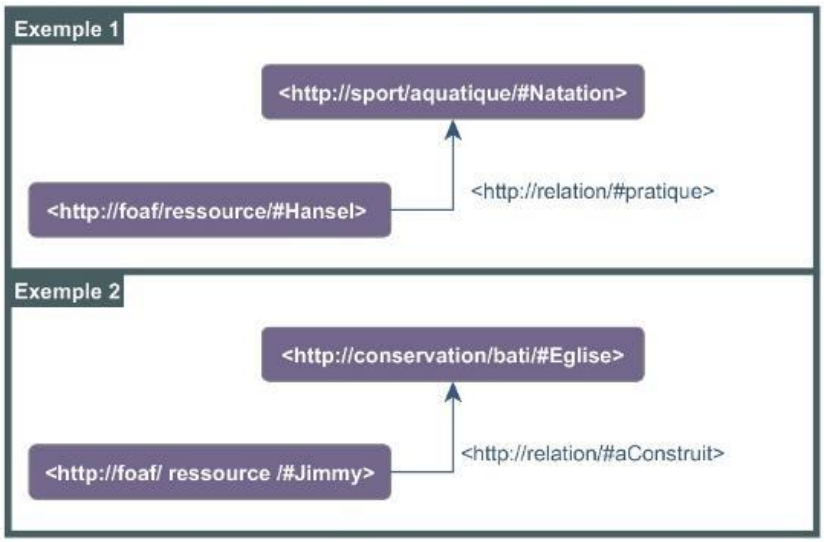


Figure 77 : Exemple de représentation en graphe, RDF.

Ce qui est intéressant grâce à ce langage, c'est que cette représentation logique procure à RDF une sémantique formelle permettant de réaliser des raisonnements. Dans ce même contexte, il existe deux types de mondes dans la représentation conceptuelle : le monde ouvert et le monde clos. En logique, les triplets tels qu'ils sont déclarés sont des faits affirmés. Toutefois la non-déclaration de triplets ne veut pas dire qu'ils n'existent pas, à part si leur (non-) existence a été explicitement représentée : c'est le principe du monde ouvert. À l'inverse, et c'est le cas des bases de données, le monde clos stipule que tout ce qui est vrai doit être connu et démontrable dans un temps fini, représentant le reste comme étant faux. Donc dans notre exemple, nous spécifions qu'« Église » a été construite par la ressource « Jimmy », mais ne veut pas dire que c'est la seule ressource (constructeur). Nous pouvons également utiliser une syntaxe standard pour sérialiser le graphe RDF, recommandé par le W3C : RDF/XML [W3C, 2016] (Figure 78).

```
<?xml version = "1.0" ?>
  <rdf:RDF xmlns:rdf="http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#">
    <rdf:Description rdf:about="http://foaf/ressource/#Hansel">
      <http://relation/#pratique><http://sport/aquatique/#Natation></http://relation/#pratique>
    </rdf:Description>
  </rdf:RDF>
```

```
<?xml version = "1.0" ?>
  <rdf:RDF xmlns:rdf="http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#">
    <rdf:Description rdf:about="http://foaf/ ressource /#Jimmy">
      <http://relation/#aConstruit><http://conservation/bati/#Eglise></http://relation/#aConstruit>
    </rdf:Description>
  </rdf:RDF>
```

Figure 78 : Sérialisation de graphe RDF par RDF/XML de l'exemple 1 (en haut) et l'exemple 2 (en bas).

Les graphes ainsi représentés peuvent être interrogés en utilisant un langage également recommandé par le W3C [W3C, 2016] : le SPARQL (Simple Protocol And RDF Query Language). Très analogue à la syntaxe de SQL (Structure Query Language), c'est grâce à celui-ci que nous pouvons réaliser des inférences sur les données intégrées et décrites par RDF. Un des principaux avantages de SPARQL est le fait qu'il se base sur les concepts, des propriétés (objet ou données), et de manière générale sur les métadonnées des ressources pour réaliser ses requêtes. Malgré la complexité des schémas relationnels des bases de données, nous pouvons interroger les ressources sans pour autant connaître leurs structures, ce qui permet un accès aux données sans intermédiaire et en faisant des inférences sur une base de règles.

Les règles (Rules) peuvent être écrites en deux langages différents : SWRL et RIF. Ceux-ci ont pour objectif de normaliser la représentation des bases de règles pour RDF. SWRL (Semantic Web Rules Language) est une extension d'OWL normalisant les représentations des règles au format RDF. Quant à RIF (Rule Interchange Format) il repose davantage sur le langage XML et permet une plus grande flexibilité en termes d'échange et d'utilisation entre les différents formats existants [W3C, 2016].
Les différents langages énoncés ci-dessus permettent de construire un réseau de données via leurs descriptions. Mais le web sémantique a l'ambition également de faire évoluer le web classique en utilisant des connaissances. Les données structurées et reliées sont donc associées à des connaissances qui, par leur expressivité, peuvent être lisibles et compréhensives. Ceci se fait via l'utilisation de logiciel ayant la capacité de réaliser des raisonnements pour le partage, la recherche d'informations ou bien même de l'automatisation de certaines tâches. C'est ce qui nous amène à la présentation des couches supérieures d'utilisation de langage utilisé pour réaliser des ontologies.

Les ontologies renferment la possibilité de représenter des connaissances et sont munis d'une logique de description par l'intermédiaire de moteurs d'inférences. Elles ont permis au web sémantique de se développer. Mais par échange de bons procédés, le web sémantique a permis à l'ontologie de récupérer des langages formels standards. C'est le cas du standard RDFS.

RDFS (Resource Description Framework Schema) est une extension du RDF. Il fournit un vocabulaire de modélisation de données RDF et des mécanismes pour la description de groupe de ressources reliées, puis les relations entre ces ressources. Il est écrit en RDF en utilisant des termes spécifiques de plus haut niveau dans la formalisation des connaissances. Ces termes sont utilisés pour déterminer les caractéristiques des ressources telles que le domaine (Domain) et la portée (Range) d'une propriété. Les classes RDFS et les propriétés sont similaires aux types de langages de programmation orientés objet comme le Java. Il peut par exemple admettre que la propriété « **#aConstruit** » a un domaine « **#Personne** » et une portée « **#Bati** ». Un des bénéfices de l'approche centrée sur les propriétés tient au fait que n'importe qui peut étendre la description d'une ressource existante, c'est une des principales architectures du web. De plus, les ressources peuvent être divisées en groupe appelé classe. Les membres d'une classe sont appelés « *instances* » ou « *individus* ». Les classes peuvent être

elles-mêmes des ressources pouvant être sollicité par d'autres modèles RDFS, et sont souvent identifiées comme des IRIs. Ces dernières peuvent être décrites en utilisant les propriétés RDF. C'est avec l'utilisation du RDFS que l'on peut réaliser des sous-classes. Ces dernières constituent une des règles d'inférences de base. Elle stipule que toute instance d'une sous-classe (classe enfant) est également une instance de la classe qui la subsume (classe mère). Par le même principe, toutes les propriétés inhérentes à la classe mère sont transmises, par héritage, à la classe fille. Par exemple, l'instance « #*Jimmy* » est un type de « *Ressource* » et aussi une instance de type « #P*ersonne* » par conséquent, il est possible de renseigner les valeurs de propriétés pour *« Personne* » pour la relation « ***#aConstruit*** » : « ***#Église*** ».
À ce stade, il est possible de ne représenter que des ontologies légères, mais muni d'un haut niveau de flexibilité. Cette représentation fournit un niveau de logique satisfaisant, mais un autre modèle de conceptualisation des connaissances fournit des possibilités de logique de description (DL) plus élaborées. OWL (Ontology Web Language) est un langage qui propose un degré de logique supérieur proche des logiques de descriptions.
C'est un langage pour représenter les choses (Thing), les groupes de choses et les relations qu'elles ont entre elles [Marchetti A. et al., 2008]. Il a la particularité d'être un langage basé sur la logique computationnelle. De cette façon, les connaissances exprimées en OWL peuvent être exploitées et comprises par des agents logiciels. Cela permet, par exemple, de vérifier, via des raisonneurs, la cohérence (consistency) d'une connaissance en relation avec d'autres [W3C, 2016]. Cette couche OWL est basée sur le langage RDF et constitue une extension de RDF schéma. Une des ontologies les plus connues est FOAF (FriendOfAFriend) (Figure 79). Deux familles de ce langage peuvent être mises en avant : OWL 1 et OWL 2 possédant un niveau différent concernant l'expressivité (possibilités au niveau des règles d'inférences).

La nouveauté par rapport à RDFS c'est que OWL donne l'opportunité d'utiliser la disjonction (une classe disjointe à une autre), de spécifier que les propriétés sont transitives, fonctionnelles, inverses, symétriques et bien d'autres encore constituant des primitives.

Après avoir analysé tous ces langages qui s'encapsulent, vient la question des méthodes de modélisation conceptuelle d'ontologies. À partir de quelles ressources nous pouvons réaliser une telle entité ? Quelle technique peut correspondre le plus à nos besoins ?

```
<rdf:RDF
 xmlns:rdf="http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#"
 xmlns:foaf="http://xmlns.com/foaf/0.1/"
 xmlns:rdfs="http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#">
   <foaf:Person>
      <foaf:name>Hansel Bretz</foaf:name>
      <foaf:title>Mr.</foaf:title>
      <foaf:givenName>Hansel</foaf:givenName>
      <foaf:familyName>Bretz</foaf:familyName>
      <foaf:mbox rdf:resource="mailto:webmaster@foaf-project.org"/>
      <foaf:homepage rdf:resource=" http://hansbre.org/"/>
      <foaf:knows>
         <foaf:Person">
            <foaf:name> Jimmy Crocket</foaf:name>
         </foaf:Person>
      </foaf:knows>
   </foaf:Person>
</rdf:RDF>
```

Figure 79 : Structure du langage OWL avec un exemple.

3.4.4. Méthodes de conception d'une ontologie de domaine

Plusieurs méthodes existent dans le domaine de web sémantique pour modéliser des ontologies. La décision de concevoir une telle entité repose sur des besoins bien identifiés : représenter les connaissances d'un domaine et documenter des données en vue de les faire dialoguer et générer des informations pertinentes pour une action future à mener [Bachimont B., 2000]. Dans notre cas, ces deux raisons nous motivent et nous paraissent essentielles pour entreprendre la conception d'une ontologie de domaine. Le but ici n'est pas de comparer les méthodes de conception, mais de voir toutefois les tendances en termes de modélisation.
Le type de conception peut être de différents types. Les ontologies peuvent être conçues à partir de rien [Niang, C. A. T., 2013]. C'est une des méthodes les plus utilisées en termes de construction intégrale. *Methontology* est un exemple de méthode qu'il est possible d'utiliser dans ce cadre. Il est important de souligner que ce type de choix est véritablement consommateur en temps et mobilise beaucoup d'effectif. Cette dernière s'inspire des méthodes de développement traditionnelles dans le génie logiciel avec notamment une phase de conceptualisation, menée en étroite collaboration avec des experts en informatique.

D'autres méthodes, qui demandent plus ou moins de compétences dans l'ingénierie informatique, sont utilisées : les méthodes semi-automatiques de conception [Gangemi A., 2009]. Leur particularité est qu'elles exploitent des méthodes intégrant des traitements automatiques mis en place pour alléger la conception à partir de rien. Le Traitement Automatique de la Langue Naturelle (TALN) est une des méthodes utilisées pour extraire sémantiquement des informations conceptuelles provenant de corpus, afin de les transformer en connaissances au sein d'un modèle conceptuel ontologique. Le recours à ces méthodes a permis d'ouvrir un accès à d'autres domaines de recherche : *l'Ontology learning* intégrant des traitements d'extraction de données (ENG : Data Mining).

Dans le domaine de la conservation du patrimoine et en fonction des compétences acquises durant le travail de recherche, la méthode retenue pour modéliser l'ontologie a été la méthode dîte de *Lassila* [Lassila O. et al., 1999] [Hernandez N., 2005]. Elle fournit des

orientations pour les concepteurs souhaitant créer une ontologie sur la base d'ouvrage de connaissances. Possédant des documents renfermant de la connaissance, cette méthode nous a permis de nous appuyer sur une base simple de modélisation, pour ensuite, nous donner une certaine flexibilité afin d'aller vers une modélisation propre à notre domaine d'expertise. Les règles et les standards requis pour la représentation des connaissances ont été respectés [Brachman R. J. et al., 1992]. En ce sens, une ontologie générique a également été exploitée pour la documentation des artefacts du patrimoine culturel : le CIDOC-CRM (International Commity DOCumentation – Conceptual Reference Model) [Doerr M., 2005].

Il est important de souligner que le cycle de conception/gestion des ontologies se fait de la même manière que dans le domaine du génie logiciel. Avant d'obtenir une ontologie stable, le cycle doit passer par plusieurs étapes (Figure 80).

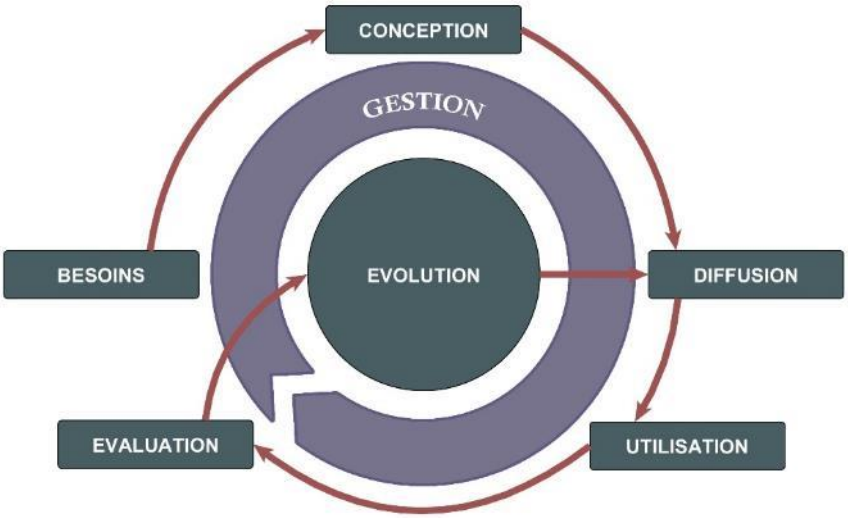


Figure 80 : Cycle de vie d'une ontologie.

3.4.5. Annotation sémantique guidée par des ontologies

De nos jours, des systèmes basés sur l'annotation numérique prennent de plus en plus d'ampleur dans la description d'éléments observables sur des images, vidéos ou même des représentations tridimensionnelles, dont l'objectif est de mettre en avant certaines caractéristiques qui ont du sens pour l'utilisateur. En effet, la rapide croissance de contenu multimédia survient avec un besoin important de gérer de manière efficace ces grandes quantités de données. En outre, l'analyse et l'interprétation sémantique d'image ont été un des défis les plus intéressants ces dernières années, ce qui a conduit à la réalisation de plusieurs tentatives pour répondre aux différents manques dans ce domaine. Comme nous l'avons expliqué dans la section 2.4.4., sur l'extraction de descripteurs informationnels, des travaux ont été initiés concernant les méthodes d'annotation automatique d'images par l'introduction des approches d'apprentissage statistiques. Ces méthodes fournissent des outils puissants et efficaces pour établir des associations entre des caractéristiques visuelles et des concepts sémantiques donnant du sens à ces caractéristiques via l'utilisation de formalisme conceptuel [Bannour H. et al, 2011]. Cependant même si ces approches actuelles

décrivent de manière adéquate le contenu visuel de l'image par l'utilisation d'algorithme d'extraction, elles sont souvent limitées à détecter uniquement les manifestations perceptuelles. Elles sont donc incapables de modéliser la sémantique de l'image de la même façon que l'œil humain le perçoit en utilisant sa propre expérience et ses propres connaissances.

La sémantique est définie comme l'étude de la signification. Dans le domaine de l'image, elle peut être définie comme étant la signification recherchée par l'Homme qui souhaite l'analyser dans un contexte précis. Typiquement, un utilisateur pourrait, par le biais d'une requête, obtenir toutes les images qui contiennent un bâtiment patrimonial. Donc, d'une certaine façon il peut énoncer une requête en relation avec un contexte précis. Ce contexte, peut être un domaine ou tout simplement un environnement de connaissance en rapport avec l'expérience de l'individu. [Liu Y. et al., 2007] a identifié cinq catégories de techniques qui fournissent une description sémantique d'images. Parmi celles-ci, nous allons nous concentrer particulièrement sur la représentation des connaissances de bases notamment à travers les approches conduites par les ontologies.

3.4.5.1. Photostuff

Une technique, mise en place dans un outil nommé *Photostuff*, se concentre sur l'annotation de contenu d'images dans une application web en exploitant des langages de représentation sémantique : OWL (ENG : Ontology Web Language) et RDF Schema (ENG : Resource Description Framework Schema). Ils constituent des langages extensibles de représentation des connaissances [Halaschek-Wiener C. et al., 2005].

L'ensemble de l'approche, adoptée par *Photostuff,* est composé de deux éléments principaux à savoir l'annotation d'image et la gestion des métadonnées. Ceux-ci sont gérés des technologies du web sémantique.

Cette plateforme indépendante (développée en Java) exploite une ontologie pour fournir de l'expressivité, requise pour prendre en compte, d'une part, le contenu de l'image, et d'autre, par ses informations. Tout d'abord, elle donne la possibilité à l'utilisateur d'importer des images accompagnées de leurs métadonnées, d'insérer des ontologies munies de bases d'instances ou non, puis de réaliser des régions. Les résultats sont soit exportés dans la mémoire de l'ordinateur, soit sur un portail web de gestion de données sémantiques dédié à cet outil.

Photostuff est conçu, par exemple, pour charger plusieurs ontologies à la volé permettant à l'utilisateur d'exploiter des concepts, qui sont les plus pertinents, pour donner du sens aux futures annotations qu'il réalisera. Les classes (ou concepts provenant de l'ontologie) sont utilisées pour désigner une région représentée, constituant pour l'ontologie utilisée, une instance de ce concept choisi. Un formulaire de création d'instances est disponible afin d'éditer des propriétés liées à la classe choisie (Figure 81).

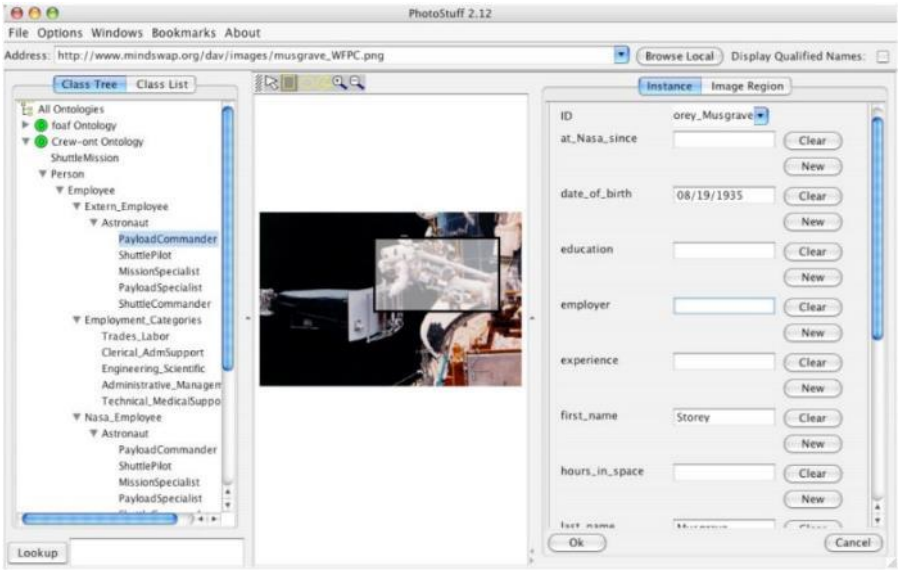


Figure 81 : Illustration de l'interface de Photostuff [Halaschek-Wiener C. et al., 2005].

Cet outil d'annotation prend également en considération les métadonnées intégrées dans les images insérées, quand celle-ci sont disponibles, pour les extraire et les encoder selon le formalisme en vigueur (RDFS/OWL). Ceci permet notamment à ces métadonnées d'être directement incorporées dans le système en local, puis sur un portail sémantique à distance. En particulier, l'outil peut extraire toutes les entités publiées de types « instance », en relation avec un concept précis.

Pour conclure, cet outil fournit une bonne base de réflexion quant à la possibilité d'annoter des images et d'associer les régions avec une représentation conceptuelle de connaissances. Cependant, celui-ci propose uniquement de dessiner de simples carrés pour décrire les caractéristiques observables d'une photographie. Ce qui pose une limite en termes de précision d'analyse de descripteurs 2D. Cet outil n'offre pas de potentialité en termes de dessin d'annotation. En effet, dans le domaine de la conservation du patrimoine, les cartographies réalisées par les experts sont précises et décrivent une entité observable qui, dans la plupart des cas, sont beaucoup plus complexes que de simples quadrilatères.

Enfin, même si ces images ou même ces régions sont reliées au sein d'une même référence sémantique (via une ontologie), cet outil ne permet pas de réaliser des classifications fines et d'obtenir la possibilité d'effectuer de la reconnaissance de forme ou de l'appariement d'images basés sur les propriétés d'instances (en tant que paramètre), pour un concept donné, présent dans la base de connaissances.

3.4.5.2. Video Image annotation tool (FR : Outil d'annotation d'image/vidéo)

Les récentes avancées en termes de technologies du web sémantique (section 3.4.1.1.) ont motivé également plusieurs travaux dans le domaine de l'extraction d'information d'images et particulièrement dans les vidéos. De ce fait, des ontologies appliquées au multimédia, ont été proposées, et ont tenté de définir des standards pour la description de

contenu multimédia bas niveau. D'autres ontologies de domaine ont été développées pour permettre des interprétations sémantiques et raisonner sur des descriptions extraites de ces sources numériques. Les ontologies sont utilisées, de manière générale dans le domaine de la recherche d'images, pour des objectifs bien ciblés. Elles sont exploitées, afin de représenter les différents types de relations parmi les images à raisonner comme les arêtes, les lignes et les régions. La description par des connaissances est également un objectif, via l'utilisation de concepts et de relations, qui sont typiquement soumis à des raisonnements après le processus d'analyse d'images. Et enfin, les ontologies servent à supporter la fusion entre le niveau visuel et le niveau sémantique, qui peuvent être étroitement liés. Les ontologies sont de différentes formes : soit « légère » dans laquelle seulement la description sémantique est modélisée, soit « lourde », munie d'un niveau de logique beaucoup plus élaboré.

Dans l'application proposée, l'*outil d'annotation d'image/vidéo* (anciennement M-OntoMat-Annotizer) [Petridis K. et al., 2006] réalisé par le laboratoire MKSMA (ENG : Multimedia Knowledge and Social Media Analytic) propose d'annoter manuellement des vidéos et des images. Il fournit une interface utilisateur qui permet de réaliser des descriptions visuelles sur des données, au format MPEG-7, à l'aide d'annotation liée à des ontologies. Cet outil est utilisé particulièrement afin de construire des ontologies lourdes (avec logique de description) incluant des instances théoriques et concrètes des concepts du domaine haut niveau. Ceci est réalisé dans le cadre d'une spécification formelle de descripteurs visuels. Donc l'outil formalise l'interrelation entre les descriptions de concepts haut niveau et d'autres de bas niveau, instanciés par les données multimédias, permettant de réaliser des raisonnements sur de nouveaux types de contenu multimédia. Cela passe par des phases de comparaison entre les instances déjà créées et via les relations fonctionnelles entre données de haut niveau (visuelle) et données de bas niveau (descripteurs 2D d'images). Il contient également une barre de recherche associée à l'ontologie instanciée par des régions.

Cet outil d'annotation d'images/vidéos propose une ontologie lourde. Celle-ci renferme une logique de description d'aspects visuels reconnaissables et caractérisables à travers des termes (connaissances) représentés par des concepts relatifs à des descripteurs 2D, pour réaliser des raisonnements. Cet outil d'annotation basé sur une ontologie propose une façon d'annoter des images et des vidéos cependant, elle ne permet pas de générer des données spatiales au-delà des références relatives de chaque image. De ce fait, des analyses ne permettent pas de ressortir des informations morphologiques relatives à un objet du patrimoine. Comme les autres propositions de représentation des connaissances, les ontologies sont davantage orientées vers des analyses qualitatives par l'utilisation de termes formalisés, mais ne prennent aucunement en considération des analyses quantitatives intégrables via les propriétés (attributs), attachées aux classes de l'ontologie considérée.

3.4.6. Systèmes d'informations exploitant des ontologies pour la documentation du patrimoine

3.4.6.1. Documentation et description d'objet du patrimoine culturel par une ontologie de domaine

Le groupe de recherche SeCo (ENG : Semantic Computing) a conçu de nombreuses ontologies englobant une quantité importante de domaines, rassemblées pour n'en former qu'une : l'ontologie FinnONTO. Celle-ci a été créée pour la description de contenus tels que des objets exposés ou non d'un musée, dont les publics visés sont les scientifiques de différents domaines et les non-experts. L'ontologie FinnONTO structure les données d'une de leurs applications : le portail sémantique pour la culture Finlandaise Kulttuurisampo (The Semantic Portal for Finnish Culture Kulttuurisampo). L'ensemble de ces ontologies liées ou non en fonction des besoins de l'application, sont conçues de manière générique, selon les recommandations web W3C basées sur la logique de description, tels que RDF, OWL. Le langage de requête SPARQL est utilisé pour le raisonnement et les inférences. La plupart des ontologies que renferme FinnONTO ont été développées en transformant des thésaurus (les classes iconographiques, le thésaurus d'architecture et d'art (AAT), et la liste des noms d'artiste (ULAN) par exemple) en une représentation légère d'ontologie. Ce processus de transformation n'a pas été purement automatique, mais un traitement manuel a également été requis afin d'affiner les relations sémantiques du thésaurus dans une structuration de subsomption. Dans le modèle FinnONTO, les ontologies, dédiées aux différents domaines pris en considération, sont développées dans un mode collaboratif distribué impliquant les experts de différents champs d'application. Elles sont fusionnées au sein d'une ontologie plus large appelée l'ontologie KOKO englobant tous ces domaines. Ces ontologies sont multilingues et ont donc été reliées en utilisant une approche multi ontologique [Hyvönen E. et al., 2009].

Une des premières versions publiques de Kultuurisampo contient des données provenant d'une vingtaine de sources telles que les musées, bibliothèques, archives et autres, ainsi que la fondation Getty (subventionné pour la compréhension et la conservation des arts visuels) Wikipédia (DBpedia), Geonames, et Panoramio. L'application renferme du contenu issu d'un large panel de domaine comme des peintures, sculptures, dessins, arts abstraits, romans, bandes dessinées, des pages internet, et même des lieux, des personnes, des événements historiques, des bâtiments et des sites culturels. En naviguant sur ce site, il est facile de constater l'hétérogénéité des données. Par exemple, une image d'archive peut être scannée et documentée à l'aide de concepts, qui la caractérisent par sa dimension à travers des propriétés, ce qu'elle affiche comme objet, œuvre d'art, lieux ou autres. Ceci se fait en grande partie grâce aux métadonnées, puis à la description sémantique que fournit l'expert qui la documente (Figure 82). Ces informations sont rattachées avec des données de localisation affichable sur un site de cartographie tel que Google Maps.

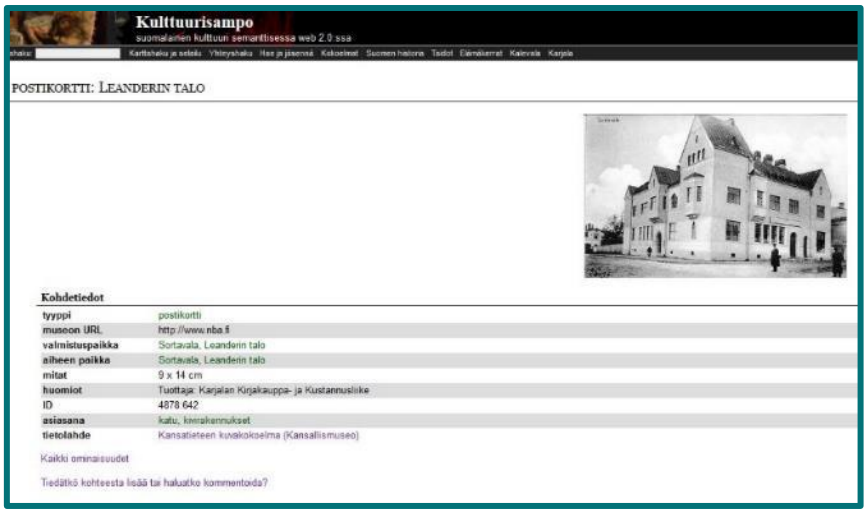


Figure 82 : Exemple d'image d'un bâtiment avec ses propriétés dans Kultturisampo.

Le portail propose de visualiser une collection de données via une interface. L'ontologie créée permet de superposer des images historiques sur des sites de cartographies actuelles et d'accéder à une interactivité parallèle (le grossissement sur Google Maps s'applique également sur l'image, elle est donc mise à l'échelle) (Figure 83).

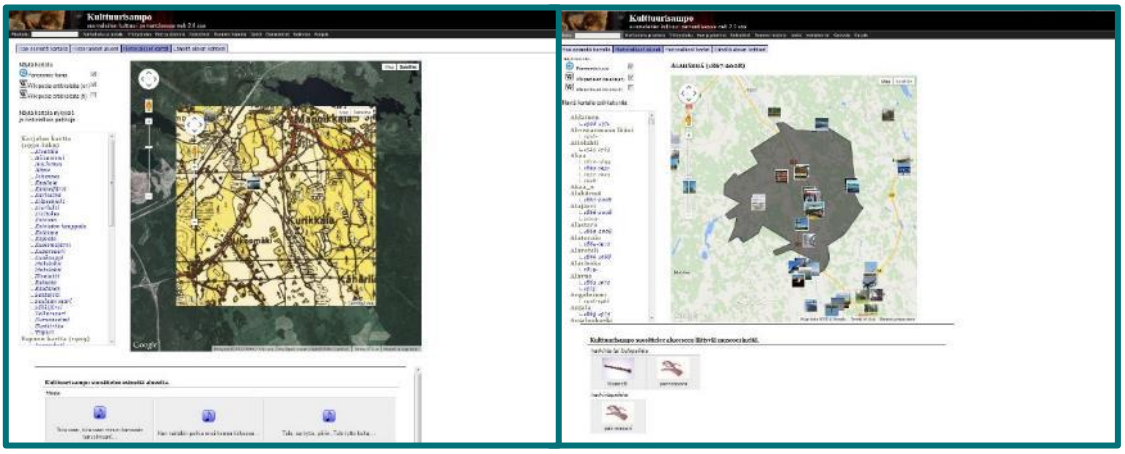


Figure 83 : Exemple de superposition de cartes anciennes avec cartographie dynamique actuelle grâce aux données ontologiques : Kultturisampo.

Nous devinons que chaque élément consultable de la base de données est référencé et mis en relation avec d'autres éléments de types différents. Le portail possède les caractéristiques suivantes [Hyvönen E. et al., 2009][Hyvönen E., 2012] :

- La modélisation basée sur l'événement est la solution pour représenter ces connaissances : c'est la particularité de Kulttutrisampo. C'est en utilisant cette méthode que les connaissances implicites, intégrées dans les différents schémas de métadonnées, sont représentées pour donner plus de détails à l'annotation. Les images, par exemple, peuvent contenir des annotations détaillées. Ces dernières sont reliées par la suite à des histoires narratives et des événements historiques. Le but est de faire en sorte que ces métadonnées possèdent une interopérabilité mutuelle au niveau sémantique.

- De nouvelles formes de recherche sémantique sont mises en place à travers des requêtes fournissant l'accès au contenu à travers deux modèles sémantiques développés. Le premier est un modèle de recherche multiple pour le traitement de métadonnées hétérogènes et pour la génération de présentation automatique, afin de visualiser des résultats de recherche dans deux dimensions orthogonales. Le second modèle de recherche, « la recherche relationnelle et sociale » appelé aussi « identification d'association » ou même « découverte d'une connaissance », prend en considération deux entités connues dans le modèle et peut répondre à la question sous la forme suivante : « Que lie Victor Hugo à Paris ? ». Ce langage est à peu de chose près le langage naturel, mais pose encore quelques problèmes quant à sa valeur sémantique. Ici, l'idée n'est pas de chercher des objets, mais de justement souligner des chaînes de relations associatives entre objets définis. Ceci s'effectue via l'utilisation des registres, « des noms d'artiste et organisation ». Comme nous l'avons vu, l'utilisateur peut taper deux noms caractéristiques en utilisant l'auto complétion sémantique, et Kulturiisampo propose une liste de relations qu'a une personne ou une organisation avec une autre, par un réseau social basé sur cinquante rôles sociaux définis (parent-de, professeur-de, etc.). Il est possible de ressortir des informations textuelles quant à ces relations, mais également de visualiser ces résultats structurés dans un graphe interactif (Figure 84).

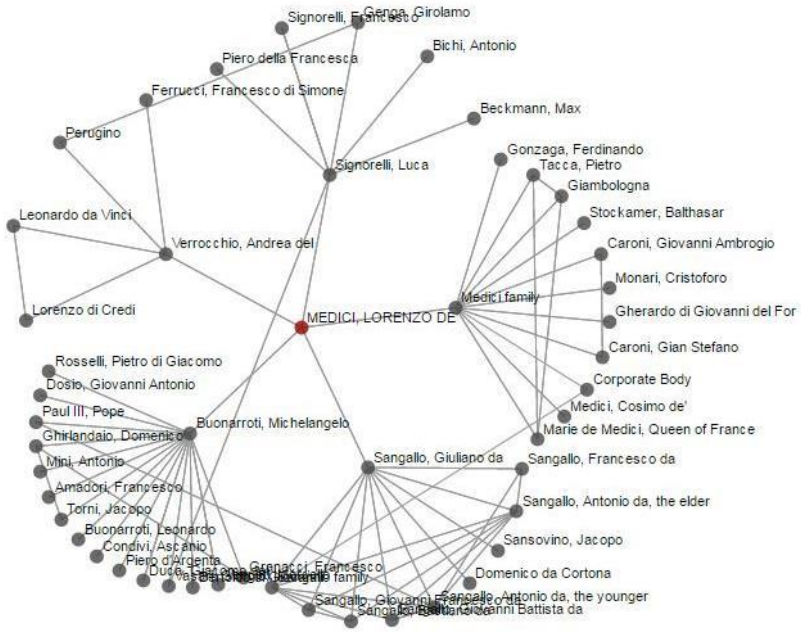


Figure 84 : Graphe représentant des relations entre entités (portail Kulturisampo).

- Une méthode a été conçue pour créer des liens entre les données lors d'ajouts de nouvelles ressources. Le système propose alors des recommandations automatiquement pour guider l'utilisateur.

- Comme énoncé précédemment, Kultturisampo utilise par exemple Google Maps qui peut être superposé dynamiquement avec une cartographie historique. Un repère temps est utilisé pour projeter des contenus et souligner la dimension temporelle. De plus, il y a des graphes pour visualiser des relations sémantiques entre différentes entités de l'ontologie (des artistes par exemple).

- D'un point de vue technique, le contenu peut être créé dans un mode collaboratif Web 2.0.

Ce qui est intéressant dans cette approche c'est de voir comment sont liées les données hétérogènes et la méthode choisie. Le nombre de relations et leur représentation, dans le site dédié, sont assez importants.

Pour conclure, l'ontologie de domaine conçu par ce groupe de recherche montre une forte efficacité en termes de mise en relation de ressources hétérogènes. Le système qu'il propose montre aussi beaucoup de flexibilité et de performance concernant la recherche et la saisie d'information, par l'utilisation notamment de différentes formes de visualisation ludique et interactive pour afficher des résultats. Cependant, ce système et cette ontologie ne prennent pas en considération des données tridimensionnelles pour réaliser des études quantitatives. Malgré ce manque, nous retiendrons la méthode de modélisation conceptuelle choisie, car elle renforce l'aspect complexe de sa conception, en raison de la prise en compte de toutes les ressources, en exploitant et en représentant les connaissances d'un nombre important de domaine d'expertise.

D'autres travaux actuels de recherches exploitent également des ontologies de domaine afin de suivre les dégradations du patrimoine architectural. C'est le cas notamment du projet PARCOURS (section 3.4.6.2.) et du système MONDIS (section 3.4.6.3.).

3.4.6.2. Modèle ontologique PARCOURS

Le modèle ontologique PARCOURS (PAtrimoine culturel et Restauration-Conservation : Ontologie pour l'Usage d'un Référentiel commun aux différentes Sources de données) constitue un travail de recherche encore en cours, et permet comme la plupart des modèles ontologiques d'interroger uniformément les différentes sources de données disponibles dans des bases de données [Niang C. et al., 2015]. Les données hétérogènes peuvent être de tous types, comme des entités provenant de l'imagerie scientifique, des données d'analyses, des images et bien d'autres mesures instrumentales exploitées pour décrire et suivre l'état de conservation des édifices patrimoniaux. Un des principaux atouts essentiels du modèle PARCOURS est qu'il permet de mettre en relation des données hétérogènes alors que celles-ci proviennent de sources distinctes présentant chacune des structures différentes. L'objectif principal de cette ontologie dédiée, est d'uniformiser et d'harmoniser cette quantité de données et métadonnées diverses afin de permettre à l'utilisateur expert de réaliser des requêtes afin d'obtenir des informations concernant une entité particulière.

Afin de faciliter l'échange des connaissances d'un domaine, l'idée principale aujourd'hui n'est plus de déplacer les bases de données et de les restructurer pour les unifier, mais d'exploiter d'autres technologies comme le web sémantique qui a pour stratégie d'améliorer la valeur de la connaissance collectée via des tâches rattachées au patrimoine culturel. La meilleure solution pour structurer les connaissances, via des technologies du web, est l'ontologie, qui fournit une compréhension partagée d'un domaine d'intérêt afin de soutenir la communication entre les Humains et les agents informatiques (ordinateur) étant typiquement représentée dans un langage de représentation compréhensible par les ordinateurs.

La structure principale (Figure 85) est organisée en utilisant des boîtes constituantes des concepts ou même des classes de l'ontologie. La présence des lettres « E » et « S » dénote l'utilisation d'un formalisme standardisé connu dans le web sémantique : l'utilisation du CIDOC-CRM (ENG : Conceptuel Reference Model), une « top ontology » que nous présentons dans la section 4.3.2.

L'ontologie a été principalement construite de sorte qu'elle représente les processus de conservation-restauration entrepris sur un objet culturel en prenant en compte un aspect multidimensionnel. Cet aspect a pour particularité de mettre en relation l'identification, la localisation et les caractéristiques physiques de l'objet du patrimoine culturel avec des événements qui ont un impact sur la durée de son existence donc sur son intégrité.

De manière générale, l'ensemble de la modélisation conceptuelle de PARCOURS se base sur le même formalisme complexe que celui proposé par CIDOC-CRM qui s'en trouve complètement adapté pour la documentation de la conservation.

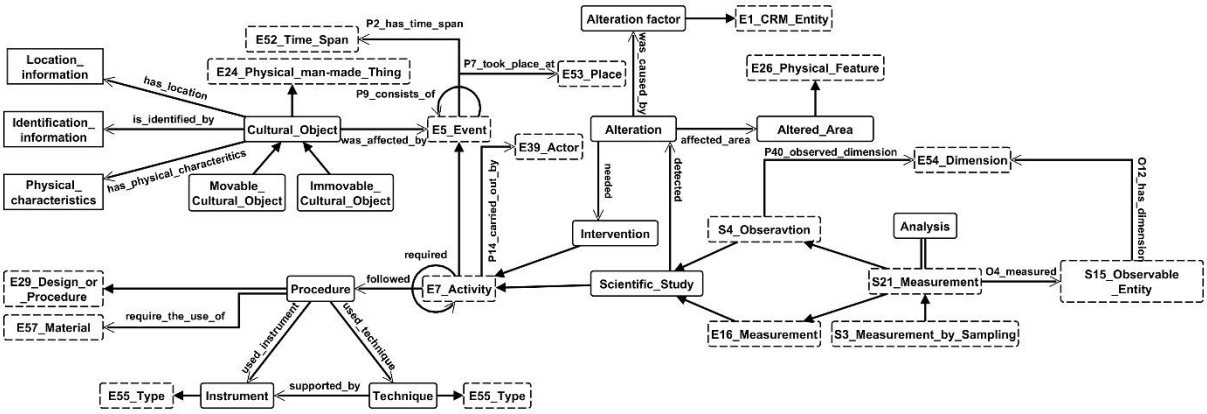


Figure 85 : Cœur structurel du modèle ontologique PARCOURS [Niang C. et al., 2015].

Cependant, l'ensemble des concepts disponibles dans le modèle de référence n'a pas été suffisant en termes de réponses à des besoins comme celui de documenter des altérations.

Afin de tester la validité de la première proposition du modèle, une instanciation a été réalisée, c'est-à-dire un exemple réel répondant à toutes les relations présentes et validant la cohérence des assertions (Figure 86). Le cas d'étude concerne notamment la restauration d'un vitrail de la Sainte Chapelle, conduite par l'équipe du LRMH dédiée à la restauration des vitraux. Le modèle créé peut informer l'utilisateur que toutes les boîtes ont été renseignées

avec succès grâce aux données disponibles, lui permettant d'obtenir de manière satisfaisante le processus de diagnostic. En effet, chaque instance (remplacé par des noms dans les boîtes) représentant les vitraux étudiés est clairement identifiée grâce à son appellation et sa localisation dans la Sainte Chapelle. De plus, l'ensemble du processus de diagnostic est bien décrit, accompagné de plusieurs résultats intéressants, affichés grâce à une extraction de données dans la base, incluant les altérations détectées, les résultats observés via des activités d'analyses et les procédures des interventions.

Ce qui est intéressant c'est que l'on peut voir directement les valeurs de données d'acquisition telles que « Microscope Electronique à Balayage » (ENG : Scanning Electron Microscope (SEM)) qui est un instrument d'analyse, ou bien même « la spectroscopie à rayon X dispersive » (ENG : Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS)) qui est une technique d'analyse. Ces deux techniques font terminologiquement partie intégrante d'un thésaurus organisé. Le modèle PARCOURS présenté ici utilise une classe du CIDOC-CRM, « *E55_Type* », comme une interface pour intégrer des thésaurus du domaine. Ceux-ci sont utilisés comme des instructions de référence permettant notamment de choisir un terme pertinent pour décrire les valeurs données qui sont attribuées via une relation typologique spécifique. L'ensemble de ces thésaurus a été réalisé dans le cadre de ce projet et tente de classifier des entités matérielles, incluant des thésaurus pour le patrimoine culturel mobilier et immobilier, pour les facteurs d'altérations, pour les outils et logiciels, et les matériaux utilisés lors des activités scientifiques de restauration.

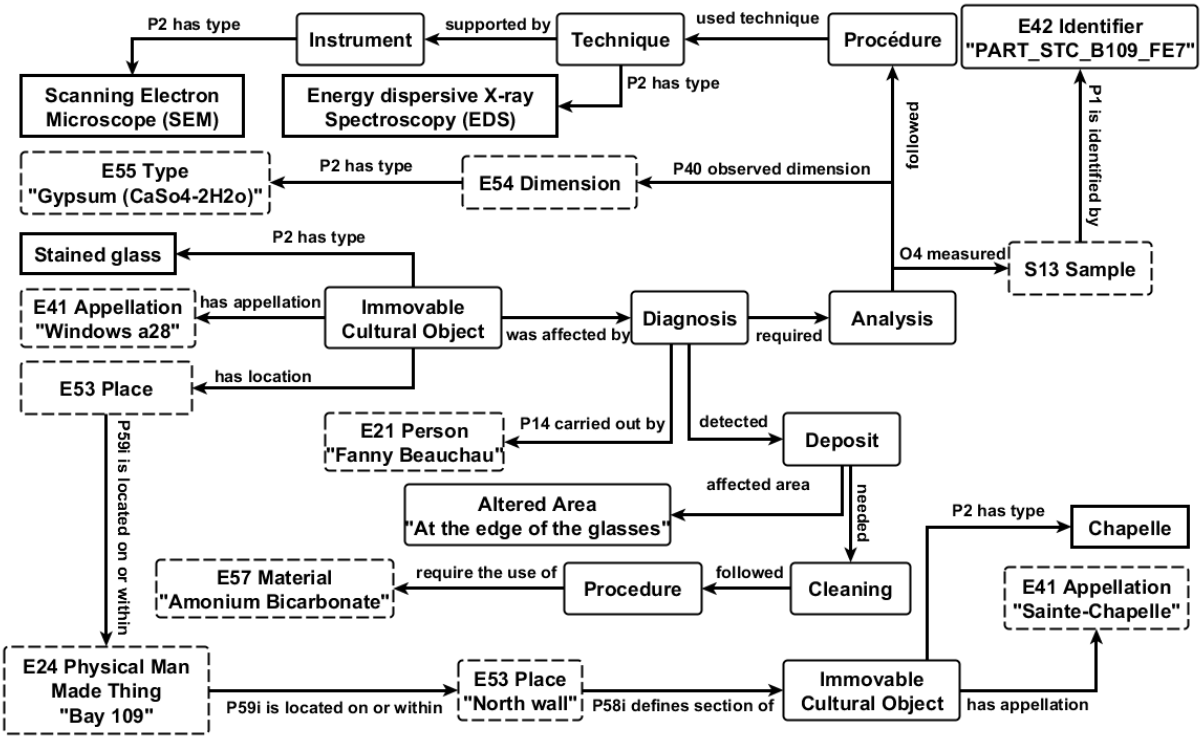


Figure 86 : Cas d'étude applicable sur une portion du modèle PARCOURS [Niang C. et al., 2015].

3.4.6.3. MONDIS : un système d'information dédiée aux altérations d'édifices patrimoniaux

MONDIS (MONument Damage Information System) est un système d'information structuré par une ontologie de domaine. La réalisation d'une ontologie a été initié afin d'exploiter la capacité de raisonnement automatique croisant : la documentation sur les altérations du patrimoine culturel, le diagnostic d'un monument en particulier, et l'intervention pour de possibles opérations de restauration. L'équipe développant cette ontologie a élaboré deux types d'applications. Une première sur serveur afin de récupérer et de visualiser une importante quantité de données sur différents aspects que nous verrons dans un paragraphe suivant, et un deuxième outil avec les mêmes spécificités, mais sur mobile (smartphone, tablette), multiplateforme (iOS et Android) [Cacciotti R. et al., 2015b].

Afin d'expliquer les objectifs de cette ontologie, chaque partie principale, qui la compose, est développée (Figure 87).

Différents groupes distincts sont identifiables par des codes couleur. Plus précisément, nous distinguons cinq parties qui possèdent chacune leurs spécificités. Nous verrons également la façon dont s'articulent ces différents aspects.

Le départ de ce modèle se fait par l'élément d'étude qui est le bâti : l'objet du patrimoine culturel. En liaison directe avec ce dernier, nous avons le groupe « *composants et description de construction* ». Il renvoie notamment à la définition des éléments architecturaux et la façon dont a été construit l'édifice. Ce groupe permet donc d'assigner des caractéristiques physiques (fournissant plus de détails d'un point de vue de la résistance structurelle) et fonctionnelles spécifiques. Les composants peuvent contenir des sous-composants s'organisant dans une hiérarchie (la planche est un sous-composant de plancher). Un matériau peut également être associé à chaque composant ou sous-composant.
Nous avons ensuite le composant « *événements liés à l'objet du patrimoine* » pouvant influencer les conditions de l'objet. Ceux-ci prennent en considération les catastrophes naturelles (activation du risque, d'un aléa), car de telles conditions peuvent changer morphologiquement l'objet et ses caractéristiques de positions. Le changement d'objet inclut notamment des sous-classes ayant un impact sur l'état de l'objet : des changements fonctionnels (changement d'une église en commerce par exemple), changements structurels (par ajout ou suppression de composants), et d'autres.

Le composant « *diagnostic des altérations et intervention* » identifie à la liaison réciproque présente entre les phénomènes d'altérations, les agents (définis comme étant porteur du phénomène comme l'eau, les sels) et leurs manifestations. Nous sommes conscients qu'une altération est le résultat d'un phénomène d'altérations prenant place sur une surface. Et une intervention se fait soit en réponse au phénomène (en le stoppant) soit sur l'altération (en réduisant l'impact morphologique du phénomène), soit en éliminant un agent. Cette description a été réalisée en utilisant un corpus de référence sur les altérations de la pierre

[Verges-Belmin V., 2008], permettant de réaliser une taxonomie, puis un thésaurus des concepts manipulés.

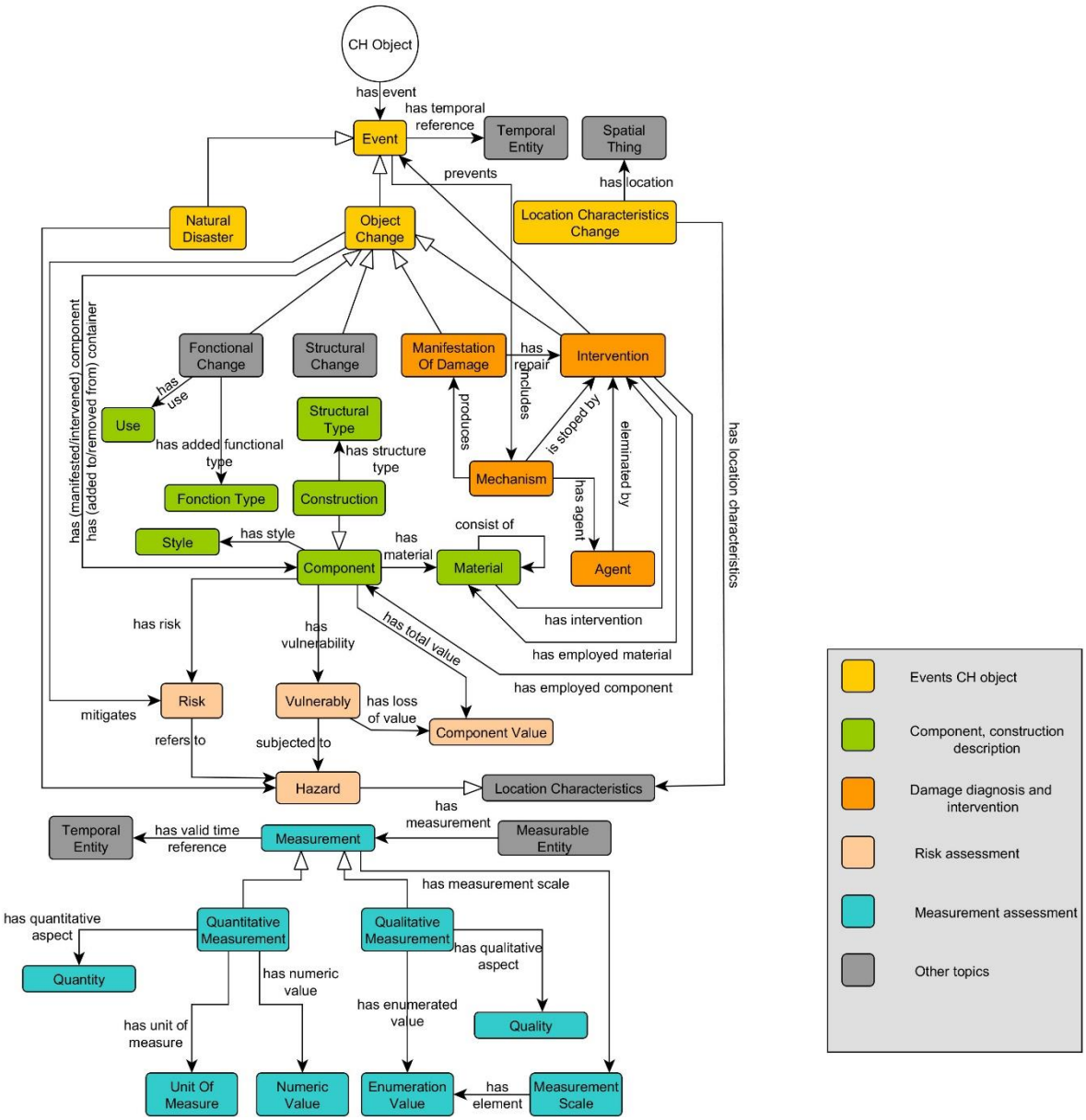


Figure 87 : Représentation conceptuelle de l'ontologie de domaine du système MONDIS.

Le groupe « *évaluation du risque* » représente la prévention. Il aide les utilisateurs à savoir quelle partie du bâtiment est considérée comme à risque par rapport à un phénomène d'altérations précis.

Il est possible avec la composante « évaluation des mesures », de quantifier et qualifier plusieurs aspects mesurables du modèle permettant de créer une documentation. Par exemple la description du bâti peut être réalisée avec des données concernant les éléments d'architectures (hauteurs, épaisseurs), l'étendue d'une altération sur l'édifice (largeur d'un trou), et même en mesurant les propriétés d'agents (taux d'humidité dans la maçonnerie).

Enfin, le dernier groupe « autres sujets » contient des classes nécessaires au fonctionnement du modèle.

L'importance du modèle proposé peut être simplement décrite comme suit : un événement (ENG : event), pouvant avoir une référence temporelle définie, induit un mécanisme qui peut être réalisé par un agent. Le mécanisme de dégradation résulte en une altération tangible et observable sur le bâti, appelé manifestation de la dégradation, qui inclut deux entités : le matériau et le type de composant d'altération. La phase d'intervention est modélisée comme une action (ou ensemble d'actions) ciblée pour remédier à cette manifestation, stoppant le mécanisme de dégradation en éliminant l'agent de dégradation identifié afin d'empêcher que l'événement de dégradation se renouvelle.

Chaque classe présentée dans ce modèle conceptuel présente une terminologie interne qui se réfère à une taxonomie. Les taxonomies peuvent dériver de littératures techniques bien établies et peuvent être davantage intégrées ou étendues directement par l'utilisateur.

Les différentes informations que nous venons de lister sont consultables et il est possible à tout moment de pouvoir en saisir de nouvelles. Ce système ontologique permet de faciliter le calcul de raisonnement entre les différents documents concernant les altérations d'un bâtiment patrimonial pour les croiser et créer de nouvelles données.

Le modèle ontologique proposé par MONDIS convient à un éventail de population important (des utilisateurs faisant partie de près ou de loin du domaine du patrimoine et de sa conservation).

Il permet de couvrir une large gamme d'étude documentaire et analytique pour l'évaluation du patrimoine dans son ensemble et de la mise en correspondance de contenus. C'est un outil qui présente deux fonctionnalités principales : la saisie de données et la recherche d'information. Une recherche qui se base notamment sur une extraction d'information sémantique à partir des données stockées (afin de visualiser des cas similaires à la requête posée). Des propriétaires de monuments historiques, ou des étudiants par exemple peuvent extraire des informations utiles concernant les causes d'altérations et obtenir des propositions multiples pour y remédier. Une application « recherche facile », basée sur une extension nommée « *matrice de connaissances* » (ENG : Knowledge matrix) en cours de développement, fournit une alternative pour constituer un partage de connaissance ou des outils didactiques pour les utilisateurs non experts.

Cet outil exploite une interface présentant une table à double entrée pour sélectionner par exemple « *altération* », « *agent du mécanisme* » ou « *intervention* ». Leur combinaison par deux peut apporter des connaissances et expliquer des méthodologies diagnostiques puis analytiques, et enfin fournir également des aperçus sur des techniques d'intervention applicable sur le cas recherché.

La Figure 88 montre une application du modèle proposé soumis à un cas réel : une colonne de cathédrale présentant des fissures verticales dues à une surcharge provenant de la

reconstruction d'un toit bâti avec des matériaux plus lourds que les précédents. La mesure en largeur de cette fissure est de 1 mm, lorsque la contrainte à la compression courante dans la colonne a été évaluée lors d'analyse structurelle. Les actions d'intervention telles que le confinement de la section critique et le jointement des fissures sont suggérées par le système. Cet exemple souligne bien comment l'architecture du modèle conceptuel transmet avec succès les données rassemblées dans une forme logique et cohérente contribuant à une lecture standardisée nécessaire pour raisonner automatiquement et constitue donc un support non négligeable pour l'utilisateur (Figure 88).

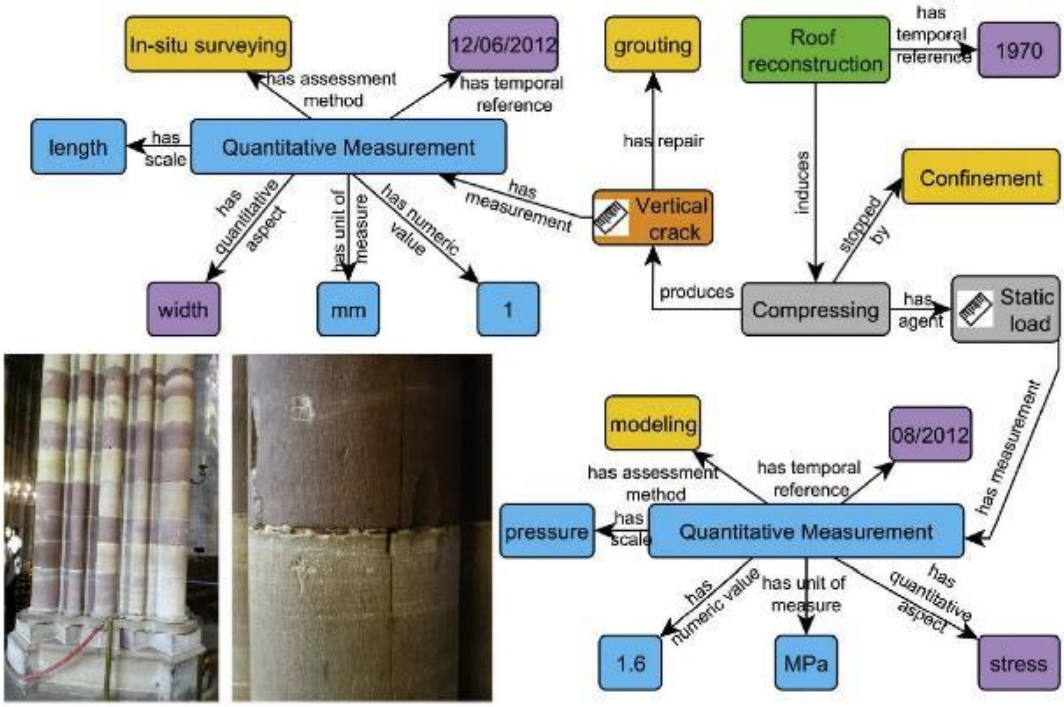


Figure 88 : Cas d'étude réel insérable dans MONDIS sous forme de modèle conceptuel [Cacciotti R. et al., 2015a].

Le groupe de recherche a également développé une application mobile dédiée à l'évaluation de l'état de constructions. Son objectif principal est d'assister l'expert de la conservation dans l'évaluation in situ de l'état de construction d'un monument en exploitant le support de raisonnement automatique fourni par le modèle diagnostique formalisé. L'application créée permet notamment d'identifier l'objet avec un GPS, d'acquérir une dégradation en prenant une photographie et de stocker des données de mesures directement in situ (Figure 89).

Ce modèle permet aussi d'évaluer l'état du bâtiment à travers la prise en compte de différents paramètres d'entrée, en le synchronisant avec le serveur, afin de traiter les données à travers l'application que nous avons expliquée précédemment en vue de rechercher et d'avoir à disposition des solutions de restauration possibles pour la dégradation observée.

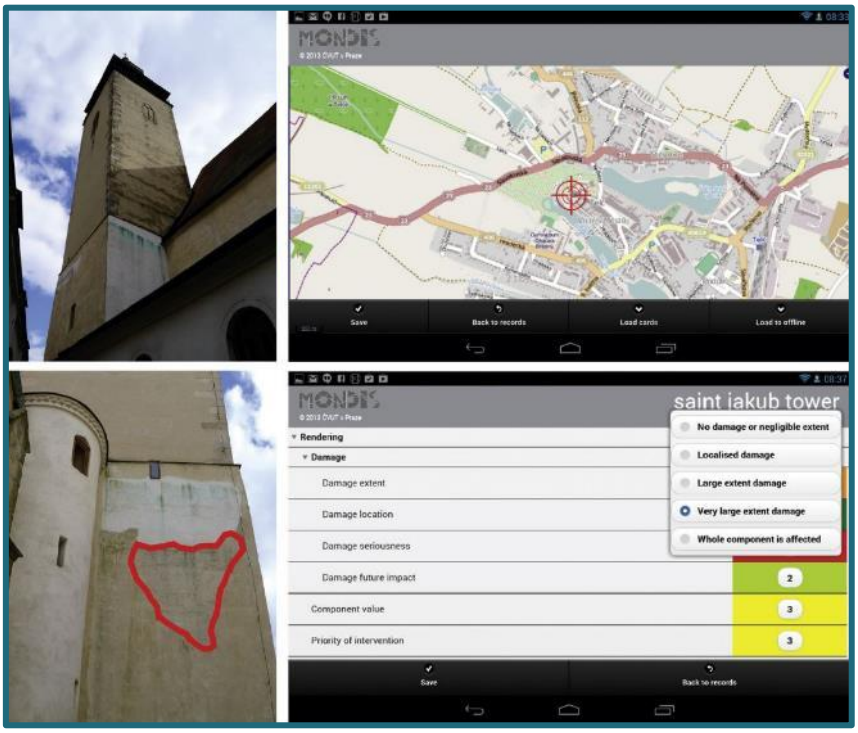


Figure 89 : Illustrations de l'application mobile de MONDIS avec localisation du monument (partie haute) puis la documentation d'une altération annotée (partie basse) [Cacciotti R. et al., 2014].

3.5. Conclusion sur l'état de l'art

Les données, informations et connaissances sont gérées respectivement par des systèmes de gestion de base de données, des systèmes d'information et des systèmes basés sur les connaissances. Pour chacune des entités, il y a un domaine d'expertise qui leur est propre. Parfois, et dans la plupart des cas, les experts de la conservation/restauration, en collaboration avec des experts informaticiens, exploitent les capacités de structuration stricte des bases de données pour stocker leurs ressources (données d'acquisitions in situ et en laboratoire, documents techniques, administratifs, etc.). Ceci constitue une base, pour ensuite tenter de ressortir des informations via un système d'information, qui leur propose une interface, munie d'un système de requêtes dédiées à leurs besoins respectifs pour ajouter de l'intelligibilité. Cependant, ce type de système génère des informations qui sont interprétées avec les connaissances propres de l'expert qui réalise les requêtes. C'est pour cela que, pour un domaine particulier, nous pouvons intégrer et représenter des connaissances formelles et partagées, permettant de structurer ces données et informations. Grâce à cette structuration, l'interprétation est facilitée et permet de proposer un cadre de travail en prenant en compte les connaissances propres inhérentes à chaque individu.

Parmi les systèmes de gestion présentés, l'extraction est possible grâce à la combinaison de plusieurs éléments. Ceux-ci prennent en considération les différents aspects en réponse aux besoins d'analyses et de suivi dans la conservation du patrimoine. Cependant, aucun d'entre eux ne relie tous les aspects relatifs à toutes les problématiques en lien avec les besoins des experts. Après l'analyse de l'état de l'art nous avons vu qu'il était possible de décrire une

entité observable à travers trois dimensions : sémantique, spatiale, et morphologique. Trois systèmes représentatifs ont été choisis et ont été évalués à travers une grille croisant les différentes dimensions relevées avec les aspects diagnostiques.

La plateforme NUBES [De Luca L., 2014], utilisée dans le cadre du projet SACRE [Stefani C. et al., 2014], propose une solution de spatialisation très efficace en termes d'analyse de la distribution spatiale, mais ne renferme pas un modèle de connaissances intégrées a priori pour décrire formellement les phénomènes d'altérations entre autres (Figure 90).

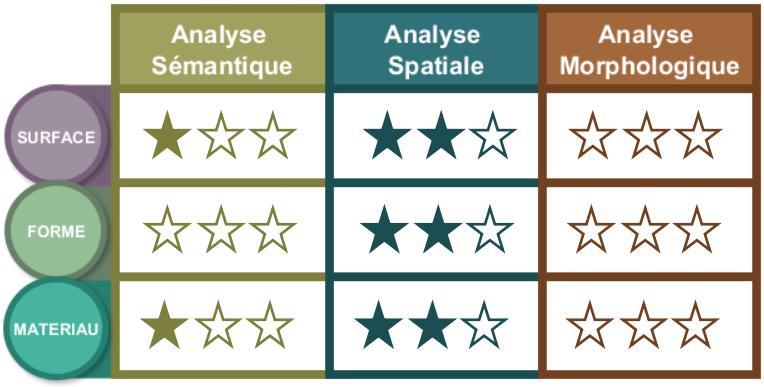


Figure 90 : Grille d'évaluation : système NUBES SACRE.

Le modèle conçu lors du projet PARCOURS [Niang C. et al., 2015], est une représentation conceptuelle intéressante car elle utilise et l'exploite un modèle standardisé de référence pour décrire la conservation du patrimoine culturel. Il permet notamment de documenter l'ensemble des informations allant de l'acquisition, l'observation scientifique d'une altération ou entité observable et mesurable, en vue de proposer une façon (la plus pertinente) de restaurer l'objet altéré. Ce modèle corrèle les données entre elles et permet de les harmoniser au sein d'une même représentation exclusivement sémantique. Malgré une harmonisation certaine, ce modèle ne permet pas de gérer des données tridimensionnelles offrant la possibilité de spatialiser la position des altérations, des matériaux, voire même la localisation précise des acquisitions de données (Figure 91).

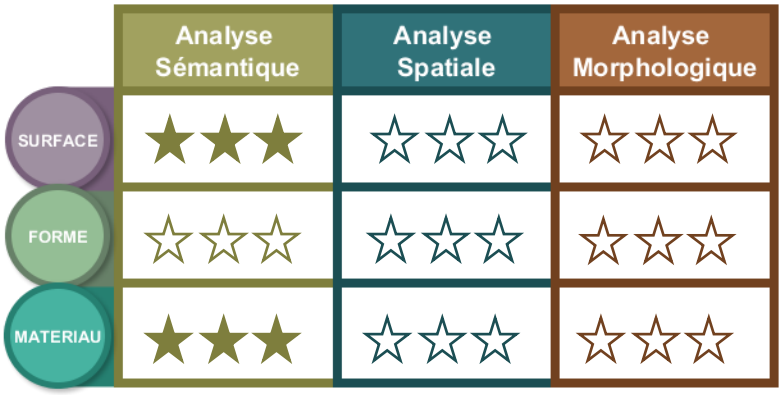


Figure 91 : Grille d'évaluation : système PARCOURS.

Le système MONDIS [Cacciotti R. et al., 2015a], quant à lui, utilise une large gamme d'études analytiques et documentaires et donc possède la particularité de croiser des données en vue de produire des informations pertinentes pour des objectifs de restauration. Cependant, ce système d'information, exploitant une ontologie de domaine, ne permet pas de gérer et visualiser des données 3D concernant le patrimoine architectural. La visualisation et les moyens de fournir des informations morphologiques essentielles, pour la description scientifique d'une altération, ne sont, par conséquent, pas pris en compte. De plus, cette ontologie de domaine met davantage l'accent sur des aspects qualitatifs en prenant en compte l'architecture, les altérations, les diagnostics et les interventions, mais exploite peu des données quantitatives malgré la possibilité d'intégrer des informations provenant de ces importants jeux de données analytiques. De plus, même si l'étude d'un bâtiment peut se faire in situ grâce à des outils mobiles d'annotations d'images, il n'est pas possible de visualiser a posteriori des régions spatialisées montrant des altérations caractéristiques. Les seuls aperçus qu'il est possible de visualiser sont des prises de vue du site sans aucune relation avec leurs caractéristiques spatiales. La visualisation d'images, montrant par exemple l'altération spatialisée, peut apporter une plus-value pour la caractérisation et la visualisation d'informations, recueillies in situ ou en laboratoire. Les données sont riches, mais il manque un support d'analyse multicouche cohérent présentant plusieurs niveaux de granularité. Le modèle 3D, peut fournir des données métriques précises, et apporterait à ces outils la possibilité de quantifier, avec beaucoup de précision, des aspects morphologiques et spatiaux, associées à une sémantique. Le modèle tridimensionnel a des potentialités pour supporter des annotations : un véritable support d'observations scientifiques (Figure 92).

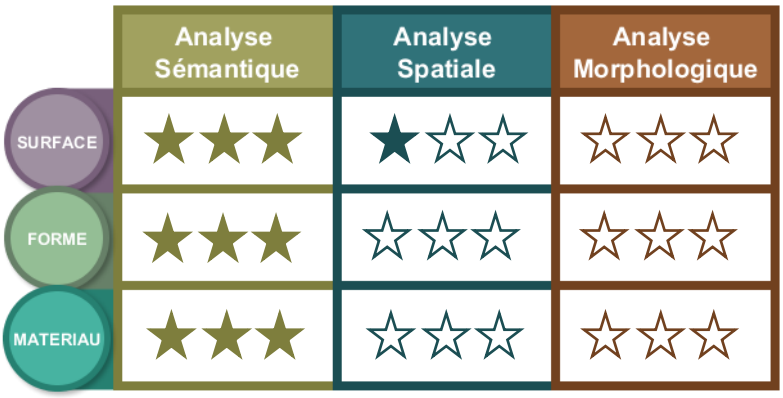


Figure 92 : Grille d'évaluation : système MONDIS.

Ces deux travaux de recherche (MONDIS et le modèle PARCOURS) sont les bases de travail sur lesquelles nous nous sommes appuyées. Ils constituent le point de départ pour initier l'élaboration de notre approche, en prenant en considération les qualités inhérentes des systèmes d'information spatiales 3D de NUBES SACRE [De Luca L., 2014] que nous avons présentés.

Chapitre 4. Proposition d'une ontologie de domaine dédiée à la spatialisation des observations scientifiques menées sur le bâtiment

La pratique de restauration du patrimoine des monuments historiques requiert la réalisation de diagnostics qui constituent une étude à part entière préalable à l'opération de restauration. De nos jours, l'ensemble du patrimoine culturel architectural est décrit avec une quantité importante de données hétérogènes. Dans le domaine de la conservation, les données issues de différentes techniques et de protocoles spécifiques (chapitre 2), pour apporter de nouvelles informations, permettent à l'expert d'expliquer l'état de conservation du bâti à travers des observations scientifiques. De plus, nous constatons que le principal obstacle rencontré par la communauté scientifique ne concerne pas l'accès à de nouveaux outils pour la création de collections de données (riches, multiformats, et multireprésentation) mais la possibilité de corréler, de croiser ces données hétérogènes afin de produire des informations pertinentes et appropriées. Un autre point important qui a été souligné concerne les verrous scientifiques au niveau du référencement spatial d'informations. Ainsi, Les données produites par les experts, à travers des supports graphiques (voir textuelles) ou d'autres types, ne sont généralement pas spatialisées autour de représentations 2D ou 3D. Même si toutes les données collectées se réfèrent au même objet physique (par exemple un bâti patrimonial), ou à une région particulière de ce même objet (par exemple une forme d'altération), le lien entre le bâti et la région est seulement basé sur une description conceptuelle mettant en jeux les connaissances propres de l'expert (ou par l'intermédiaire d'une connaissance formalisée dans un thésaurus) sans aucune référence de leurs positions spatiales réciproques. Dans les années passées, plusieurs techniques de numérisation 3D (que nous avons présenté dans la section 2.2.1.), notamment la lasergrammétrie et la photogrammétrie, ont émergé et permettent aux experts du domaine de générer des entités tridimensionnelles denses et précises du bâti patrimonial. Cependant comme nous l'avons observé, même si des technologies de relevés 3D rendent possible la création de représentations géométriques 3D de qualité, le traitement automatique de ces données 3D brutes (nuages de points, maillage, etc.) ne fournit en aucun cas d'informations pertinentes d'un point de vue sémantique. En effet, au-delà de la géométrie, l'analyse et la gestion de cette importante quantité de données hétérogènes, dans un domaine de connaissances multidisciplinaires, sont certainement le cœur du verrou scientifique. De plus, par l'analyse de l'état de l'art sur les systèmes qui tentent de prendre en compte toutes ces ressources analytiques et descriptives, la construction d'un modèle ontologique pour l'observation scientifique, à des fins de suivi de l'état de conservation des édifices patrimoniaux, semble être un moyen prometteur pour structurer des représentations tridimensionnelles intelligibles du patrimoine architectural.

Dans ce chapitre, nous proposons une solution pour réaliser, comparer et visualiser des observations scientifiques : une ontologie de domaine dédié à l'annotation sémantique 3D basée sur la réalité pour le suivi de la conservation des édifices patrimoniaux. En combinant des descripteurs quantitatifs (par exemple le calcul de la surface occupée par une altération

sur un bloc de pierre) et qualitatifs (par exemple le terme définissant un phénomène d'altération tiré d'un glossaire) d'annotations 3D interconnectées (grâce à des concepts sémantiques reliés aux régions spatiales 2D/3D), cette ontologie dédiée intègre les données, informations et connaissances pour décrire et suivre les phénomènes de dégradation, responsables de la modification du cycle de vie de l'objet patrimonial. Le but est donc d'assister et guider les experts de la conservation à l'aide d'un processus d'aide à la décision. Notre approche pour l'annotation 3D du bâti patrimonial, reliée à une représentation formelle de connaissances structurées, constitue une solution pour guider l'analyse collaborative de l'état de conservation vers l'implémentation progressive d'une représentation consensuelle et partagée de ce domaine de connaissance.

Dans un premier temps, nous présenterons les différentes dimensions que nous souhaitons intégrer dans notre approche. Pour certaines d'entre elles, un état de l'art a été réalisé sur les avancées au niveau technique, afin de choisir la solution la plus pertinente et la plus adaptée à notre approche. Nous nous intéresserons ensuite à une première tentative de conception d'un système d'information mis en place pour l'intégration des données. Ce travail constitue une bonne base pour notre projet de recherche. Nous présenterons ensuite notre méthode, afin d'exploiter les dimensions représentatives au sein d'un modèle ontologique dédié à la corrélation multidimensionnel d'annotation sémantique pour l'étude de la conservation du patrimoine architectural.

4.1. Aspects descriptifs et analytiques pris en compte

Comme nous avons pu le souligner dans les précédentes parties, les experts de la conservation réalisent toute une panoplie d'acquisitions, in situ et en laboratoire, en vue de produire des informations pertinentes quant à la conservation de l'édifice. Au vu des types d'informations extraits, nous avons pu observer qu'un diagnostic complet fait référence à trois composants distincts (Figure 93). Premièrement en réalisant des cartographies (d'altération ou de matériau par exemple) à travers une étude des surfaces identifiant des entités remarquables, l'expert met en avant, à travers une analyse, une **description visuelle**. Cette description s'appuie sur les données, informations et connaissances concernant l'aspect visible de la surface. Deuxièmement les mêmes experts, ou d'autres, en charge de la documentation métrique, réalisent des acquisitions et génèrent des données tridimensionnelles à partir d'images ou à partir d'un scanner laser visant à mettre en exergue un autre type d'information : des **informations géométrico-visuelles et morphologiques** ; donc en d'autres termes, l'intégrité générale de la forme de l'objet ou d'une partie de l'objet considéré. Puis enfin, troisièmement les acquisitions d'échantillon physique permettent de connaître, à travers d'autres études, la composition et le comportement des matériaux, et probablement de comprendre comment une altération se manifeste, en ayant une volonté certaine d'acquérir **des informations physico-chimiques** (des matériaux notamment). Chacune de ces caractéristiques possède son propre champ d'expertise et peut être obtenue à partir d'acquisitions différentes. Ce que nous retenons de ce constat, c'est que l'expert dans

son processus d'analyse et de diagnostic s'appuie sur ces trois groupes d'informations et souhaite obtenir des renseignements en réponse à une stimulation soit par rapport à des résultats d'une précédente analyse, soit grâce à sa perception visuelle qui lui a permis de prendre une décision sur une action à mener (futures acquisitions) et donc repousser son raisonnement. Par exemple, un groupe de scientifique de la conservation peut se rendre in situ dans le but d'observer un bâtiment, et découvrir une surface altérée par des phénomènes de dégradation bien localisés sur l'enveloppe du bâti. Même si celui-ci possède ou non les connaissances appropriées pour définir ce type de phénomène, il se base sur l'apparence visuelle et la distribution spatiale, afin d'identifier une entité remarquable, ce qui lui permet de réaliser des cartographies. À la suite de cette étape de caractérisation d'éléments, il est possible de mettre en place d'autres types d'acquisition notamment pour acquérir l'enveloppe du bâtiment (par des moyens d'acquisition tridimensionnelles) et identifier précisément d'éventuelles relations quantitatives entre le visuel et la géométrie. Ceci appelle ensuite à d'autres acquisitions localisées (voire même spécifique à des zones précises) pour la définir les propriétés (physique et chimique) et la nature physico-chimique du matériau observé.

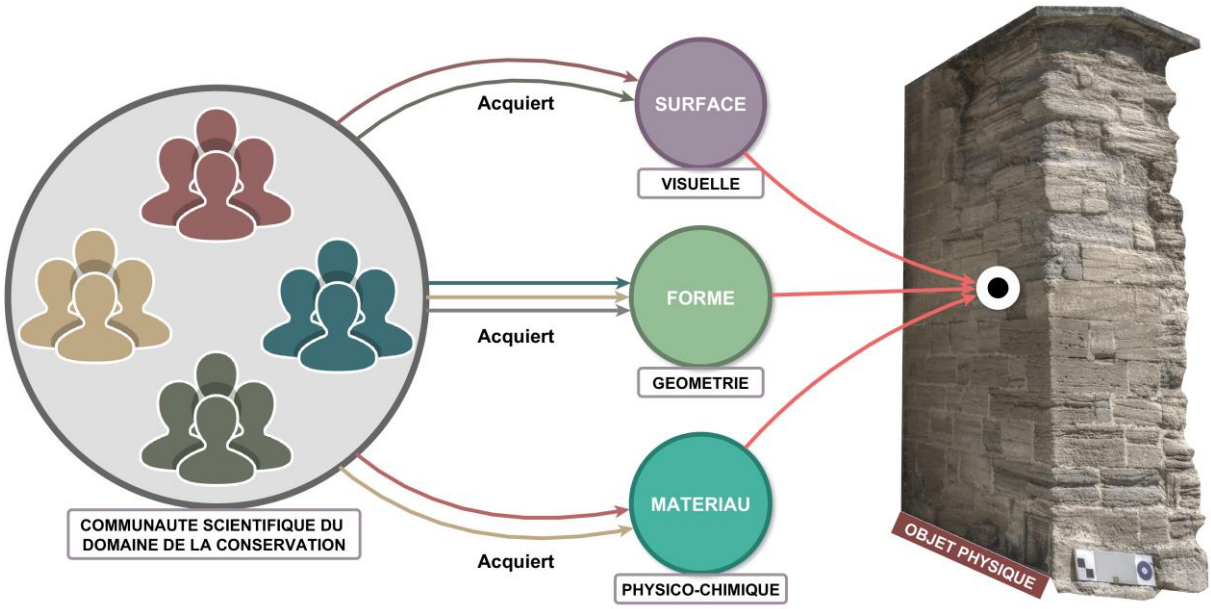


Figure 93 : Trois catégories d'études d'un point de vue de l'expert pour la prise en compte de toutes les composantes de la conservation.

Nous distinguons donc trois niveaux d'étude de terrain distincts basés sur une entité observable et qualifiable pouvant être intégrés dans un modèle de plus haut niveau. L'ontologie de domaine semble être une solution pertinente pour prendre en considération, à travers une structuration sémantique, la description de l'ensemble des opérations menées par les experts, et allant de la phase d'acquisition jusqu'à la proposition d'un diagnostic.

L'objectif principal, pour un suivi optimal de la conservation du patrimoine, tient à la production d'un système capable de combiner, d'une part, un aspect quantitatif à travers des données et informations acquises sur le terrain ou en laboratoire, puis d'autre part, un aspect qualitatif pris en compte à travers un modèle de connaissances partagées décrivant le

domaine de la conservation. Ces deux aspects pourront se combiner et s'exprimer pleinement en utilisant un support d'analyses multicouches, afin de réaliser des observations à plusieurs niveaux de granularité. La base de données, créée en parallèle, permet de stocker toutes les ressources relatives au domaine. Elle constitue une brique fondamentale lors de la modélisation de l'ontologie de domaine, car les décisions relatives à la conception en sont dépendantes [Pierra G. et al., 2005]. L'ensemble de l'approche proposée pour la conception de l'ontologie de domaine est basée sur la fusion de trois dimensions : une dimension spatiale (via des annotations), enrichie par la dimension morphologique, et qualifiée à travers des connaissances préétablies apportées par la dimension sémantique (Figure 94).

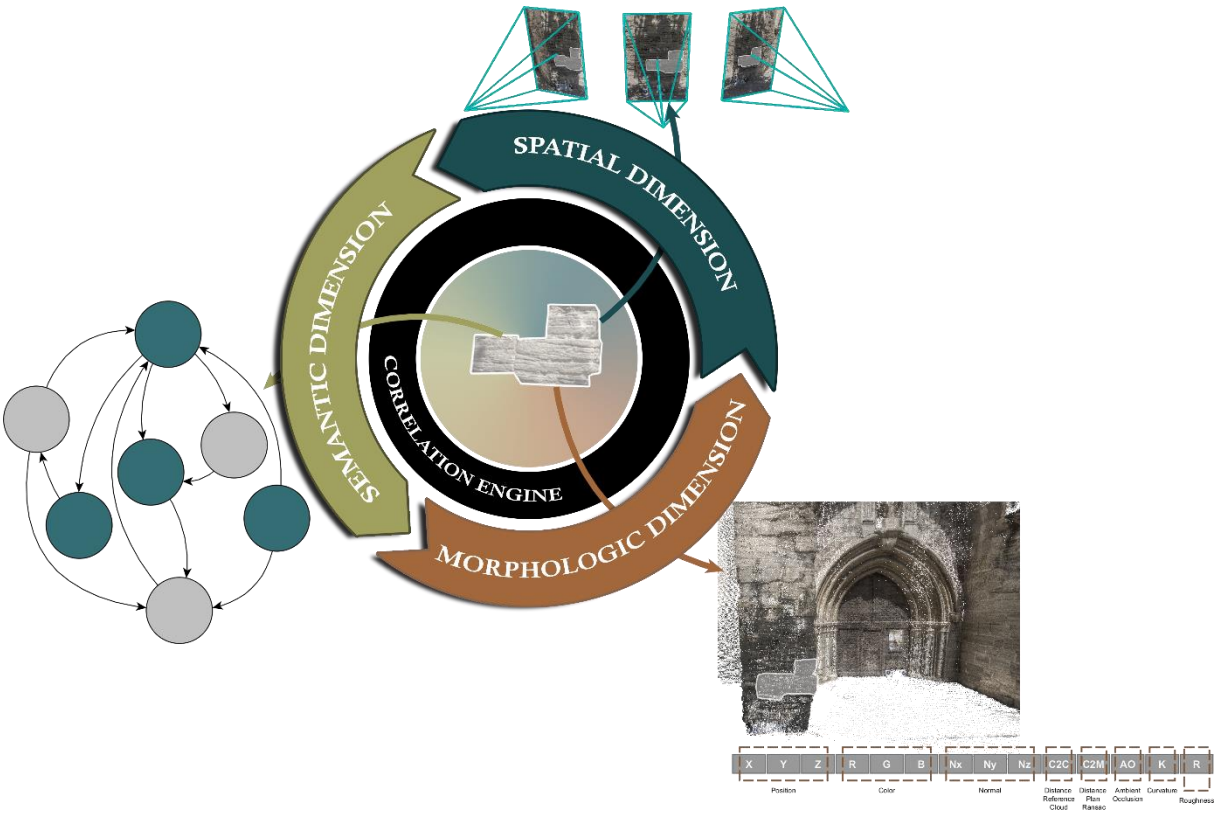


Figure 94 : Approche par corrélation multidimensionnelle pour le suivi de la conservation du patrimoine culturel bâti.

4.2. Intégration des dimensions sémantique, spatiale et morphologique

La prise en compte de l'aspect quantitatif et l'aspect qualitatif, constitue une solution pertinente pour décrire aussi efficacement que possible l'état de conservation des édifices patrimoniaux. En outre, la question centrale que nous nous sommes posés au cours de la définition de cette approche est : comment concevoir et implémenter une représentation formelle des connaissances de la conservation capable de corréler des descriptions quantitatives et qualitatives d'une construction complexe ? De plus comment peut-on ontologiquement relier de tels aspects divers dans un système d'informations spatio-temporelles ?

L'approche générale (Figure 95) est principalement basée sur la construction d'un moteur de corrélation impliquant les trois dimensions. Tout d'abord, la dimension sémantique, présentée dans la section 4.3., intègre et organise, par une méthode de conception choisie, l'ensemble de connaissances à travers des termes utilisés par les experts pour décrire l'état de conservation. La génération d'information est issue de ce croisement conceptuel. Ensuite, la dimension spatiale, décrite dans la section 4.4., exploite un système d'annotation 3D dont la conception est basée sur des acquisitions in situ. Cette dimension donne la possibilité de spatialiser des annotations réalisées par des experts au sein d'une représentation géométrique 3D multitemporel. Et enfin, la dimension morphologique, développée en section 4.5., repose sur l'extraction d'informations géométrico-visuelles attachée à une représentation 3D et liée à des annotations. Cette dernière dimension permet de connecter des concepts de l'ontologie de domaine (par exemple le terme *« Pilier »*), avec des descripteurs morphologiques, déterminants pour analyser et classifier les régions. Les informations extraites de ces trois dimensions prises en compte au sein d'un unique modèle conceptuel forme alors un moteur de corrélation multidimensionnel.

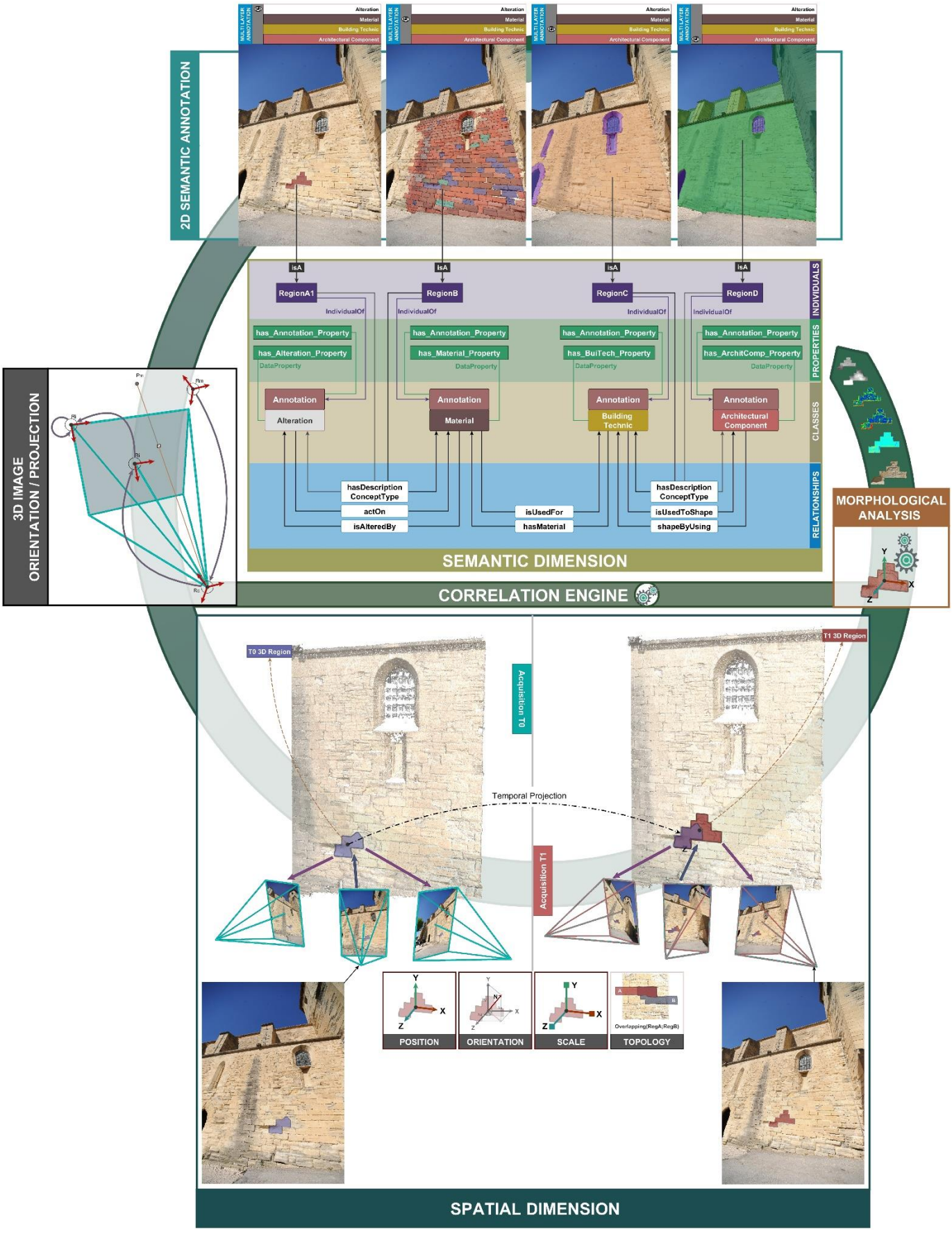


Figure 95 : Approche générale multidimensionnelle.

L'exploitation des dimensions sémantiques, spatiale et morphologique, recouvre l'ensemble des analyses et observations menées sur le patrimoine construit pour le suivi de la conservation.

Dans les prochaines parties, nous tentons de présenter l'association de quelques éléments de l'état de l'art, en lien avec les différentes dimensions, puis notre contribution en exploitant les différents points de départ. Nous avons modélisé une ontologie de domaine qui prend en considération ces dimensions. Toutefois, pour chaque dimension, des choix méthodologiques ont été nécessaires afin d'orienter la conception ontologique et de gérer leurs articulations.

4.3. La dimension sémantique : représentation des connaissances à travers une ontologie de domaine

La dimension sémantique constitue la structure maîtresse de l'ensemble de notre approche orientée système, car c'est elle qui est responsable de la description et la corrélation des données et informations acquises pour l'étude de la conservation. À travers une analyse de la littérature relative aux pratiques diagnostiques, combinée à l'étude approfondie des données - information - connaissance (section 2.) généralement acquises et mobilisées dans les campagnes d'études, nous avons identifié quatre classes sémantiques dont l'intégration permet de prendre en considération tous les aspects qui interviennent dans l'observation et dans l'analyse de l'état de conservation des édifices maçonnés.

La dimension sémantique est donc basée sur la superposition de quatre classes de descriptions thématiques (niveau de lecture) fournies par le cœur de notre ontologie de domaine : « *Matériau* », « *Technique de Construction* », « *Composant Architectural* » et « *Altération* » (phénomène de dégradation). Tout au long de cette partie, nous allons développer la méthode et les moyens que nous avons mis en place pour permettre l'intégration des ressources acquises tout au long du processus d'observations scientifiques aux quatre niveaux de description.

4.3.1. Conception du cœur ontologique et modèle générique de référence conceptuel : point de départ

4.3.1.1. Modélisation conceptuelle : conception de l'ontologie de domaine pour la conservation

Comme nous l'avons développé dans la section 3.4., la construction d'une ontologie de domaine demande une attention particulière et une rigueur importante dans sa conception. La création de notre ontologie se base sur la méthode Lassila (section 4.3.1.1.). Nous avons développé une ontologie en réponse à une problématique de **conservation d'édifices patrimoniaux en pierre**. En outre, Le processus de conception requiert plusieurs experts du domaine (architectes, scientifiques de la conservation et ingénieurs étudiant les matériaux de construction) impliqués dans notre projet [De Luca L. et al., 2014] pour

consensuellement valider un vocabulaire contrôlé, dont les termes ainsi que leurs significations restent stables durant le processus de conception. Ce vocabulaire se réfère à des glossaires de références considérés comme renfermant les connaissances partagées du domaine : le glossaire illustré des formes d'altération de la pierre (appelé ci-après glossaire « pierre ») [Verges-Belmin V., 2008] et le vocabulaire de l'architecture [Pérouse de Montclos J. M., 2004]. Au travers de l'étude de ces deux glossaires, nous avons modélisé la structure des thésaurus thématiques notamment pour les techniques de construction (appareillage, agencement des pierres pour constituer un élément architectural), les composants architecturaux, les matériaux et les altérations. À la suite de cette étape, un premier thésaurus est construit pour chaque classe afin de définir précisément les relations complexes et structurées entre les termes. À la fin de cette étape, nous avons à notre disposition une ontologie de domaine dite « légère », qui est utilisée comme squelette et qui permet l'ajout progressif de termes, de règles d'inférence, des contraintes et enfin des axiomes. Pour cette phase, nous avons utilisé le langage OWL (section 3.4.4.). Il manipule des connaissances et il fournit également une certaine flexibilité en termes de description à travers RDFS (section 3.4.3.).

4.3.1.1.1. Construction de l'ontologie de domaine

Comme indiqué précédemment, nous nous sommes basé sur la méthodologie de Lassila [Lassila O. et al., 1999] [Hernandez N., 2005] pour construire notre ontologie de domaine. C'est une base pour entreprendre notre approche afin de respecter certaines règles. La Figure 96 montre la représentation des connaissances au sein d'un modèle avant d'obtenir une ontologie.

La méthode dont nous nous sommes inspirés est séparée en deux parties appelées respectivement « phase de documentation et de décision » **(1.)** et « phase d'intégration » (dissociée symboliquement par un pointillé) **(2.)**.

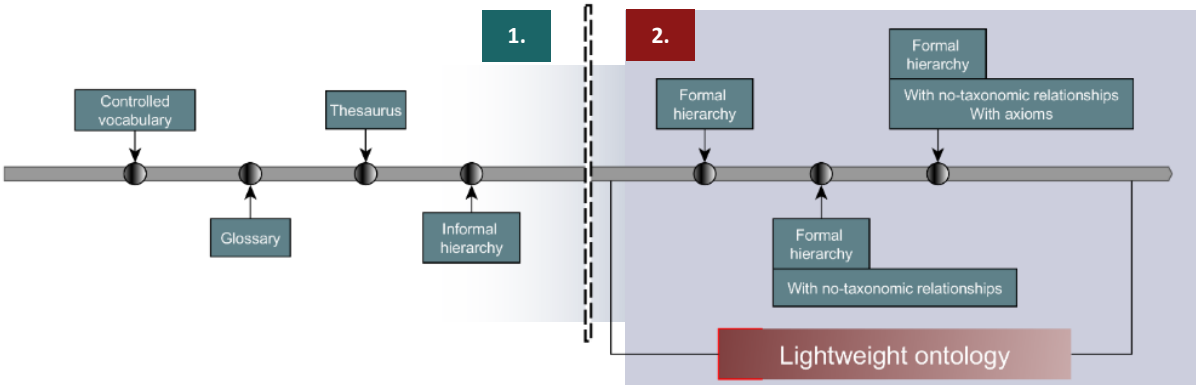


Figure 96 : Schéma représentant la méthode de Lassila [Hernandez N., 2005].

Phase de documentation et de décision :

Nous allons définir les différents termes qui constituent ce schéma. Comme nous pouvons le constater, le processus pour que notre ontologie passe d'un qualificatif dite légère (ENG : Lightweight Ontology) à lourde (ENG : Heavyweight Ontology) [Gómez-Pérez A., et al., 2002], passe par plusieurs étapes incontournables.

Tout d'abord, le **vocabulaire contrôlé**. Les experts de différents sous-domaines déterminent de manière consensuelle un vocabulaire spécifique au domaine d'étude qui reste non modifiable pendant tout le processus de conception. Ces termes identifiés seront destinés, par la suite, à devenir les concepts et les classes de notre ontologie de domaine. Leur signification n'est pas définie à cette étape, ni leurs liens de subsumption (Figure 97).

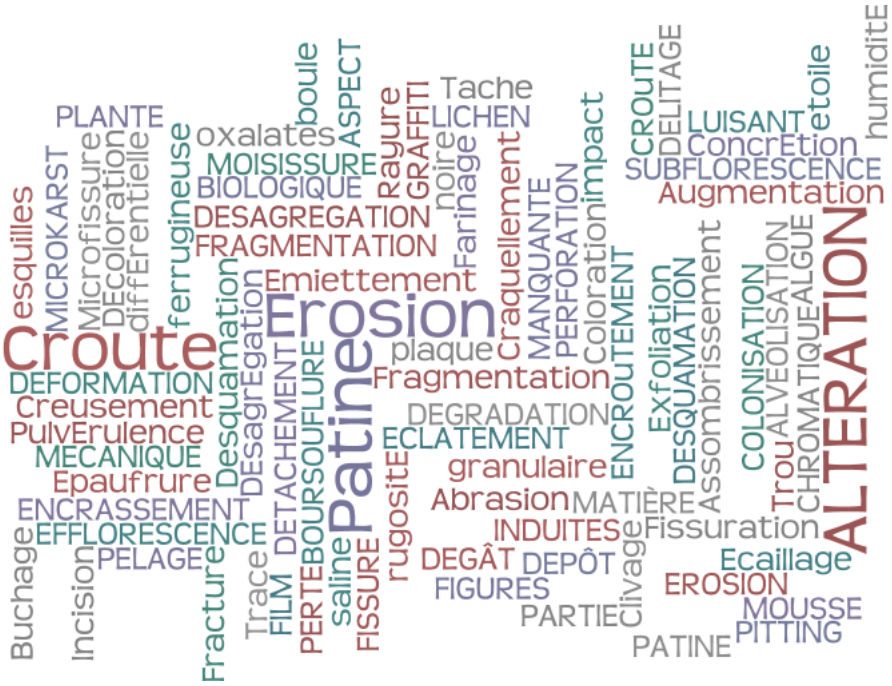


Figure 97 : Vocabulaire contrôlé sur les formes d'altérations de la pierre.

Après cette étape d'identification des termes, il est primordial de leur donner une signification. Par définition, un **glossaire** est un recueil de gloses, c'est-à-dire une liste alphabétique de termes d'un domaine de connaissances particulier avec la définition de tous ces termes (Figure 98). Le glossaire illustré sur les formes d'altération de la pierre [Verges-Belmin V., 2008] répond à ces caractéristiques.

À cette phase, la « compréhension » au niveau informatique n'est encore pas possible, car c'est un modèle dépourvu de logique (informatique).

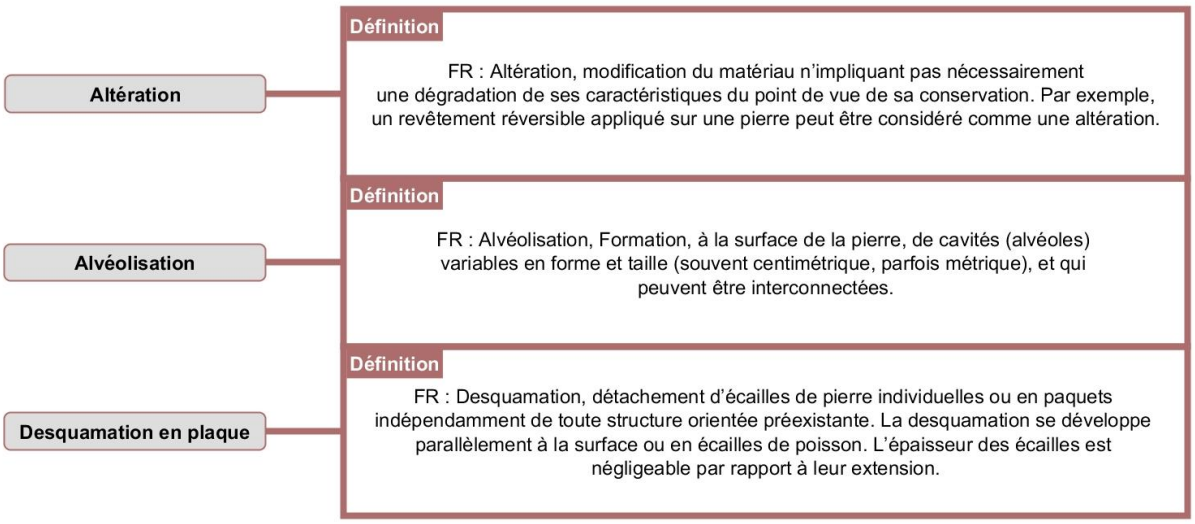


Figure 98 : Exemples de Gloses du glossaire « pierre » issu d'un accord consensuel de définition de termes en français (FR) [Verges-Belmin V., 2008].

Nous avons ensuite réalisé un thésaurus. Avant cela, nous avons structuré ces termes dans une représentation **taxonomique**. Nous avons donc positionné hiérarchiquement un concept par rapport à un autre selon un ordre précis. Celui-ci, exprimé en français par l'expression « *est-un(e)* » ou en anglais « *isA* », est appelée relation de « généralisation », et inversement une relation de « spécialisation ». Ce type de structuration souligne donc une relation d'encapsulation qui stipule qu'un concept fait partie d'un autre : ce sont des relations d'inclusion entre les extensions de ces concepts.

Dans le domaine de l'ontologie, le terme « subsomption » est utilisé. On parle ainsi de « liens de subsomption » et nous dirons que le concept « *Altération* » **subsume** le concept « *Détachement* », ou inversement, que le concept « *Détachement* » **est subsumé par** le concept « *Altération* ». Les termes provenant des formes d'altérations de la pierre ont été structurés en fonction de la morphologie de surface.

Nous avons, à partir de cette étape, initié la création des propriétés (relations non-taxonomiques) entre les différents concepts (termes du glossaire). Le **thésaurus** est un ensemble de termes organisé suivant un nombre restreint de relations. Il indique le type de vocabulaire qui relie les termes en utilisant des types de relations sémantiques. Le thésaurus est également défini comme un « vocabulaire contrôlé arrangé dans un ordre connu et structuré, de sorte que les relations d'équivalence et associatives, parmi les termes, soit affiché clairement et identifié par des indicateurs de relations standard employés réciproquement » [NISO, 2005]. En outre, dans certains cas, nous pouvons dire « ce terme est à utiliser à la place de ce terme ». Le thésaurus est lié fortement à la hiérarchie formelle qui propose des relations plus fortes entre les concepts : du général au particulier (Figure 99). De plus, si ces termes sont disponibles, au-delà de l'aspect hiérarchique que fournit la taxonomie, le thésaurus propose un élargissement de celle-ci en intégrant d'autres propriétés pour décrire des sujets :

- « Terme plus large » ou « **Broader term** » (BT) qui se réfère au terme de niveau supérieur au niveau de la hiérarchie avec son inverse « terme inférieur » ou « Narrow Term » (NT) désignant un terme plus spécifique.
- « Note de portée » ou « **Scope Note** » (SN), désigne le texte et la portée de description du terme.
- « Utilisation » ou « **USE** » décrit le contexte d'utilisation de ce terme
- « Terme le plus haut » ou « **Top Term** » (TT) identifie le terme supérieur au somment de la hiérarchie.
- « Terme relié » ou « **Related Term** » (RT) désigne le terme relié par des relations moins directes que BT ou NT.

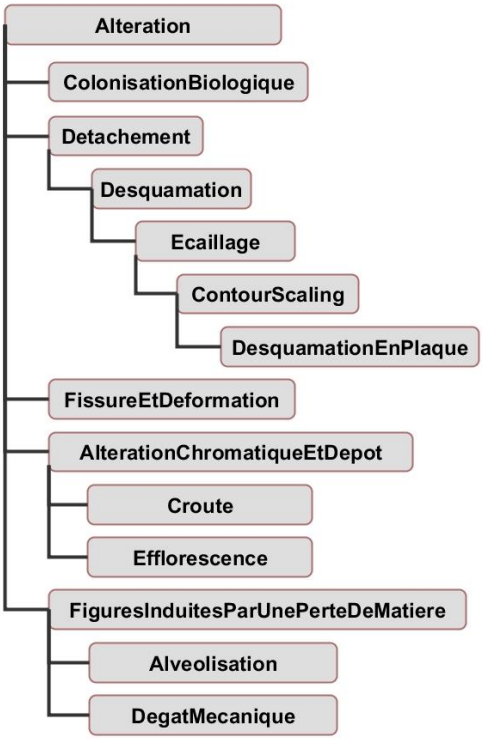


Figure 99 : Exemple d'échantillon de Taxonomie structuré après la définition des termes du glossaire « pierre ».

Phase d'intégration :

Au cours de cette phase, évoluant à de simples termes vers une hiérarchie informelle, nous avons intégré ces concepts dans un éditeur d'ontologie : *Protégé*. Cet éditeur permet d'établir de nouvelles relations. La hiérarchie formelle est une représentation qui permet à l'ordinateur de l'interpréter. Tous ces blocs sont gérés par l'éditeur de l'ontologie, en vue de créer des relations taxonomiques (une relation qui spécifie qu'un concept A est un sous-type d'un concept B par exemple) et d'ajouter des relations non taxonomiques et axiomatiques pour que nous obtenions une ontologie lourde. Un axiome est défini comme étant « une vérité indémontrable qui doit être admise », c'est-à-dire quelque chose d'évident. Dans notre processus de conception, nous sommes amenés à en créer afin de bloquer des affirmations et définir des règles.

4.3.1.1.2. Définition des classes de description de la conservation des bâtis maçonnés et mise en relation

Comme nous l'avons déjà explicité, une ontologie de domaine est un modèle conceptuel renfermant et formalisant des connaissances d'un champ. Ceci se caractérise non seulement par la définition de classes de description (voir ci-dessus) mais également à travers leurs mises en relations via des propriétés. Les données intégrables d'une ontologie peuvent être de différentes natures. Tout d'abord, les *Individus* sont des éléments importants, car c'est cette entité qui nous permet de réaliser des inférences en liant un terme à une annotation. Les individus représentent les objets du domaine dont nous nous intéressons : nous pouvons appeler ceux-ci, les individus du domaine ou instance de l'ontologie de domaine.
Par exemple, l'annotation de couleur rouge et l'annotation de couleur verte, que l'on peut observer sur la Figure 100, « est-un(e) » **individu de** « *Annotation* ». Ces deux régions ont été désigné comme étant une « *DesquamationEnPlaque* », une classe spécifique d'altération, via la propriété d'objet « aUnTypeDeConceptDeDescription ». Au même titre que toutes les églises, du monde entier, sont des entités du type de concept « *Église* », car répondent à des caractéristiques quantitatives et qualitatives précises stipulant que ce sont des églises. Un individu représente donc un exemple, une entité, une instance d'un concept explicitement défini.

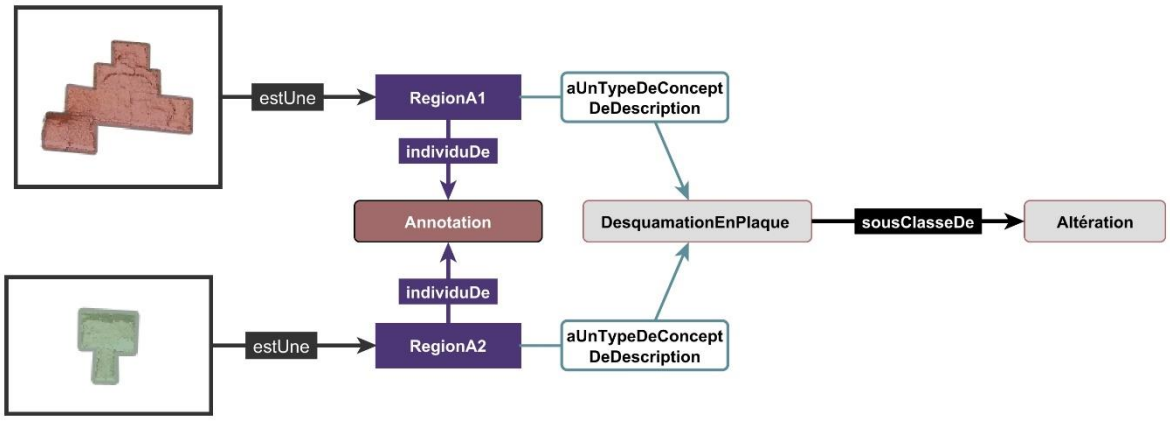


Figure 100 : Deux instances d' « Annotation » lié au concept « DesquamationEnPlaque » : « RegionA1 » et « RegionA2 ».

Comme exprimé dans la section 4.4., le processus d'annotation sémantique instancie des individus (ou *Individuals*) des classes de l'ontologie en spatialisant des régions accompagnées d'observations scientifiques supportées par des représentations 2D/3D. Dans la Figure 103, sont présentées les propriétés d'objets (ou *Object properties*) de notre cœur ontologique. Les propriétés objet en OWL (Section 3.4.3.) sont utilisées pour relier un(e) concept/classe/Individu à un autre en lui donnant des caractéristiques pour le décrire. Cette relation peut être de différents types. Particulièrement grâce au langage OWL, les propriétés d'objet peuvent avoir des caractéristiques différentes en étroite relation avec leurs typologies. Il existe des propriétés fonctionnelles, des propriétés fonctionnelles inverses, des propriétés transitives, des propriétés symétriques, des propriétés asymétriques des propriétés réflexives, et enfin des propriétés irréflexives. En OWL, ces diverses typologies servent à ajouter des

règles d'inférences lorsque nous raisonnons sur les données (individus) grâce au raisonneur. Par exemple, si une propriété est fonctionnelle, pour un individu donné, il peut y avoir au plus un seul individu qui soit relié à un autre individu via cette propriété. La Figure 101 montre une propriété fonctionnelle « *estLocaliséA* » reliant un individu de la classe « *Édifice Maçonné* » constituant le domaine de la propriété (origine) et un individu de la classe « *Ville* » représentant la portée de la propriété (vers lequel la propriété pointe).

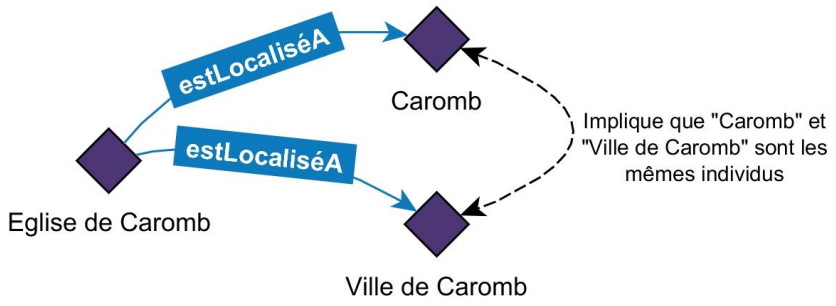


Figure 101 : Exemple de propriété fonctionnelle.

Étant donné que c'est une propriété que nous avons défini comme étant fonctionnelle, elle ne peut être connectée qu'avec une entité (« Caromb ») représentable par plusieurs individus. Dans cet exemple-ci, il est pertinent de l'utiliser, car nous avons la connaissance qu'un édifice en particulier ne peut se trouver que dans une ville et pas davantage. La propriété fonctionnelle inverse représente l'inverse de la précédente via une propriété choisie nommée « *estLaLocalisationDe* » en inversant le sens des flèches.

La propriété transitive est également très utile pour notre conception. Si une propriété est transitive et que celle-ci relie un individu *a* avec un individu *b* et également un individu b à un individu c, alors nous pouvons inférer par raisonnement que l'individu *a* est lié à l'individu *c* via cette propriété. C'est le cas de la propriété transitive « *estComposantDe* » liant un composant architectural (domaine) avec un autre composant architectural (portée) (Figure 102).

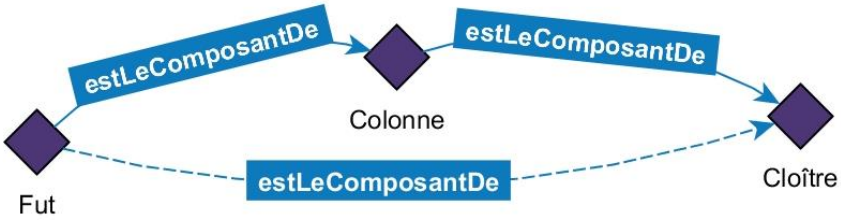


Figure 102 : Exemple de propriété transitive.

La recherche d'information par le raisonneur sera plus efficace car, même si l'utilisateur ne connaît pas spécifiquement le concept, il pourra en connaître le type ou même savoir, dans notre exemple, l'individu racine (cloître).
Avant d'obtenir un cœur ontologique stable, nous nous sommes basé sur l'ensemble des connaissances des experts « multi-domaines ». Cette riche multidisciplinarité implique des

domaines essentiels tels que l'informatique, la pétrologie, la chimie et la physique des matériaux de peintures murales, la mécanique structurelle, l'histoire des monuments historiques, l'architecture et la métrologie. Ces connaissances ont été formalisées consensuellement à partir d'interviews et d'analyses croisées de références bibliographiques propres au domaine d'expertise. De cette façon, nous avons défini ce cœur ontologique contenant les classes principales et leurs relations (propriétés d'objets).

Selon les connaissances expertes du domaine, nous pouvons décrire la conservation du patrimoine culturel à travers ces quatre classes nécessaires et suffisantes reliées entre elles par des propriétés d'objet (Object Property) standards caractéristiques (Figure 103) : « dans le domaine de la construction de maçonnerie, un matériau **(1)** est utilisé pour une technique de construction **(2)** et il forme un composant architectural **(3)**. Puis, une altération **(4)** agit sur le matériau ». Nous nous sommes inspirés des travaux de recherche réalisés lors du projet NUBES pour la création de concepts thématiques pour une catégorisation des entités observées [De Luca L., 2014]. Comme nous l'avons déjà spécifié, chaque classe est définie et correspond au concept de plus haut niveau du thésaurus qu'il décrit. Comme il est possible de le constater, nous avons fait le choix de réaliser des propriétés inverses afin de faciliter le raisonnement de l'ontologie de domaine, et d'assurer une certaine flexibilité d'un point de vue de l'extraction de l'information. De cette manière, il est possible de croiser toutes les données liées disponibles avec chaque type d'annotation appartenant au concept correspondant en impliquant l'ensemble de l'ontologie de domaine.

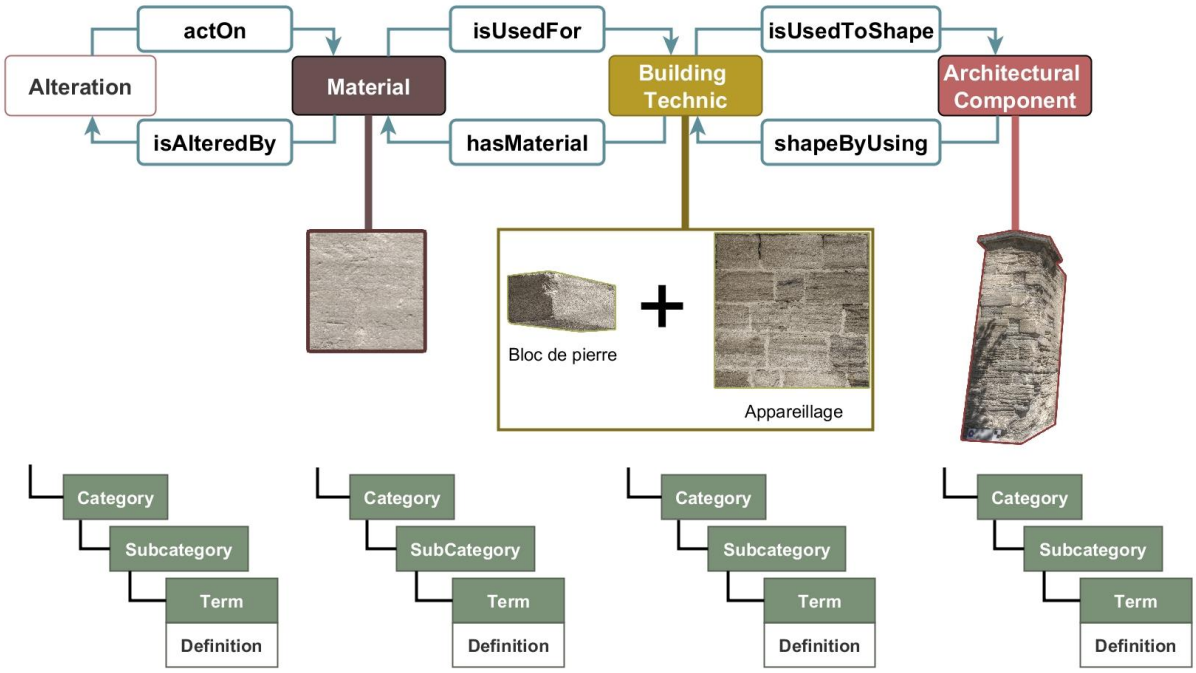


Figure 103 : Ontologie de domaine décrivant la un état de conservation patrimoine (en anglais).

Sous cette forme, nous avons la possibilité de caractériser la conservation du patrimoine architectural à un instant t. Nous verrons dans la section 4.3.1.2., que l'utilisation d'un modèle générique propose un formalisme afin de gérer les états temporels de l'édifice. Ce type de

modèle est essentiel pour la description « temporelle » des changements en lien direct avec la constitution de l'édifice (concernant les altérations et les matériaux par exemple). Le levier essentiel de l'interconnexion des différentes dimensions repose sur la définition de ces 4 classes de description nécessaires et suffisantes. Elles constituent les fondations de notre échafaudage conceptuel pour clarifier l'ensemble des interrelations qui permettent par combinaison de décrire les phénomènes de dégradation du bâti.

4.3.1.1.3. Descripteurs caractéristiques des concepts de l'ontologie

Une autre caractéristique importante est intégrée au sein de notre modèle conceptuel et permet notamment de relier les concepts/classes/individus à des aspects quantitatifs : les propriétés de données (ENG : Data Properties). Les propriétés d'objet, relient un individu à un autre alors que les propriétés de données, relient un individu avec des valeurs de données (ENG : datatypes) en schéma XML (métadonnées) ou en littéral RDF. En d'autres termes, ces propriétés décrivent les relations entre l'individu et ses aspects quantitatifs. Ce travail constitue un grand pas en matière de conception, car il nous permet de définir explicitement les moyens exploités pour décrire les entités. Nous avons soumis une étape d'interrogation à chaque domaine expert de la conservation. Nous avons uniquement pris une image annotée en leur demandant : quels types de données - informations - connaissances est-il possible d'exploiter pour décrire cette région, et quels moyens faut-il mettre en œuvre pour les acquérir ? Le processus utilisé par l'expert est une observation scientifique, car il identifie quelque chose sur un support graphique ou même in situ et il argumente en justifiant la raison pour laquelle il a choisi ce terme pour le désigner.

Nous sommes partis du fait que si un expert désigne une zone sur une image, c'est qu'intrinsèquement il a identifié quelque chose de remarquable. Donc l'annotation ou la zone identifiée constitue la conclusion d'une démarche argumentée de l'expert. Les experts utilisent ce que l'on appelle des méthodes scientifiques dans lesquelles il est possible de généraliser plusieurs étapes. La méthode scientifique est définie comme étant « l'ensemble des canons guidant ou devant guider le processus de production des connaissances scientifiques, qu'il s'agisse d'observations, d'expériences, de raisonnement, ou de calculs théoriques » [Richards R. J. et al., 2016] (Figure 104).

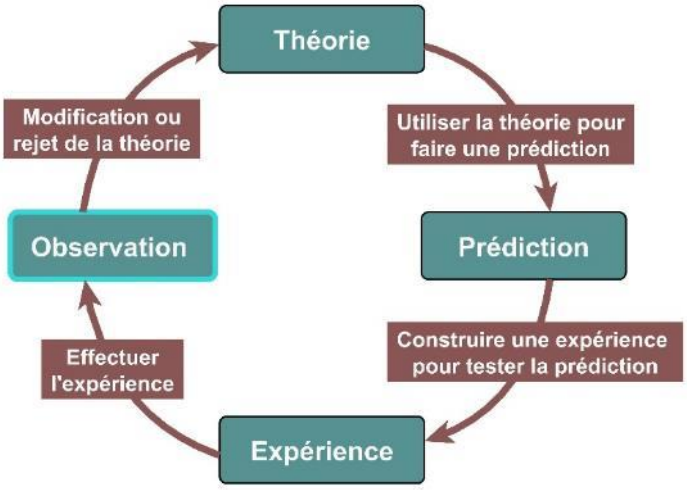


Figure 104 : Cycle d'une méthode scientifique intégrant l'observation d'après [Samuel K. T., 1972].

Parmi les étapes intégrantes de ce processus, nous y retrouvons l'observation. L'observation est défini comme « une expérience de sélection et de recueil d'informations sur un phénomène, objet d'étude, en vue de dégager des hypothèses ou de vérifier celles découlant d'observations antérieures » [Daston L., 2008].

La base de notre principe de modélisation est formée comme suit : la combinaison d'une phase d'identification et d'une phase de désignation représente le processus d'observation scientifique (Figure 105).

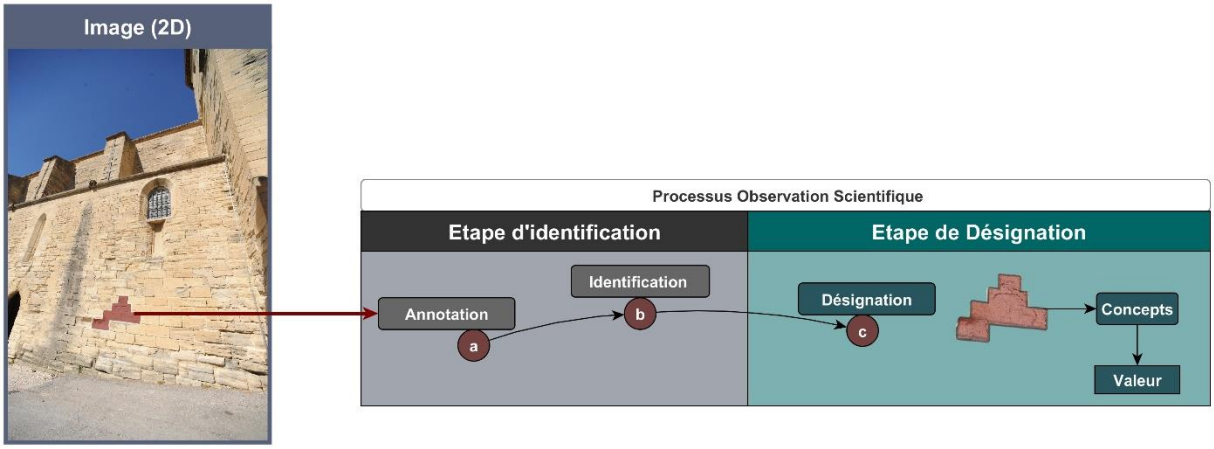


Figure 105 : Processus d'observation scientifique porté par l'annotation : identification et désignation.

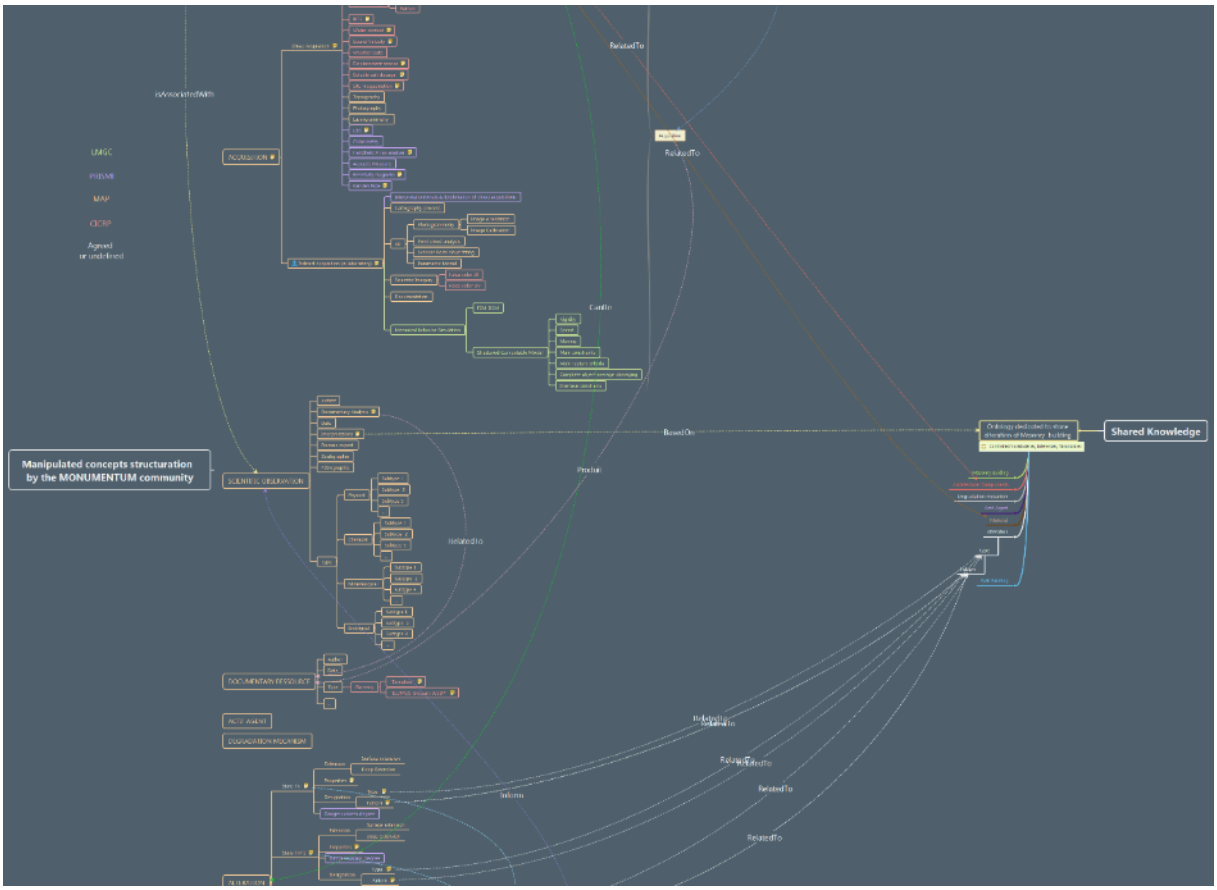


Figure 106 : Schéma conceptuel issu de la définition consensuelle des descripteurs du domaine de la conservation.

Une identification est définie comme étant « *l'activité d'un sujet qui rapproche une information actuelle avec une information précédente, déjà élaborée sous forme de schème, de schéma ou de percept. (L'identification est à la base de la perception)* » [Larousse, 2017]. Puis une désignation est « une action de désigner et de signaler avec précision » ou encore une action de « représenter quelqu'un ou quelques choses par le langage ou par un symbole ; traduire ; signifier » [Larousse, 2017]. D'un point de vue sémantique, et en rapport avec notre modèle conceptuel, nous avons défini l'observation scientifique comme étant le porteur de la capture d'information, à travers une annotation, de la part de l'expert dans son raisonnement cognitif.

La justification de la désignation terminologique, se fait par la sélection de supports analytiques et documentaire. Dans notre ontologie de domaine, nous avons défini un thésaurus concernant les différents types d'acquisitions menés sur le patrimoine architectural, grâce auxquelles il est possible de retrier des informations pertinentes. De manière conceptuelle, décrire ces acquisitions et de modéliser leur processus de mise en place, et connaître les types de données générées est un réel avantage. La modélisation de ces informations a pour volonté première de donner la possibilité à l'utilisateur de décrire le cheminement « cognitif » du processus d'observation lors de l'étape d'annotation sur une image. Comme nous l'avons expliqué précédemment, le processus scientifique est basé sur la réflexion de l'utilisateur identifiant et désignant une entité observable. De ce fait, il peut soit

se baser sur ses connaissances propres en ne justifiant pas son choix « conceptuel », soit sur des acquisitions de données intégrées dans le système et structurées dans l'ontologie : c'est l'argumentation (représenté par la classe « *Acquisition* » dans la Figure 108).

Les concepts utilisés pour typer les régions de la classe « *Annotation* » sont nécessairement parmi les quatre concepts thématiques de description de l'ontologie de domaine. Pour un concept donné, comme la classe « *Matériau* », nous pouvons lui associer des propriétés de données très spécifiques, et uniques constituant la valeur du concept : ce sont ses descripteurs. À la fin de cette analyse, nous avons recueilli tous les descripteurs de chaque classe thématique pour les soumettre à l'ensemble des experts (intervenant dans le projet) en vue de conserver les plus pertinents par croisement des connaissances propres à chaque corps de métier (Figure 106). Cette étape est primordiale pour obtenir également un modèle de description consensuel et partagé. Les descripteurs recueillis peuvent ensuite être intégrés dans l'ontologie de domaine.

Donc pour chaque classe, des propriétés de données ont été définies : particulièrement pour les classes « *Matériau* » et « *Technique de construction* », car ce sont les deux éléments que nous analysons par des simulations en laboratoire (Figure 107). L'ensemble des descripteurs est présenté dans les annexes (Annexe A.3.d.).
Il est essentiel de rappeler que le langage OWL prend également en considération l'héritage des propriétés, c'est-à-dire que tous les sous-concepts de ces classes de haut niveau obtiennent les mêmes propriétés d'objets et de données que leur classe-mère.
Chaque classe définie n'a pas seulement pour objectif de « qualifier » l'état de conservation du patrimoine architectural, mais également d'intégrer des entités porteuses de données qui leur sont propres.

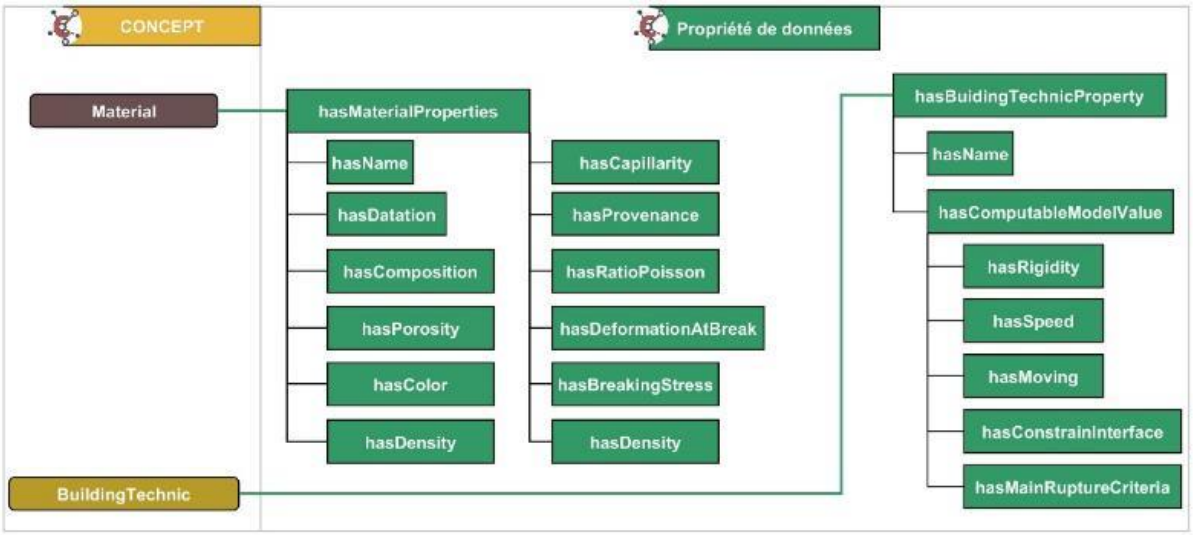


Figure 107 : Échantillon des propriétés de données des concepts "Material" et "BuildingTechnic" (en anglais).

Grâce aux descripteurs définis précédemment il est possible, à travers des inférences, de déduire, et de classifier un individu dont on ne connaît pas la qualification (désignation). Cette description permet surtout d'intégrer, de décrire et de faire exprimer toutes les données

obtenues lors de campagnes d'acquisitions et d'analyses en laboratoire. Par exemple, la classe « *Matériau* » a été définie pour porter les caractéristiques physico-chimiques, sa provenance (carrière d'extraction, localisation), datation. Puis la classe « *Technique de Construction* », ayant des rapports orientés vers des aspects structurels, décrit des individus ayant des caractéristiques relatives, d'une part, à un agencement spécifique des blocs de pierre [Cappellini V. et al., 2012] et d'autres part, inhérent au précédent, au comportement mécanique [Oikonomopoulou A., 2009]. Les relations définies entre les classes thématiques permettent de transférer les valeurs d'attributs d'une classe à l'autre. C'est-à-dire que par la classe « *Technique de Construction* », nous pouvons connaître les propriétés spécifiques du « *Matériau* » avec lequel elle est reliée via la propriété objet : « aMatériau » (FR). Au moyen de cette structuration conceptuelle, il est possible d'obtenir des informations sur les matériaux utilisés pour construire un composant architectural en particulier, ainsi que de connaître les altérations l'affectant. L'innovation de cette modélisation réside en l'exploitation et l'intégration des autres dimensions essentielles qui, spatialement et morphologiquement, créent un lien conceptuel avec l'ontologie de domaine.

4.3.1.1.4. Bilan : modèle général de l'ontologie de domaine

L'approche principale de la construction de notre ontologie se base sur la description de quatre calques thématiques d'observation. En effet, lorsqu'un expert réalise une observation sur une image à travers la réalisation d'une annotation, celui-ci désigne un terme pour définir cette dernière et donne une justification, une argumentation en s'appuyant sur des données acquises (Figure 108).

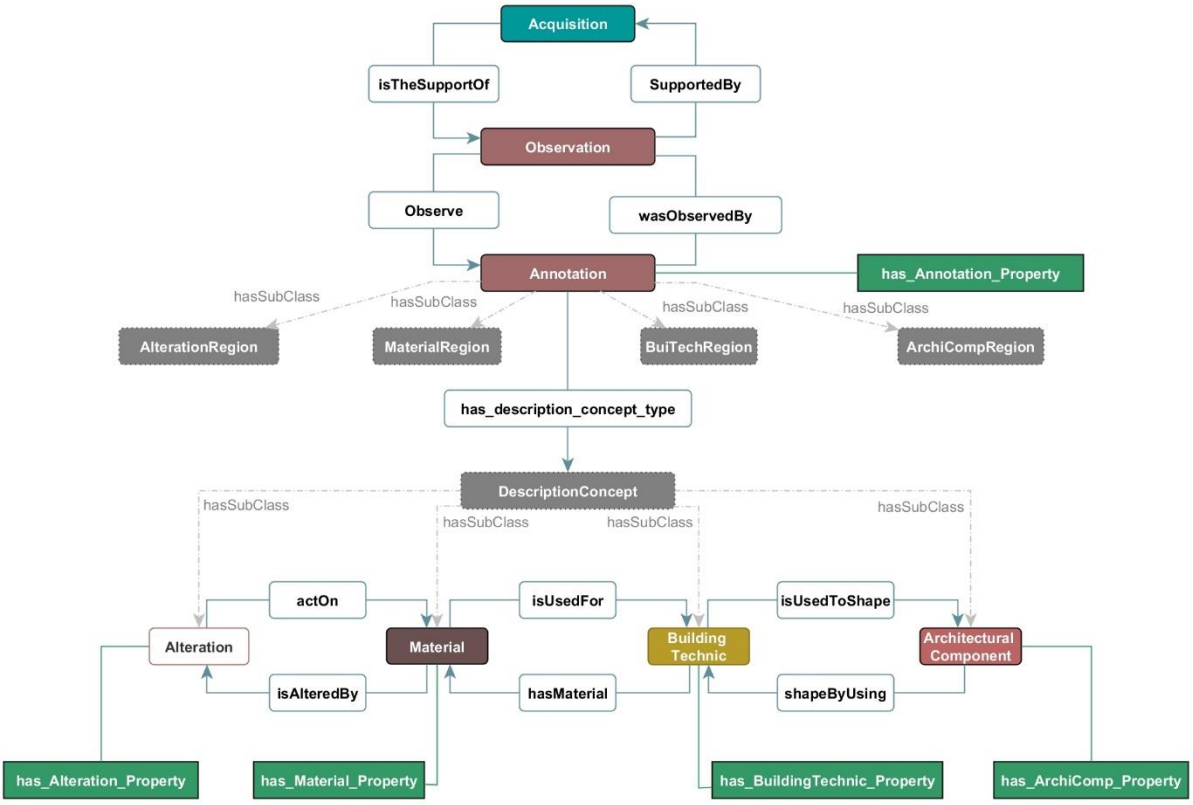


Figure 108 : Cœur structurel de notre ontologie de domaine basé sur l'observation scientifique.

Un élément important dont nous n'avons pas parlé concerne la propriété de données associée à la classe « *Concept de Description* ». Cette classe a été ajoutée et comprend les quatre classes de descriptions de la conservation, afin d'y associer des propriétés communes qui sont par héritage transmises à ces classes. C'est-à-dire que tout individu renfermant ces propriétés est forcément une des classes de description, donc une annotation. Ces propriétés de données ont été modélisées afin de prendre en considération les informations extraites des dimensions spatiales et la dimension morphologique. Nous les présentons plus en détail par la suite.
Dans la prochaine partie, nous nous intéressons à l'aspect qui constitue un point de départ pour la conception de notre ontologie de domaine. Nous avons exploité une ontologie générique de référence, disponible pour documenter les ressources qui relève du domaine du patrimoine culturel : le CRM-CIDOC.

4.3.1.2. Un modèle générique pour la documentation du patrimoine culturel : le CIDOC-CRM

Le CIDOC-CRM, International Council of DOCumentation – Conceptual Reference Model, est une ontologie générique [Doerr M., 2005]. Elle fournit des définitions et une structure formelle pour la description de concepts explicites et implicites, et les relations utilisées pour la documentation du patrimoine culturel.

Le CIDOC-CRM a l'ambition de promouvoir une compréhension partagée des informations du patrimoine culturel en fournissant un cadre extensible et commun dans lequel elles peuvent être intégrées [Doerr M., 2005]. Il a également l'ambition de constituer un langage commun, pour les experts du domaine de description, pour formuler des besoins pour les systèmes d'informations et d'être utilisé tel un guide pour les bonnes pratiques de la modélisation conceptuelle. De cette manière, il peut fournir ce que nous appelons une « colle sémantique » donnant la capacité de répondre à un besoin important en tant qu'intermédiaire entre les différentes sources d'informations du patrimoine, telles qu'elles sont publiées dans les musées, les librairies, voire même les archives [Doerr M., 2003].

Cette ontologie au format RDFS, permet de décrire plusieurs aspects. En effet, sur le terrain ou en laboratoire, l'acquisition de données est, la plupart du temps, caractérisée par des méthodes de travail élaborant des étapes de production qui peuvent être suivies. Grâce à ce modèle de référence et en suivant les standards de construction, il est possible de documenter la production des données et des ressources pour faire du suivi et enfin en ressortir de la connaissance a posteriori par corrélation. En effet, l'interopérabilité des données dans le patrimoine culturel peut être réalisée avec une ontologie extensible de relations et de modélisation explicite basée sur les événements. La capture d'une sémantique sous-jacente de document dans une ontologie formelle est une des raisons pour lesquelles nous avons choisi ce modèle de référence comme point de départ. Il fournit une explication partagée de la complexité des acquisitions et des ressources à travers des classes pertinentes de haut niveau (Figure 109).

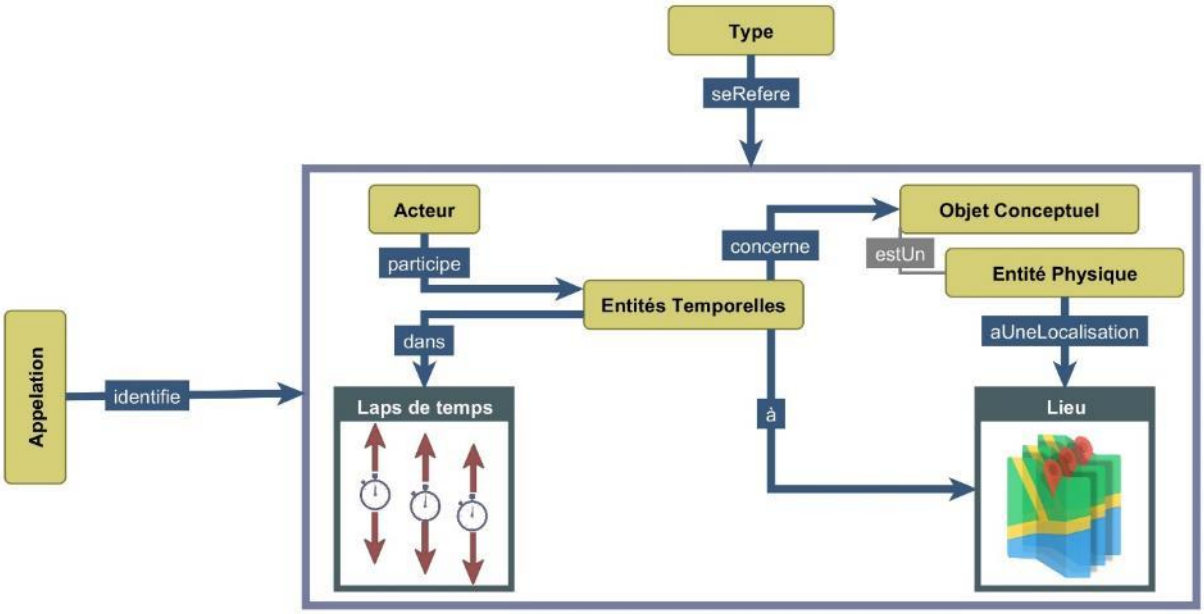


Figure 109 : Classes de haut niveau de description du CIDOC-CRM.

Par cet exemple, il est possible de constater que le modèle général décrit des événements, cela peut être des acquisitions, des analyses en laboratoire et même des phénomènes d'altération qui sont des événements actifs au sein de la surface de la pierre. Le modèle ci-dessus stipule qu'un acteur participe au cours d'un événement d'une certaine appellation (par exemple « Acquisition laser »), dans un laps de temps spécifique (par exemple « du 12/05/2016 10h12 au 12/05/2016 12h36 »), concernant un objet conceptuel physique (par exemple « église Saint-Maurice ») prenant place à une localisation (par exemple « 5°06'26.1''E, 44°06'33.9''N »).

Ce modèle conceptuel de référence, normalisé ISO, a été initié pour créer un modèle de base de données unifié et harmonisé, prouvé comme étant impossible conformément à la complexité du domaine et des connaissances diverses à intégrer. Afin d'aligner notre travail à un effort de communauté de recherche plus large, nous avons fusionné plusieurs classes de notre ontologie avec des classes pertinentes de ce modèle.
CIDOC-CRM propose des extensions couvrant des domaines caractéristiques, et surtout modélisés selon le même formalisme et connectables rapidement (Figure 110). Pour l'ensemble de notre modèle, nous avons exploité et fusionné trois d'entre elles. Tout d'abord nous avons exploité ***CRMcore*** qui est le cœur principal de CIDOC-CRM (sommet de la figure) sur lequel il est possible de connecter les différentes extensions, puis ***CRMsci*** pour la description et la documentation des observations scientifiques, ***CRMdig*** pour documenter la provenance des données digitales et enfin ***CRMinf*** pour le processus d'argumentation.

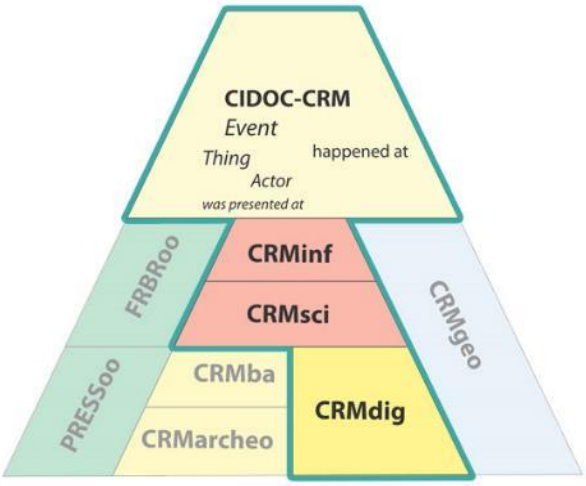


Figure 110 : Structuration du modèle de référence du CIDOC : CRMcore et ses extensions.

4.3.2. Modèle de connaissances structurées pour l'observation de l'état de conservation d'édifices patrimoniaux

Le modèle d'observation scientifique ***CRMsci***, est une ontologie formelle qui a l'ambition d'être utilisée comme un schéma global pour l'intégration de métadonnées de manière générale et particulièrement pour les données de mesures, et les traitements de données dans les sciences empiriques et descriptives (tels que la biodiversité, l'archéologie, le patrimoine culturel et d'autres) et bien sûr dans le domaine du développement informatique. Le principal atout de ce modèle est qu'il facilite la gestion, l'intégration, la médiation, l'échange et l'accès aux données de recherche en décrivant, de la même façon que nous le faisons, les relations sémantiques explicites. L'utilisation de **CRMsci** ne permet pas de produire de nouvelles données, mais leurs contextualisations font émerger de nouvelles informations et peuvent être utilisées pour faire des raisonnements. Celui-ci est disponible en RDFS, un format compatible, afin de l'intégrer dans Protégé (notre éditeur d'ontologie) pour l'exploiter en OWL.

Grâce à ce modèle, nous pouvons également utiliser **CRMdig** et **CRMinf** qui augmente la portée de description. Une fusion de ces trois ontologies est nécessaire pour les exploiter de manière plus efficace (section 5.2.3.). Étant donné que les classes de chacun des modèles ont été définies selon le même formalisme, il est aisé de les positionner les uns par rapport aux autres. Pour chacun des modèles, il est possible de les différencier à travers une convention de nommage. Toutes les classes des ontologies de CIDOC-CRM ont des identifiants (IRI ou URI) (Figure 111).

Modèle	Classe	Exemple de classe	Propriété	Exemple de propriété
CIDOC-CRM core	E + Nombre	E18_Physical_Thing	P + Nombre	P46_is_composed_of
CRMsci	S + nombre	S4_Observation	O + nombre	O8_observed
CRMdig	D + Nombre	D2_Digitization_Process	L + Nombre	L1_digitized
CRMinf	I + Nombre	I1_Argumentation	J + Nombre	J6_adopted

Figure 111 : Convention de nommage pour CIDOC-CRM et ses extensions.

Les différentes classes que propose ce modèle correspondent réellement à ce que nous recherchons. Chaque classe de notre ontologie de domaine est intégrable dans des classes spécifiques en respectant l'intégrité de chacune d'elle et en conservant leurs propriétés définies. Selon le CIDOC-CRM, « *S4_Observation* » comprend l'activité de gagner des connaissances scientifiques concernant un état particulier de la réalité physique à travers des évidences empiriques, des expérimentations et des mesures. L'observation, dans le sens des sciences naturelles, est définie comme étant un type d'activité humaine ; à un endroit donné pendant une durée déterminée, quelque chose de physique et ses comportements, ainsi que ses interactions, sont observés, soit directement par une impression sensorielle humaine (par l'expert), soit améliorées à l'aide d'outils et d'appareils de mesures (appareil, photographiques, scanner laser, etc.) [Doerr M., 2005]. Les informations sortantes de ce processus interne par appareillage de mesure, qui ne requiert pas d'interaction humaine additionnelle, sont, de manière générale, considérées comme faisant partie de l'observation. Le témoignage d'événements est un cas spécial d'observation. Le résultat d'une observation est une sorte de propositions quant à la représentation réel de la « chose » observée [Vassilakaki E. et al., 2014]. De plus, nous pouvons donner un degré de confiance à chaque observation effectuée, qui est par défaut définie comme « vraie » dans tous les cas. Elle peut être également décrite en ajoutant une note/commentaire par cette propriété : « *P3_has_note* », appliquée sur un individu de *« S4_Observation* ». Cette classe spécifique est donc porteuse d'une part, de l'annotation (individu) d'un calque de description, et d'autre part, de sa justification via des connaissances propres ou à travers l'utilisation de données d'acquisition.

C'est donc en articulation avec cette méthode de documentation que nous avons modélisé notre ontologie. Nous avons donc exploité le CIDOC-CRM et prévu des points d'ancrage pour être intégrée dans ce dernier. C'est pourquoi dans notre modélisation conceptuelle, nous avons défini la classe « *S4_Observation* » comme le porteur de tous les éléments pris en compte lors du processus d'observation de l'expert (Annexe A.3.a). Il est d'une part porteur de l'annotation typée accompagnée de ses propriétés, mais également porteur de l'argumentation que nous souhaitons mettre en place pour justifier la désignation de celle-ci au niveau conceptuel. De cette façon, nous respectons la définition de l'observation scientifique en fournissant à l'utilisateur le moyen de véhiculer son processus cognitif. Le CIDOC-CRM fournit des classes et des relations qui vont dans ce sens. Il est donc nécessaire de fusionner **CRMcore**, **CRMsci**, **CRMdig** et **CRMinf** dans la même référence de connaissances.

Chacun des modèles possède des classes en commun avec l'ontologie **CRMcore** ce qui permet une intégration sans erreur. La classe « Mère » de toute ontologie est la classe « *Thing* », s'inspirant de la définition de l'ontologie en philosophie. Étant donné qu'il n'y a pas de points communs au niveau des identifiants (URI) entre le CIDOC et notre ontologie, il n'y a pas de correspondance automatique. Nous avons donc choisi de les associer manuellement. Grâce à la documentation fournie par CIDOC, il nous fallait trouver le moyen de trouver des correspondances, et d'intégrer notre ontologie initiale en sous-classes de ces classes équivalentes. Une observation « *S4_Observation* » est, dans notre cas, censée observer un ou plusieurs concepts parmi les quatre classes de description thématique dédiées à la conservation du patrimoine qui donne une typologie au porteur spatial (l'annotation). Donc, il faut que le CIDOC renferme les propriétés pour le réaliser. C'est le cas notamment pour la propriété objet **CRMsci** nommée « *O8_Observed* » et sa relation inverse (même identifiant numérique, mais en ajoutant un « i ») « *O8i_ was_observed_by* ». O8 a pour domaine « *S4_Observation* » et a portée (cible) « *S15_Observable_Entity* ». Afin qu'un processus d'observation scientifique soit possible, il est donc nécessaire de trouver des classes correspondantes aux nôtres dans la classe « *S15_Observable_Entity* » et de les associer pour répondre à cette propriété. Nous avons donc trouvé une correspondance pour chacune des quatre classes du CIDOC-CRM et elles répondent parfaitement à cette relation d'observation scientifique sur une entité observable. Voici un exemple pour nos classes de description « *Altération* » et « *Composant Architectural* » (Figure 112). Le terme « *hasSub* » est une relation de subsomption (hiérarchique) qui stipule qu'une classe est sous-classe d'une autre classe. L'annotation, réalisée par un utilisateur est une entité informatique qui décrit un concept thématique. C'est également une classe principale qui doit correspondre à une autre classe du CIDOC-CRM. Elle doit nécessairement être une fille de la classe « S15_Observable_entity ». La classe correspondante se trouve dans l'extension CRMdig : D35_Area. Elle est définie comme une entité décrivant une zone d'intérêt d'un objet numérique comme une image, une vidéo et même un modèle 3D.

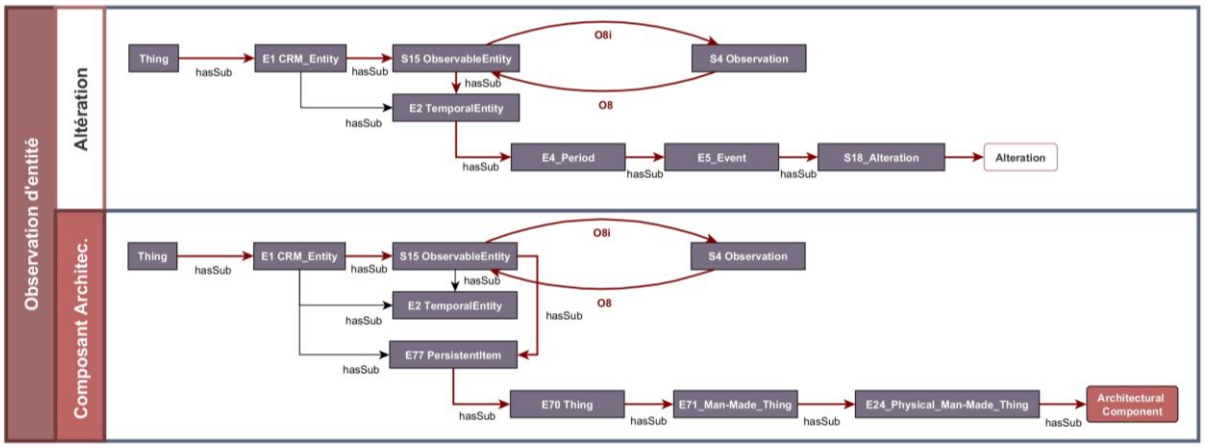


Figure 112 : Correspondance des classes CIDOC-CRM avec notre ontologie de domaine : exemple des composants architecturaux et les altérations.

Nous sommes donc capables de dire que si une *observation* (*S4*) - *est faite sur* (*O8*) -> une entité observable (*S15*), alors par héritage elle peut être faite sur « *E24_Physical-Man-*

Made_Thing » autrement dit « une chose qui est réalisée par l'homme » et c'est le cas pour les composants architecturaux, renseignés par les connaissances du domaine.
Cette méthode a été reproduite pour trouver des correspondances aux autres classes de description de la conservation (Figure 113).

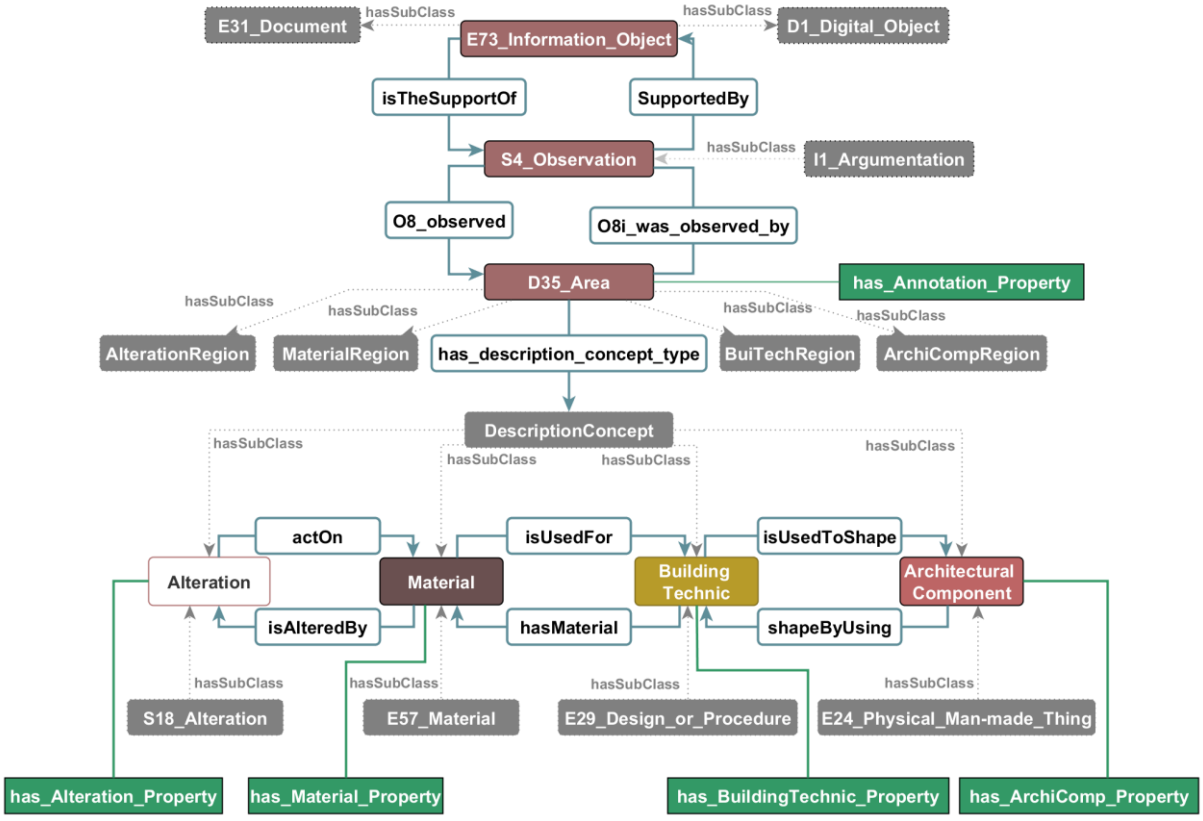


Figure 113 : Intégration du CIDOC-CRM et ses extensions pour la description de la conservation du patrimoine architectural.

Le but est donc d'observer plusieurs entités et de justifier leur désignation avec un argument. En effet, l' « observation » observe une « zone » qui peut être typée parmi les quatre classes thématiques de description, mais doit également être appuyée par des ressources et par une argumentation (qui est d'ailleurs la classe mère de l'observation).
Ces ressources, dans le CIDOC-CRM, sont comprises dans la classe « *E37_Information_Object* ». Ce dernier renferme la description d'une part des ressources documentaires (donnant des informations sur la construction du bâti, date, matériaux utilisés, etc.), puis des ressources numériques (photographies, données d'acquisitions numériques in situ ou en laboratoire). Ce sont donc les deux typologies de ressources sur lesquelles les experts s'appuient pour confirmer, argumenter leurs diagnostics et leurs connaissances propres. Les informations, constituant les attributs des quatre classes de description, peuvent être enrichies par la prise en considération des autres dimensions : spatiale et morphologique comme nous le verrons dans la section 4.5.

Le modèle ontologique, dont nous avons présenté la construction, constitue le point central pour prendre en considération les deux autres dimensions (spatiale et morphologique) en fournissant une entrée conceptuelle au niveau des classes et des propriétés.

La Figure 114 montre la façon dont nous avons articulé le point de départ (état de l'art) **(1)** avec notre contribution scientifique **(2)**. Comme nous l'avons développé dans la section 3.4.2., le CIDOC-CRM **(1.B.)**, accompagné de ses nombreuses extensions **(1.A.)**, rend possible la description d'un large panel de ressources et d'objet d'études liés au domaine du patrimoine culturel.

Par conséquent, en lien avec la formalisation des modes opératoires de l'étude de l'état de conservation et par l'identification d'une structure consensuelle des termes décrivant les aspects observés par les experts intervenant dans le projet, nous avons défini quatre classes de description ainsi que leurs possibles relations : « *Alteration* », « *Materiau* », « *TechniqueDeConstruction* » et « *ComposantArchitectural* » recouvrant l'ensemble des études, données et ressources impliquées dans le processus d'observation d'un bâti patrimonial. Dans le but de renforcer leur contexte d'utilisation et d'augmenter leur expressivité, nous avons relié ces classes avec des propriétés d'objets spécifiques et uniques également en lien avec les connaissances acquises. L'ensemble des connaissances modélisées au sein d'une ontologie a pu être intégré, et mappé dans le CIDOC-CRM en l'associant avec des classes équivalentes **(2.A.)**. Notre ontologie de domaine renferme donc d'une part, les connaissances du domaine interconnectées et d'autre part le moyen de décrire l'ensemble des entités impliquées dans le processus d'observation scientifique de l'expert.

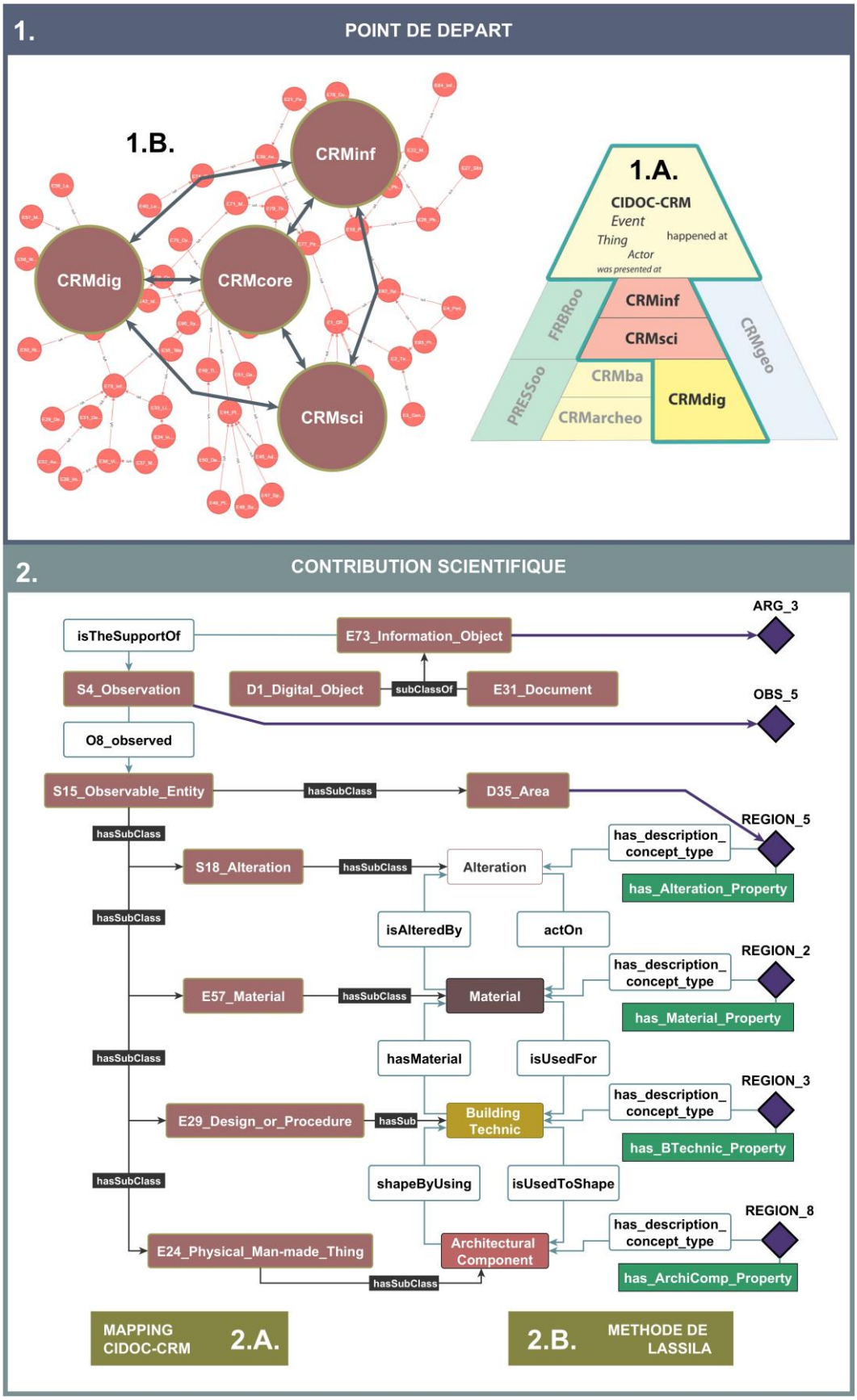


Figure 114 : Du point de départ vers la contribution scientifique pour la définition de la dimension sémantique.

Chaque classe de l'ontologie de domaine peut être peuplée d'individus reliés de manière sémantique à travers des propriétés d'objets. De plus, celles-ci sont caractérisées par une liste de descripteurs qui leur sont spécifiques, augmentant leurs identités au sein de la population d'instances intégrées a postériori : par exemple « *Alteration* » est le concept de description pour typer « D35_Area » dont l'individu est « **REGION_5** » qui possède des descripteurs spécifiques « **has_Alteration_property** ».

Nous avons réalisé des schémas représentant et faisant intervenir les différentes classes de notre ontologie de domaine. Afin de bien comprendre leurs implications, nous avons défini un formalisme bien précis (Figure 115).

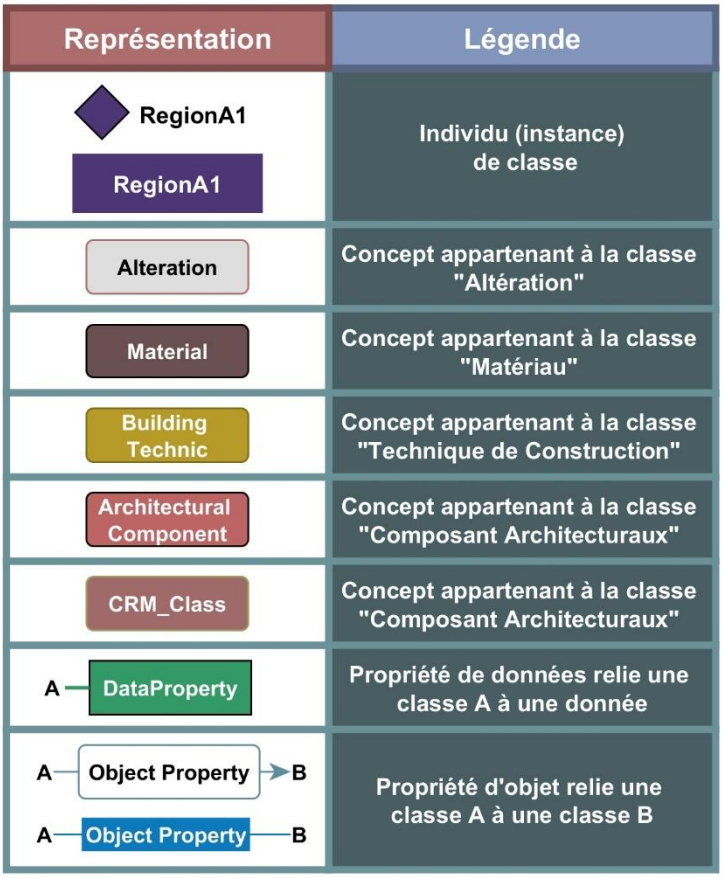


Figure 115 : Formalisme de représentation de l'ontologie et ses constituants.

Nous verrons dans les parties suivantes les caractéristiques que nous avons choisi d'intégrer en relation avec les différentes méthodes proposées pour chacune d'elle. La section 4.6.2., sur la corrélation, montre notamment comment les trois dimensions (sémantique, spatiale et morphologique) sont intégrées d'un point de vue conceptuel.

4.4. Dimension spatiale : de la caractérisation visuelle à l'annotation 3D basée sur la réalité

Comme nous l'avons souligné dans les différentes parties, les experts de la conservation se basent principalement sur une analyse visuelle pour entreprendre toute acquisition orientée vers une observation spécifique et confirmer, enrichir ou même réfuter une théorie concernant l'état sanitaire d'un édifice.

La dimension spatiale, comme son nom l'indique, constitue une solution essentielle en termes de référencement visuel d'observation de la part de l'expert qui réalise un diagnostic de surface. Plusieurs tentatives ont été proposées quant à la spatialisation de régions pour la description et l'analyse, d'un bien culturel, supportée par des ressources iconographiques. C'est le cas notamment du travail de [Snavely N. et al, 2006] qui propose de réaliser des annotations simples sur une image dans le but de les propager sur d'autres images spatialisées autour d'un nuage de points léger.

Le travail que nous avons réalisé se base sur l'intégration pertinente d'aspects provenant d'outils et d'approches développés au sein du laboratoire MAP. Tout d'abord, le travail de [Busayarat C., 2010] a abouti au développement d'une méthode de segmentation semi-automatique d'images basée sur une relation projective 3D/2D. En continuité logique avec cette initiative, [Manuel A. et al., 2014] a proposé une méthode permettant d'étendre l'approche de segmentation à l'ensemble de relations projectives que l'on peut établir entre des images 2D et un nuage de points 3D (et vice-versa). Dans les prochains paragraphes, nous détaillons ces méthodes afin d'introduire la manière dont notre contribution s'y est ancrée pour aborder les aspects relatifs au référencement spatial (et temporel) d'observations scientifiques au sein d'une représentation 3D de l'édifice.

4.4.1. Annotation sémantique 2D/3D : Point de Départ

Comme présenté dans les chapitres d'état de l'art, les modèles 3D basés sur l'acquisition de données à référence spatiale (par lasergrammétrie et/ou photogrammétrie) fournissent un potentiel non négligeable quant à leur précision métrique et morphologique. Une des originalités de notre approche consiste alors à exploiter ce potentiel en orientant la spatialisation des observations scientifiques vers la corrélation des aspects observés (et enregistrés sous forme d'annotations). Mais, avant d'aborder ces aspects qui concernent notre contribution spécifique, il est tout d'abord nécessaire de tracer les grandes étapes de la réflexion et de l'expérimentation sur l'annotation sémantique de représentations 3D réalisées dans les dernières années au sein du laboratoire MAP.
Un travail de recherche, réalisé par [Busayarat C., 2010], propose un système d'annotation d'images 2D, NUBES IMAGO, exploitant directement la maquette numérique 3D (Figure 116).

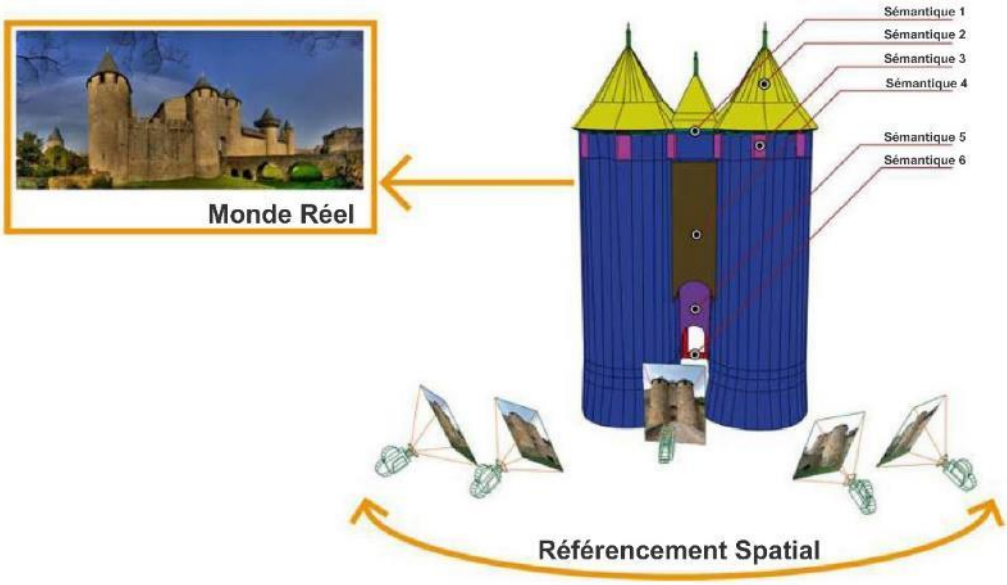


Figure 116 : Maquette numérique et référencement spatial des images [Busayarat C., 2010].

Le modèle 3D, obtenu par reconstruction géométrique à partir d'une acquisition lasergrammétrique, est utilisé pour décrire des parties, telles que des composants architecturaux remarquables, en référence à une décomposition morphologique. Des ressources iconographiques (principalement des images photographiques) sont ensuite référencées spatialement autour de ce modèle 3D.

Trois fonctions principales ont été développées au sein du système. La première, manuelle, concerne l'orientation approximative d'une image sur le modèle 3D en manipulant les paramètres de position, d'orientation et d'angle de vue, manipulables de manière interactive. La deuxième, semi-automatique, dédiée aux photographies de l'état actuel ou pour des dessins précis basés sur la perspective, permet à l'utilisateur de définir une post-estimation en sélectionnant des correspondances 2D/3D respectivement sur l'image puis sur le modèle tridimensionnel. La troisième, destinée aux images de relevés (acquises par des configurations photogrammétrique), donne la possibilité à l'utilisateur d'insérer directement les paramètres d'orientation internes et externes de l'appareil photographiques calculées à l'aide d'une procédure d'ajustement de faisceau (ENG : Bundle Adjustment) ou de résection spatiale (« *procédé dans lequel la position et l'orientation spatiales de la photographie sont déterminées en se basant sur des mesures photogrammétriques et sur des points de contrôles apparaissant dans la photographie* ») [Köser K. et al., 2008].

Pour tous les cas d'intégration présentés, le système associe à chaque image insérée un modèle géométrique de caméra (paramètres d'orientation externe et interne au moment de la prise de vue) : translation et orientation de l'appareil, longueur de la focale et distorsion de l'objectif.

À la suite de cette phase de spatialisation, une fonction de projection 3D/2D génère l'annotation d'images (Figure 117).

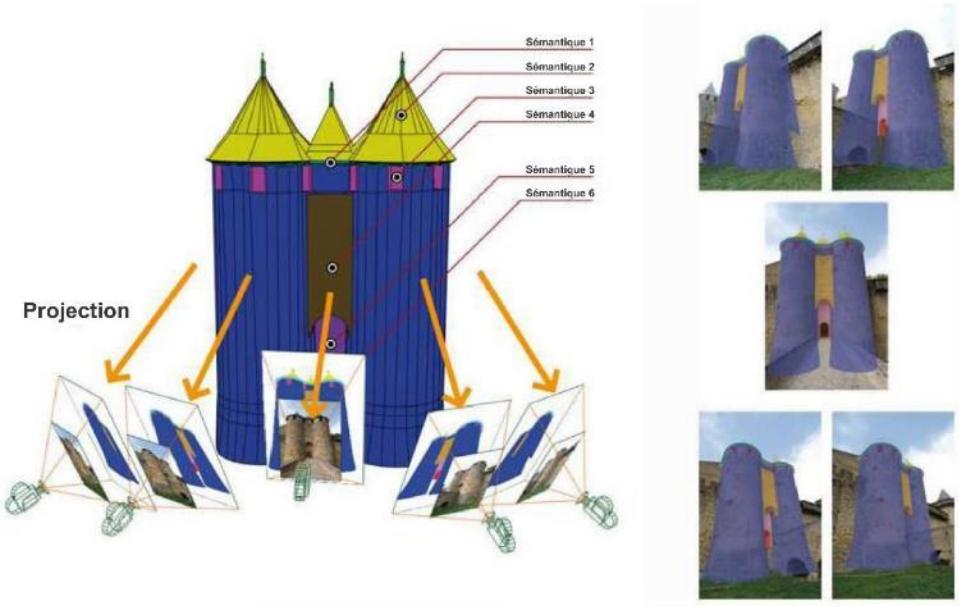


Figure 117 : Projection de la segmentation sur les images [Busayarat C., 2010].

Dans ce travail, le modèle 3D est utilisé en tant de support de description thématique qui détermine la segmentation morphologique (bloc 3D du modèle) ainsi que la segmentation 2D (région 2D de l'image) qui en découlent. La description sémantique doit donc être réalisée de façon préalable au sein de la représentation 3D (structurée géométriquement en fonction d'un découpage en éléments pertinents) afin qu'elle puisse être propagée au sein de représentations 2D spatialement référencées (images orientées par les fonctionnalités développées).

4.4.2. Spatialisation et suivi temporel d'observations scientifiques

Les méthodes, précédemment présentées, possèdent des qualités notables mais également des verrous qui ne nous permettent pas de les exploiter dans notre approche. Les experts de la conservation se basent beaucoup sur l'analyse visuelle afin de réaliser des cartographies thématiques. C'est pour cette raison que l'utilisation d'images est un choix pertinent pour la description de la conservation du patrimoine culturel bâti car elles contiennent un haut niveau d'information facilement exploitable pour des observations. Ce que nous pouvons constater à travers l'analyse de ces approches, est que, grâce au développement des modèles 3D de qualité, couplé au référencement de ressources iconographiques, nous avons accès à des supports d'analyses plus performants. Ils permettent d'obtenir non seulement des informations spatiales mais également d'extraire des informations géométriques. Un lien spatial entre la 2D et la 3D, rend possible l'analyse géométrique à travers une segmentation réalisée par l'utilisateur en vue d'obtenir une cartographie.

Le système NUBES IMAGO n'offre donc pas de solutions pratiques à l'annotation car il faut, dans un premier temps, réaliser une représentation 3D segmentée et intelligible, ce qui demande un travail long et peu ergonomique.

Il serait donc important d'envisager une solution où une référence spatiale dense permettrait de réaliser des observations via des annotations sémantiques orientées. Une telle représentation constituerait un support d'observations multicouches et cohérent, sur laquelle il serait possible de spatialiser des acquisitions numériques à plusieurs niveaux de granularités. En outre, cette précision au niveau du modèle 3D permettrait d'extraire des informations morphologiques qui pourraient être associées avec des concepts de notre ontologie, proposés dans notre dimension sémantique.

L'approche que nous présentons, ici, se situe en étroite relation avec la thèse d'Adeline Manuel [Manuel A., 2016], portant sur la propagation d'annotation au sein d'un jeu de photographies orientées. En relation avec ce travail, notre contribution se concentre sur l'extension de cette approche au cadre de l'annotation sémantique multi-calques et guidée par l'ontologie de domaine [Messaoudi T., 2015]. Le point de départ de l'approche d'annotations d'images spatialisées est constitué par la méthode et des outils de photogrammétrie 3D (Section 2) développé à l'IGN : MICMAC. Le processus consiste en une orientation et calibration automatique d'images, et une corrélation multi stéréo dense conduisant à la création d'une relation inhérente entre chaque pixel d'images 2D et ses coordonnées 3D (nuage de points). Grâce à cette méthode, il est possible de produire d'autres types de visualisation (Figure 118).

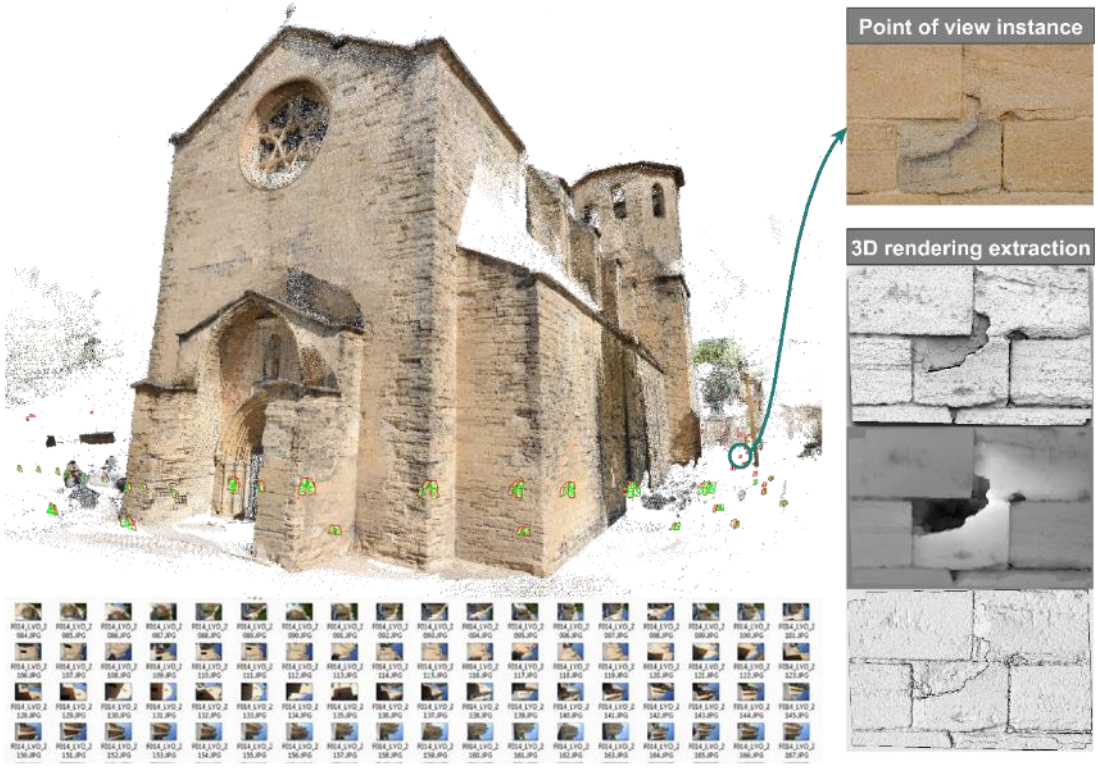


Figure 118 : Modélisation 3D basée sur les images, avec des exemples de rendus générés.

Le nuage de points 3D, résultat de la phase de corrélation dense d'images, est structuré au sein d'une base de données qui indexe les coordonnées 3D, leurs normales, leurs valeurs RGB

ainsi que les liens vers les images photographiques 2D dans lesquelles chaque point (index) se projette [Manuel A. et al., 2013b] [Manuel A., 2016] (Figure 119).

	Coord 3D			Normales			Couleur			
Index	X	Y	Z	Nx	Ny	Nz	R	G	B	ListeImg
1	X1	Y1	Z1	Nx1	Ny1	Nz1	R1	G1	B1	Img1, img2
2	X2	Y2	Z2	Nx2	Ny2	Nz2	R2	G2	B2	Img60, img15
3	X3	Y3	Z3	Nx3	Ny3	Nz3	R3	G3	B3	Img15, img42
I	Xi	Yi	Zi	Nxi	Nyi	Nzi	Ri	Gi	Bi	Imgi, imgb

Figure 119 : table de la base de données stockant les index et leurs composantes 3D.

Le processus de reconstruction tridimensionnelle précédent génère donc des informations 3D propres à chaque image. Ce qui signifie qu'une relation bijective 2D/3D est introduite entre les pixels et leurs coordonnées 3D. Cette relation nous permet de transférer des régions dessinées sur une image, directement au sein d'autres images. Le processus démarre de l'identification d'une région sur une image, puis passe par la projection 2D > 3D de la région sur le nuage de points, puis la région 3D est projetée au sein des autres images par la projection 3D > 2D [Manuel A. et al., 2013c] [Manuel A. et al., 2014] (Figure 120).

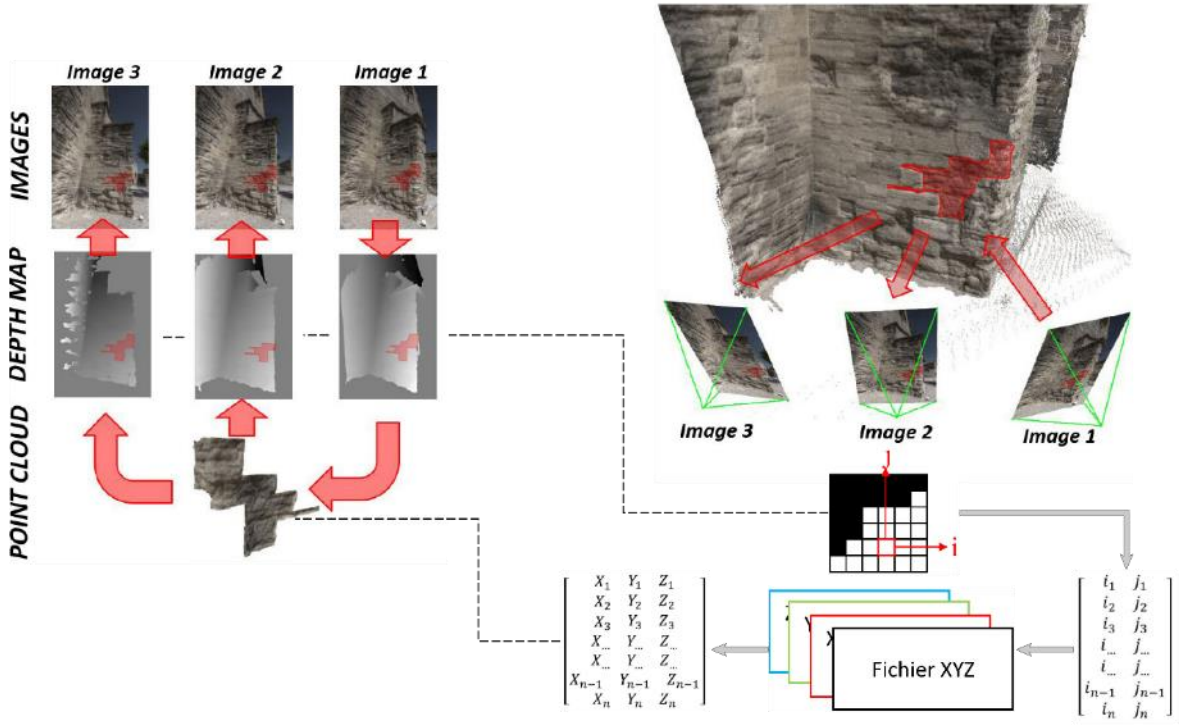


Figure 120 : Méthode de transfert d'annotations en utilisant les relations 2D/3D.

Ce processus peut être transposé facilement sur de multiples images pour définir une zone, en annotant sur une image, puis compléter l'annotation sur une autre image avant de réaliser le transfert d'annotation sur toutes les images. C'est par exemple le cas lorsque nous réalisons

une région sur des parties occluses. Par conséquent, cette méthode fournit d'une part une manière simple et rapide d'annoter des images toutes en une fois au lieu d'une par une, et d'autre part, d'extraire d'autres types de descripteurs spécifiques.

Par cette méthode, chaque annotation 2D sur les images spatialisées autour de la représentation 3D est liée à une région 3D correspondante et utilisée pour extraire des attributs morphologiques. De plus, cette relation bijective n'est pas seulement utilisée pour propager des annotations sémantiques dans le jeu d'images, mais également d'exploiter cette propagation afin de constater et extraire les degrés de superpositions avec les autres annotations, présentes sur une même image ou même au sein de la représentation 3D.

C'est donc en articulation avec cette méthode d'annotation, que nous avons conçu et développé notre approche de spatialisation 3D d'observations scientifiques. Dans le cadre de la thèse, nous avons non seulement expérimenté cette méthode en utilisant des images photographiques mais également en intégrant d'autres types d'images acquises lors de campagnes d'acquisitions d'imageries scientifiques. La représentation tridimensionnelle fournit donc un support d'observation de référence fournissant un point d'origine pour spatialiser d'autres données acquises.

De plus, au-delà des différentes images que nous pouvons intégrer dans le système, concernant un objet du patrimoine, à un instant T, le processus d'annotation sémantique peut être mis en place sur des jeux d'images montrant l'objet correspondant à différents états de conservation, ajustés dans le même système de référence spatiale. Les annotations (observations scientifiques), déjà réalisées sur un jeu d'image T0, peuvent ainsi être projetées sur les images montrant l'édifice dans un état T-1 et/ou T+1 afin de comparer, de suivre et d'analyser l'évolution des formes d'altération.

Nous avons vu que la représentation 3D, générée par corrélation d'images de l'état de conservation T0 d'un édifice, rend possible l'annotation 2D/3D, support que nous privilégions pour réaliser des observations scientifiques. Or, le modèle 3D peut non seulement être porteur d'un support d'organisation des observations (dans l'espace et dans le temps), mais également d'un support d'extraction d'attributs spatiaux, notamment au vu de ses propriétés métriques, ou encore un support pour spatialiser d'autres types d'images.

Tout d'abord, l'imagerie scientifique propose d'autres types de visuels, qui sont réalisés soit in situ, soit en laboratoire. In situ, les visuels sont produits en modifiant la configuration du capteur de l'appareil photographique (images dans l'infrarouge), et/ou en modifiant les conditions d'exposition de l'objet étudié (images sous fluorescence UV, en lumière rasante, en lumière directe, etc.). En laboratoire, les visuels sont issus d'une reconstruction (images composites infrarouges fausses couleur) (Figure 121) (section 2.2.1 et 2.3.3.).

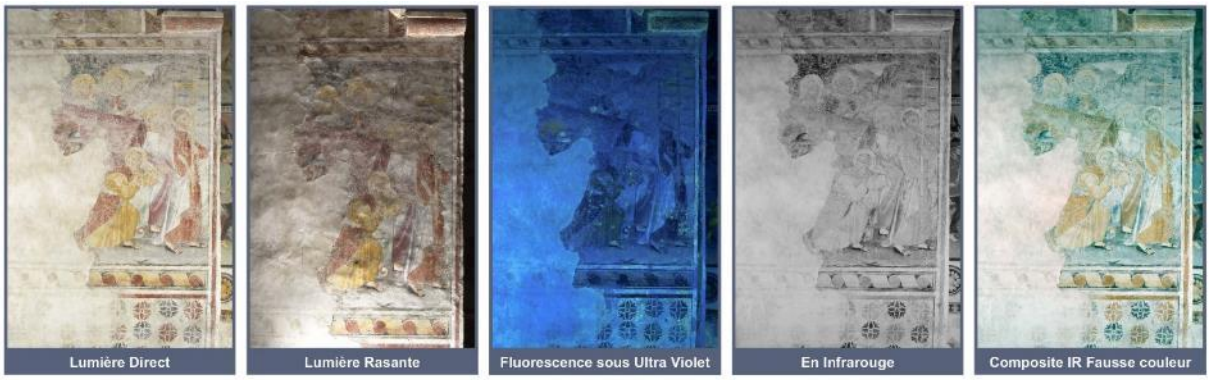


Figure 121 : Types d'imageries scientifiques multi-spectrales : peinture Est du chœur de la chapelle Notre-Dame des Fontaines (CICRP.Photos Odile Guillon).

Dans le cadre de cette thèse, nous avons pu expérimenter plusieurs méthodes d'orientation d'images sur un premier jeu d'images photographiques orientées [Pamart A. et al., 2016]. À titre d'exemple, grâce à cette méthode, lorsqu'une image photographique (lumière directe) orientée est annotée, la région relative à l'annotation est d'abord projetée en 3D, puis reprojetée sur une image en infrarouge (Figure 122).

Figure 122 : Référencement d'une image en IR dans l'espace 3D pour une orientation indirect.

Une extension de cette méthode permet également d'orienter des images prises à différents niveaux de zoom, au travers d'une orientation progressive d'une série d'images de la même zone allant du général au détail (Figure 123).

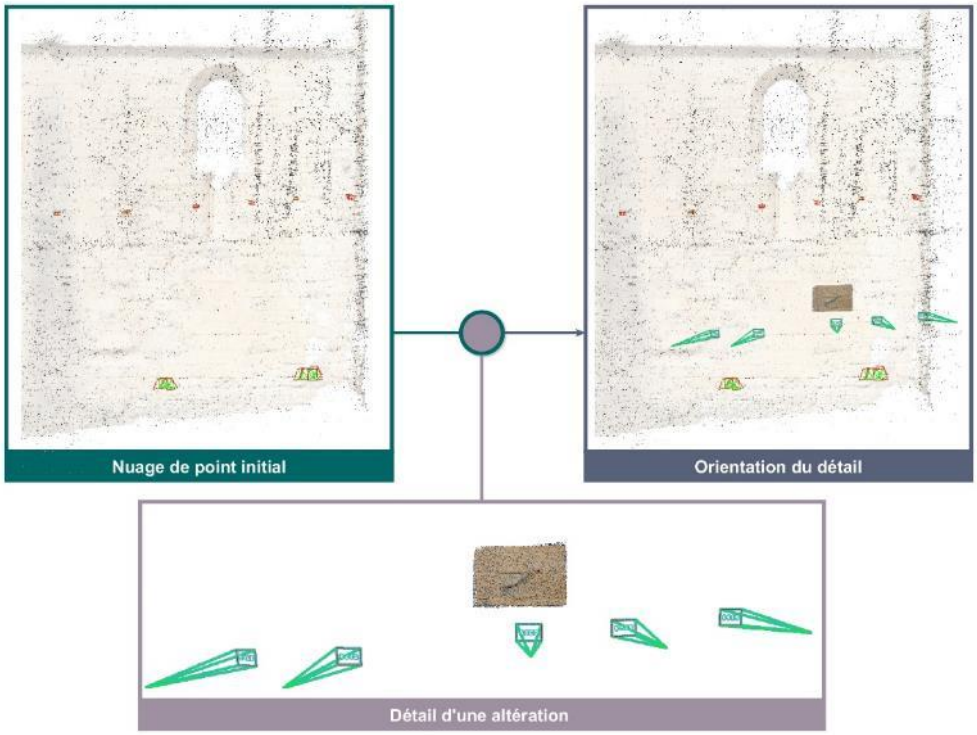


Figure 123 : Orientation d'un détail dans le même référentiel que le nuage de points préalablement produit.

Comme expliqué dans l'introduction de cette thèse, le domaine de la conservation a également pour ambition de suivre l'état de conservation des édifices. Donc, le fait de pouvoir spatialiser des images a posteriori donne des possibilités d'analyses. Les différentes acquisitions de données images peuvent être répétées dans le temps afin de suivre l'évolution des altérations par exemple, et de manière générale, de suivre la conservation du bâti afin de mettre en évidence ses modifications dans le temps. Ces acquisitions peuvent, d'une part, être documentées par la dimension sémantique puis être orientées entre elles, dans le même référentiel, grâce à la dimension spatiale. L'ouverture à la gestion des états temporels est donc liée à la possibilité de spatialiser des images acquises dans des moments différents. Comme nous pouvons le voir dans la Figure 124, en ayant deux jeux d'images orientés, appartenant à des états temporels différents (T0 et T1), plusieurs transformations permettent de fusionner ces deux états temporels au sein d'un repère géométrique unique.

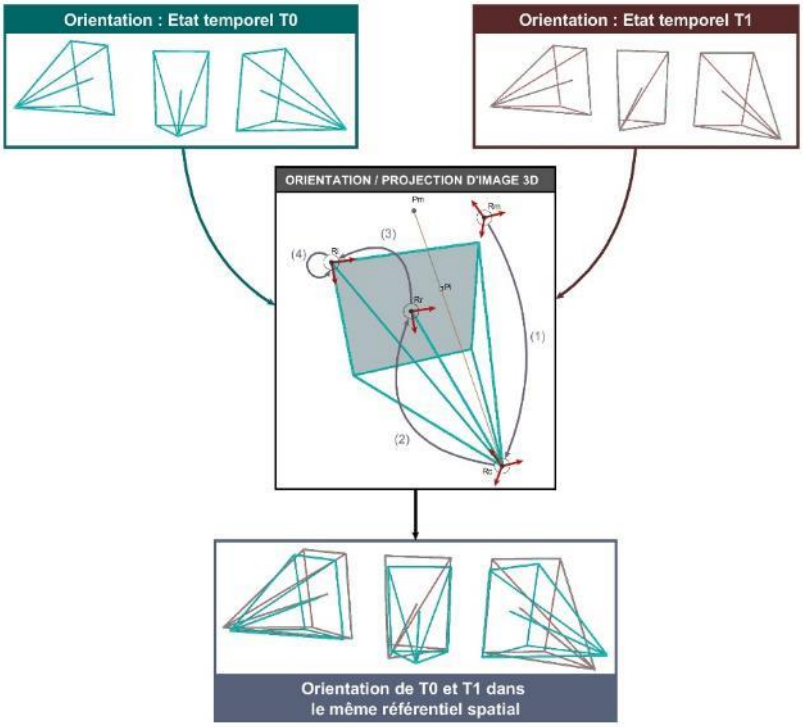


Figure 124 : Principe d'orientation et référencement (modèle de Sténopé) d'images orientées de deux états temporels différents : T0 et T1.

Dans le cadre de notre projet, une expérimentation s'est concentrée sur le suivi temporel des transformations, en ayant comme objectif d'exploiter l'information géométrique extraite des images à des fins de comparaison d'états temporels différents [Peteler F. et al, 2015]. Ceci s'est réalisé sur la base des cinq types d'altération référencés dans le glossaire « pierre » que nous pouvons retrouver sur un bâtiment du patrimoine : détachement, perte de matière, déformation, altération chromatique et colonisation biologique [Verges-Belmin V., 2008] appliquées sur un muret bâti par nos soins. L'idée retenue nécessite donc de positionner tous les nuages de points, issus de différents états de conservation, dans un même référentiel en prenant bien sûr connaissance, au préalable, de l'appartenance des images à des états temporels respectifs, donc des dates acquisitions différentes. Le principe de base est donc de générer un nuage de points par état (quatre états donc quatre nuages de points) en les orientant les uns avec les autres pour ensuite générer des orthophotographies. Celles-ci constituent des supports essentiels pour réaliser des analyses et comparaisons.

Sur les bâtiments, les phénomènes d'altération sont très lents. Par conséquent, sur notre sujet d'étude nous avons mené une expérimentation (visant à la validation de notre modèle conceptuel) consistant à orienter deux états temporels différents (images acquises à deux dates distincts), puis à réaliser l'annotation d'une région (en simulant une dilatation spatiale), pour enfin propager l'annotation T1 sur T0 afin de comparer les différences géométrico-visuelles (Figure 125).

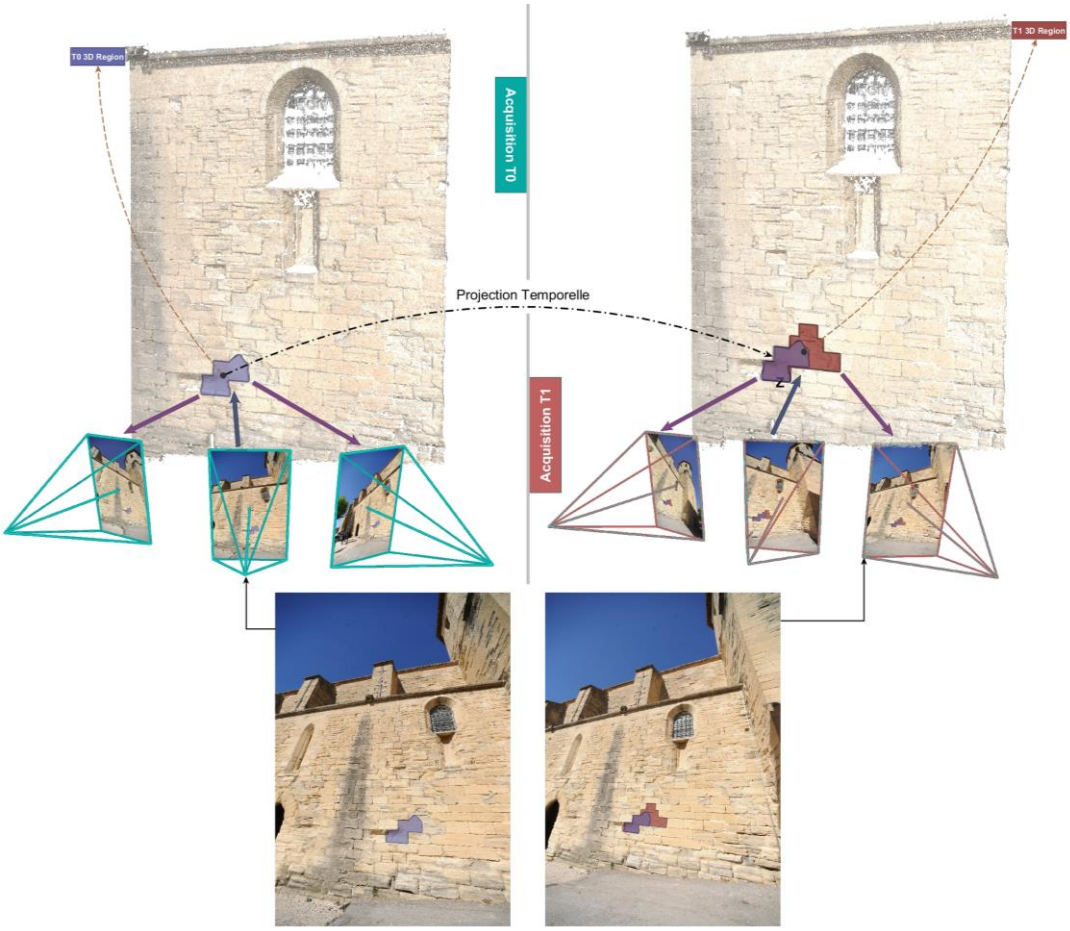


Figure 125 : Orientation de deux états de conservation différents et projection d'une annotation d'un état T0 (Violet) sur une annotation d'un état T1 pour une analyse morphologique.

L'extraction d'attributs géométriques (voir section suivante) relatifs aux deux états temporels permet d'intégrer au sein du modèle conceptuel la comparaison des valeurs caractéristiques. La Figure 126 nous montre un exemple de comparaison des valeurs de barycentre et d'extension spatiale prise en compte dans la relation entre la dimension sémantique et la dimension spatiale. Cet exemple implique deux annotations réalisées sur des acquisitions temporelles différentes. En effet, pour un même édifice, **(1.)** nommé « *Eglise Saint Maurice* », deux événements temporellement distincts de numérisation **(2.)** ont été réalisés : la première **(2.A.)** le « *05/07/2006* » **(2.A.1.)**, puis la deuxième **(2.B.1.)** le « *23/10/2016* » soit plus de 10 ans de différences. Respectivement, chaque événement de numérisation a créé respectivement des objets numériques de types images JPEG **(3.A.)** et **(3.B.)**. Puis, dans la cadre d'observations scientifiques **(4.)** d'experts **(4.A)** et **(4.B)**, des régions **(5.)** sont dessinées **(5.A.)** et **(5.B)** sur une image de base appartenant à chaque évènement d'acquisition.

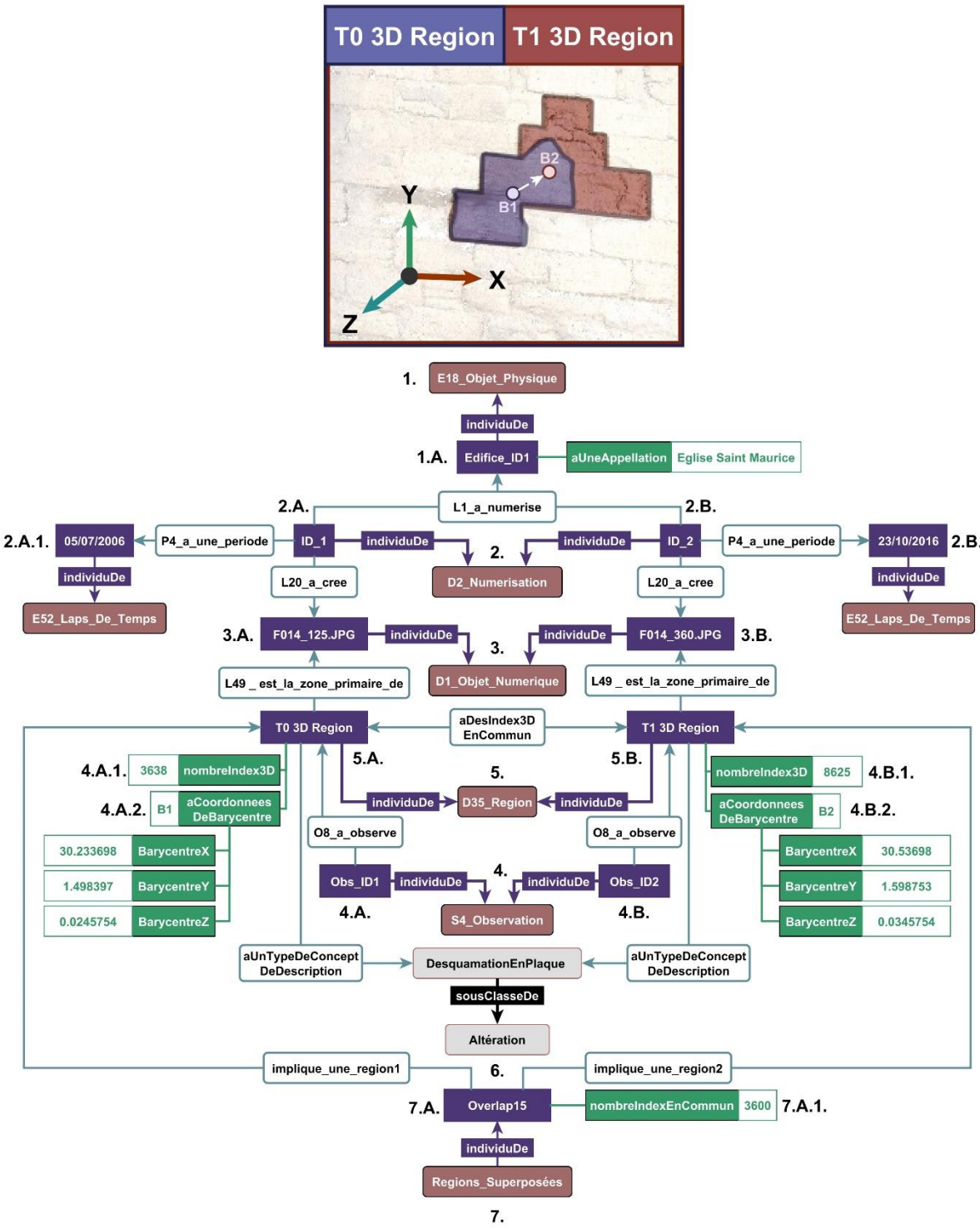


Figure 126 : Relation entre la dimension conceptuelle et spatiale pour une altération représentée par deux états temporels différents (T0 et T1).

Ces régions sont tous deux désignées par le concept « *Desquamation en plaque* », une sous-classe de « *Alteration* » **(6.)**. L'analyse des différentes données de ces annotations (réalisées par le même ou deux experts différents), nous permet de déduire que ces deux régions représentent la même altération qui a évolué au cours du temps. Grâce à la dimension spatiale, chacune des annotations possède des attributs. Dans cet exemple, nous connaissons le nombre de points 3D contenus dans chaque annotation **(4.A.1.)** et **(4.B.1.)**, puis les

coordonnées du barycentre **(4.A.2)** et **(4.B.2)**. Dans le cadre d'évènements numérique **(7.)**, notre ontologie nous permet d'identifier les annotations qui se superposent **(7.A.)** et connaître le nombre de point 3D en commun **(7.A.1)**.

À travers des requêtes SPARQL, nous pouvons avoir accès à ces valeurs pour ensuite les intégrer dans des fonctions arithmétiques afin de calculer, d'une part, la distance et l'orientation (le vecteur) du déplacement du barycentre dans les trois dimensions, et d'autre part, le pourcentage d'extension s'il y a bien une modification dans le temps. Dans notre exemple (Figure 126), pour un nuage de points homogène, nous sommes donc capables de dire que :

- le barycentre s'est déplacé sur une distance (norme) de **0.313 mètre**, pour un déplacement en X de **0.297 mètre**, en Y de **0.1 mètre** et en Z de **0.01 mètre**.
- En T1, la région dessinée en T0 a une extension spatiale qui a plus que doublé **(237 %)**.

Comme expliqué précédemment, nous centrons la stratégie de structuration de données sur une indexation particulière d'un nuage de points (référence géométrique 3D commune à plusieurs jeux d'images 2D) (Figure 127). Cette stratégie de structuration dialogue avec notre modèle conceptuel permettant d'associer chaque point (et par conséquent à chaque annotation incluant ce point) des attributs spatiaux (Figure 128).

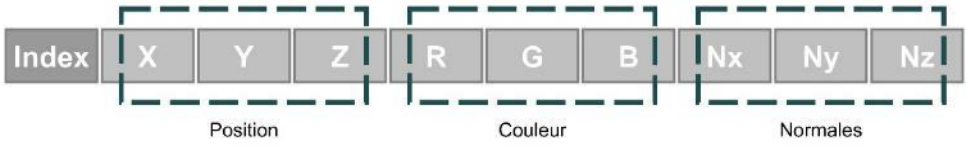


Figure 127 : Descripteurs disponibles grâce à la dimension spatiale.

Ces attributs peuvent alors être extraits et associés au concept choisi de l'ontologie de domaine utilisée pour l'annotation dans l'objectif d'explorer le couplage d'aspects qualitatifs et quantitatifs.

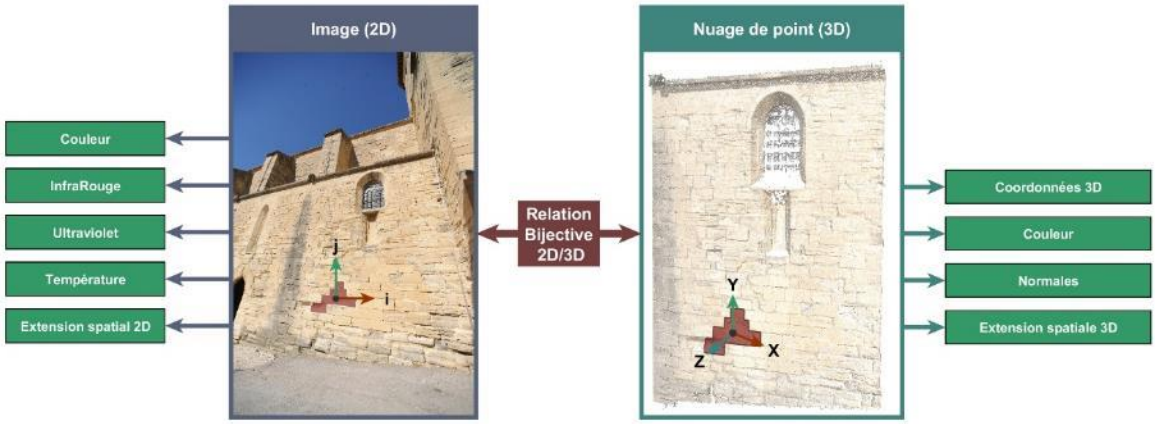


Figure 128 : Informations 2D enrichies d'informations 3D par la présente relation bijective.

4.5. Dimension morphologique : extraction de données géométrico-visuelles de surface

Comme expliqué dans la partie précédente, notre approche permet de produire une représentation de chaque annotation sémantique réalisée. Il s'agit explicitement d'une sorte de segmentation de nuage de points pouvant être combinée avec des méthodes d'analyse géométrico-visuelles susceptibles d'extraire des informations pertinentes pour la caractérisation morphologique des régions annotées. Notre réflexion s'appuie sur l'articulation et la confrontation de deux travaux parallèles qui ont été conduits dans le cadre du projet MONUMENTUM.

4.5.1. Méthodes d'analyse morphologique de l'état de surface des édifices patrimoniaux : point de départ

Un premier travail de recherche [Benard A., 2015] s'est concentré sur la réalisation de cartographies thématiques de plusieurs aspects concernant l'état de conservation de l'église Saint Maurice (nature des matériaux, phénomènes de dégradation, etc.). Ces cartographies (réalisée sous forme d'annotations d'images) constituent une catégorisation des aspects observés, basée sur des critères qualitatifs (interprétation humaine, recherche via des sources historiques, etc.) (Figure 129).

Figure 129 : Cartographies manuelles de gauche à droite : composants architecturaux, matériau bloc à bloc, perte de matière, et colonisation biologique, partie de la façade Est de l'église Saint Maurice. [Benard A., 2015].

Le second travail [Nespeca R. et al., 2016] concerne l'extraction d'attributs quantitatifs à partir d'un nuages de points 3D issu d'un calcul de corrélation d'images (en conformité avec la méthode de spatialisation d'images que nous avons décrite précédemment). Ce travail illustre donc les aspects relatifs à la dimension morphologique de notre approche.

En articulant les aspects explorés au sein de ces deux travaux, nous avons identifié d'un côté des attributs géométrico-visuels susceptibles de caractériser morphologiquement des annotations sémantiques (voir paragraphe suivant), de l'autre des modalités de corrélation multidimensionnelles croisant plusieurs calques de description de l'édifice (Section 4.6.2.). Sur le plan de la conception de notre système, chaque annotation sur une image spatialisée est

utilisée pour extraire des descripteurs géométrico-visuels relatifs à la région spatiale isolée. Ces attributs sont ainsi associés au concept utilisé pour l'annotation en tant que propriétés et peuvent fournir le moyen de les caractériser, de les comparer et de réaliser des inférences.

Nous listons ici les méthodes d'extraction que nous avons prise en compte pour l'identification des descripteurs morphologiques associables aux annotations sémantiques.

C2C : Distance entre deux nuages de points. Cloud To Cloud [Koutsoudis A. et al., 2014] [Haugen B. D., 2016] est un algorithme utilisé, de manière générale, pour calculer la distance entre deux nuages de points. Cette méthode peut être utile pour mesurer les différences entre deux états temporels du même objet. Ne disposant pas de deux états temporels du même objet, nous avons testé cette méthode pour comparer un modèle issu d'un balayage laser 3D avec un modèle calculé par photogrammétrie (Figure 130). L'échelle de couleur nous permet de quantifier cette différence entre 0 et 10 millimètres : le bleu (de 0 à 2.875 mm) montre une moindre différence, alors que la couleur rouge (de 8.125 à 10 mm) signifie que l'écart est important.

Figure 130 : Carte C2C entre nuage de points issu du scanner et celui issu de la reconstruction photogrammétrique ; partie de la façade Est de l'église Saint Maurice [Nespeca R. et al., 2016].

C2M : plan RANSAC. La méthode RANSAC [Derpanis K. G., 2010], permet de calculer l'orientation d'un plan passant au sein d'un ensemble de points. L'algorithme RANSAC est utilisé pour obtenir une bonne géométrie (plan), dite intermédiaire ou de raccord, par rapport au nuage de points d'entrée. En outre, elle permet de créer une carte de déviation grâce à ce type d'orientation, entre le plan RANSAC et le nuage de points accompagné des valeurs de C2M. Cette méthode d'extraction permet de calculer des cartes de profondeur fournissant des informations précises sur la « perte de matière » provoquée par le phénomène de dégradation (Figure 131).

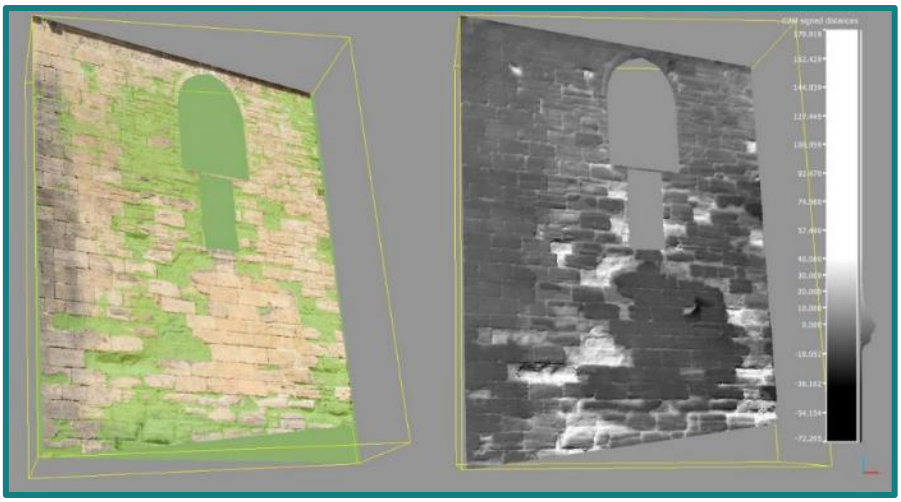


Figure 131 : Analyse RANSAC C2M : nuage de points et plan RANSAC (en verte) à gauche et carte C2M à droite ; partie de la façade Est de l'église Saint Maurice [Nespeca R. et al., 2016].

Carte d'occlusion ambiante : portion de ciel visible. La carte d'occlusion ambiante [Duguet F. et al, 2004b] permet de décrire la distribution sur une surface des valeurs calculées pour chaque point 3D de ce que l'on appelle la portion de ciel visible. Cette valeur est comprise entre 0 à 1 et correspondent respectivement à une valeur de noir et une valeur de blanc. Il s'agit ici de la mesure du nombre d'occlusions en chaque point.

Dans le cas d'une maçonnerie, l'occlusion ambiante fait émerger clairement des détails importants, tels que des zones de dépression, les joints entre les segments (représentant entre autres les blocs de pierre), ou bien même les détachements (perte de matière). La carte obtenue peut également être accompagnée de représentations graphiques des données, obtenues préalablement par les traitements (Figure 132). Pris dans son ensemble, cet attribut peut constituer un indicateur du niveau d'exposition (portion de ciel visible) d'une surface. Le graphique ci-dessous nous montre la distribution des valeurs de gris détectées sur une échelle subdivisée en 256 valeurs.

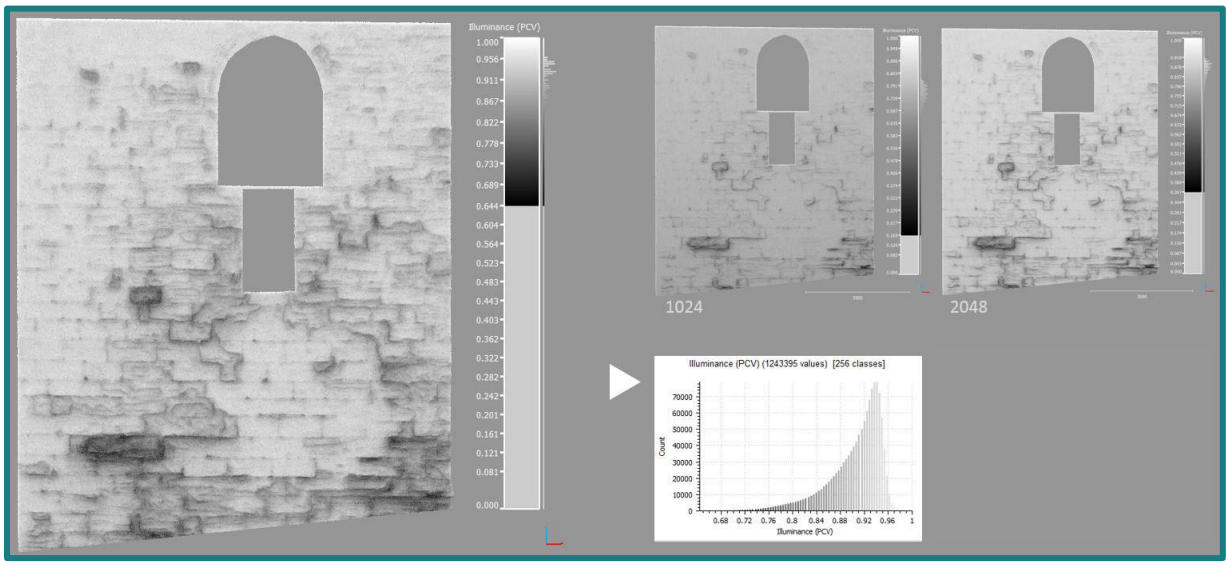


Figure 132 : Analyse du nuage de point en Occlusion ambiante : partie de la façade Est de l'église Saint Maurice

Carte des normales. L'élaboration de cette carte s'appuie sur les valeurs de normales déjà à disposition par le nuage de points, et se réalise en deux étapes (Figure 133).

Une première transformation **(1)** de normales s'effectue en direction de gradient (direction du vecteur de la normale). Une deuxième transformation **(2)** qui se base sur la première, transforme les directions de gradient dans un espace de valeur colorimétrique HSV (ENG : Hue Saturation Value, FR : Teinte Saturation Valeur).

En connaissant les valeurs de normales de chaque point, il est possible d'obtenir une valeur moyenne, avec une analyse plus étendue, afin de connaître l'orientation moyenne d'un groupe de point contenu dans une région annoté par exemple.
Il est important de souligner que pour les traitements orientés vers les normales et les courbures, il est nécessaire de réaliser au préalable une normalisation des normales, pour ainsi éviter certains problèmes de calcul.

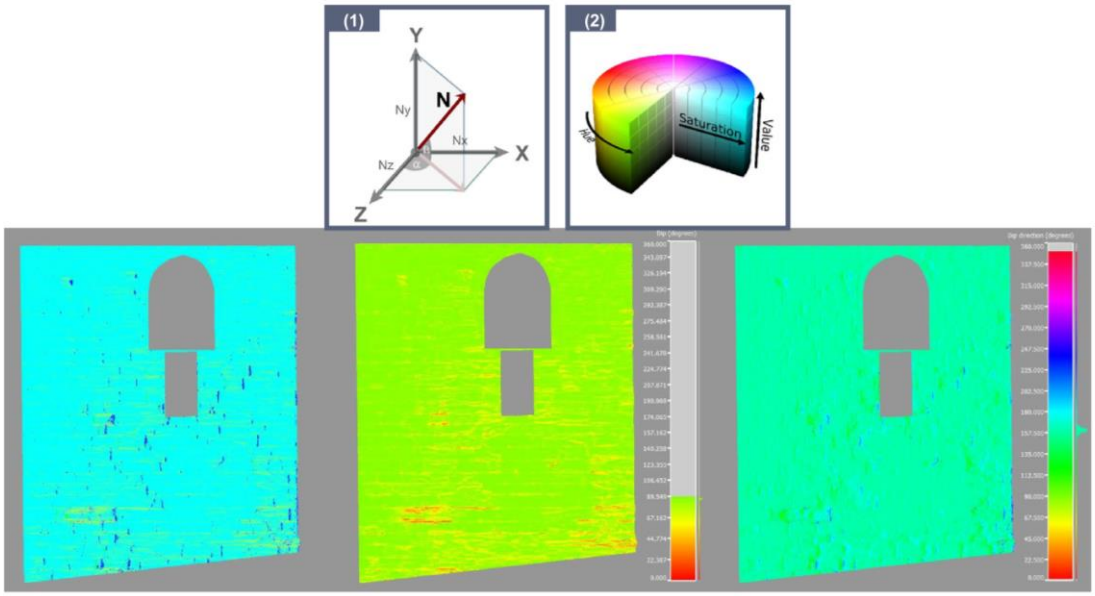


Figure 133 : Carte des normales : partie de la façade Est de l'église Saint Maurice

Carte de courbure [Adrian J et al., 2014][Pamart A. et al., 2015]. Elle est définie comme un traitement qui stocke la concavité et la convexité du nuage de points en chaque point. Trois types de courbures peuvent être déterminés : Gaussien (ENG : Gaussian), Moyen (ENG : Mean), et taux de changement des normales (ENG : Normal Change Rate). Différentes valeurs de Kernel (valeur de résolution des traitements) ont été testées pour chaque type de courbure calculable, afin de mettre en évidence des informations visuelles caractéristiques. Nous avons pu observer que le meilleur compromis se trouvait à une valeur de Kernel égale à 20 millimètres. Cette valeur est effectivement conforme avec les caractéristiques minimums de cet artefact, car celui-ci a été simplifié pour faciliter les calculs et obtenir une organisation des points du nuage régulière. La carte qui montre le plus d'informations est celle qui a été calculée par la méthode de *Normal Change rate* (Figure 134).

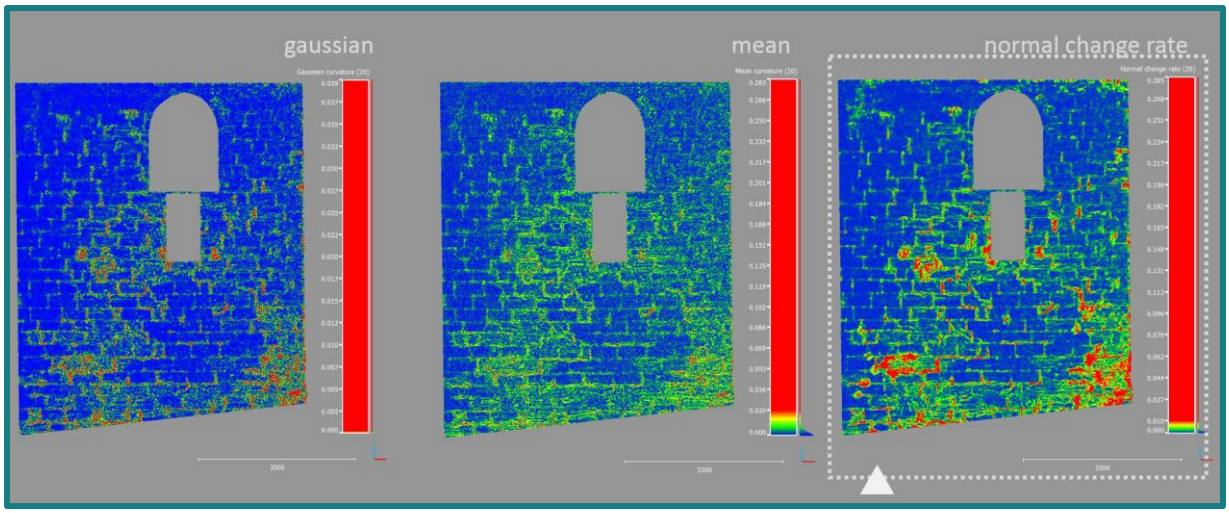


Figure 134 : Cartes des courbures avec les trois méthodes dont la dernière par "Normal Change Rate" (à droite) montre des résultats significatifs : partie de la façade Est de l'église Saint Maurice [Nespeca R. et al., 2016].

Tout comme la carte d'occlusion ambiante, l'analyse des courbures est très utile pour mettre en évidence les blocs de pierres de l'édifice et pour identifier un appareillage (technique de construction) sur la façade en correspondance.

Cartes de rugosité [Pollyea R. M. et al., 2011]**.** La dernière méthode expérimentée est le calcul de la rugosité. Pour chaque point, la valeur de rugosité correspond à la distance entre un point donné et le meilleur plan correspondant calculé sur les points voisins. Le facteur Kernel, également paramétrable, a été imposé au début des résultats de calculs, car il est décisif pour les traitements. Étant donné la taille de l'objet, la valeur de Kernel égale à 200 millimètre montre des résultats très satisfaisants car nous pouvons directement discerner des zones. Ce type d'attribut pourrait bien être utilisé pour comparer différentes régions appartenant au même concept (par exemple pour différencier les états d'avancement d'un même phénomène de dégradation, ou bien pour distinguer des matériaux par leur aspect de surface). Par ailleurs, cette analyse permet également de mettre en évidence des zones de dépression, notamment l'apparition de ce que l'on pourrait reconnaitre comme étant des traces de ruissellement d'eaux pluviales : une information importante que l'on pourrait croiser avec des formes d'altérations de type « *Colonisation Biologique* » (Figure 135). Il est d'ailleurs possible de combiner cette analyse avec les relevés cartographiques (de ce type d'altération) réalisées par [Benard A., 2015] et y déceler des similarités.

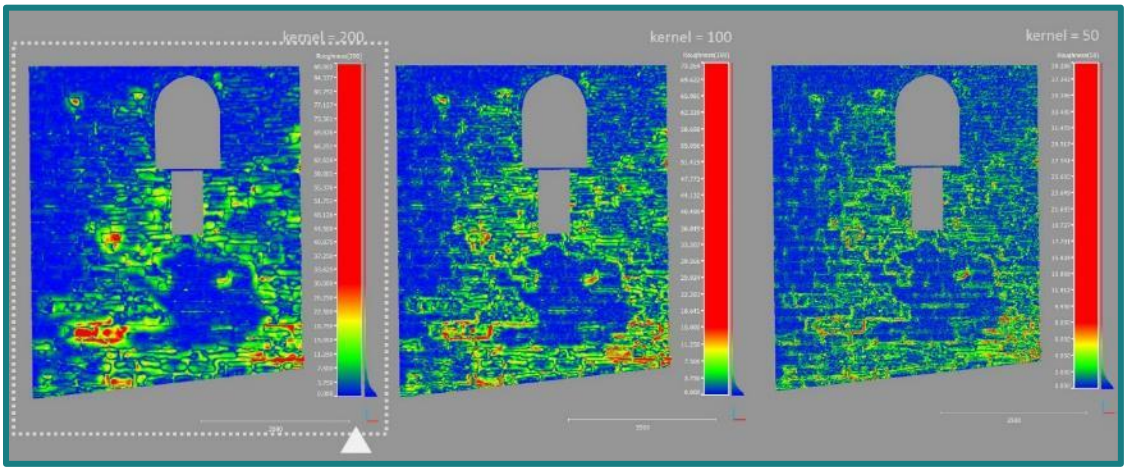


Figure 135: Différentes cartes de rugosité avec différentes valeurs de Kernel : partie de la façade Est de l'église Saint Maurice [Nespeca R. et al., 2016].

4.5.2. Intégration de la dimension morphologique dans l'approche de modélisation conceptuelle

Le résultat de ces différentes phases de traitement montre que le nuage de points est enrichi avec quatre nouveaux descripteurs, additionnés avec ceux déjà disponibles après le processus de reconstruction tridimensionnel. Chacune des analyses fournit non seulement une carte visuelle, mais également des valeurs quantitatives disponibles. De plus, si le nuage de points reconstruit par photogrammétrie est positionné dans un référentiel absolu et réel, les valeurs obtenues par chaque calcul sont, eux aussi, dans une référence connue : ils fournissent donc des résultats tout autant objectifs.

Par ailleurs, les différentes cartes produites par les méthodes d'analyse décrites ci-dessus sont susceptibles d'être utilisées comme support (à exploiter visuellement par l'utilisateur ou informatiquement par des outils d'assistance à la sélection) lors du processus d'identification et désignation (annotation sémantique) (Figure 136).

La dimension morphologique sert non seulement à extraire des descripteurs géométrico-visuels, mais est également utile pour guider l'expert lors du processus d'annotation sémantique d'entités scientifiquement observables.

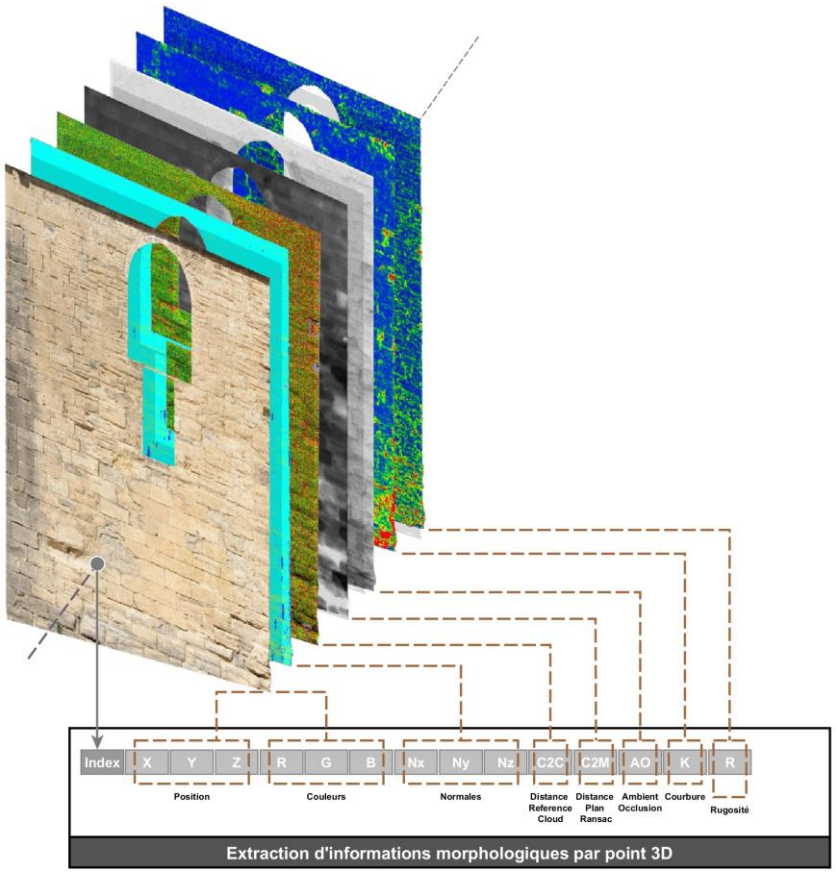


Figure 136 : Possibilité d'extraction d'information morphologique pour un index 3D donné par analyse géométrico-visuelle : partie de la façade Est de l'église Saint Maurice [Nespeca R. et al., 2016].

La Figure 137 compare ces différents aspects. Une image orientée est utilisée, et montre notamment des annotations réalisées manuellement sur le calque thématique « *Altération* » particulièrement sur les « *Pertes de matière* » localisées sur un composant architectural « *Mur* » (image de gauche).

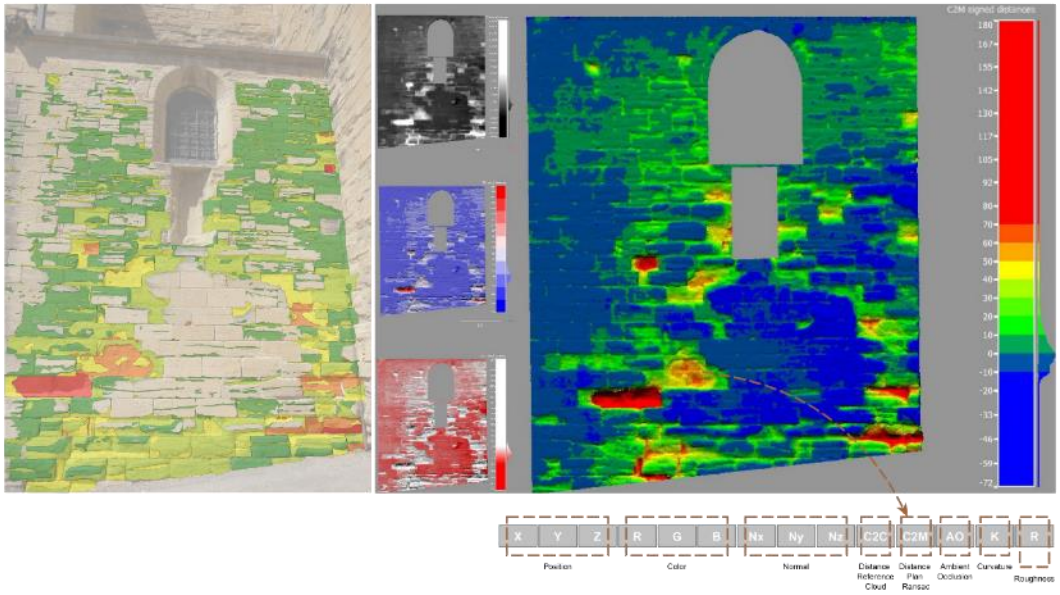


Figure 137: Annotations traditionnelles (à gauche), et l'analyse géométrico-visuelle automatique du nuage de point (à droite) pour l'altération "Détachement".

La visualisation de droite, issue d'un nuage de points (portant sur un état de conservation spécifique), utilisée comme base pour extraire le descripteur « *Perte de matière* », a été calculée grâce à une analyse RANSAC. Nous pouvons ici observer les avantages fournis par la prise en compte complémentaires d'une analyse experte (basée sur critères qualitatifs) et d'une analyse géométrique (basée sur critères quantitatifs capable de précisé l'annotation manuelle). Comme nous le verrons dans les paragraphes suivants, ce double regard (qualitatif/quantitatif) sur la description de l'état de conservation constitue l'objectif central de notre approche de corrélation multidimensionnelle.

Pour conclure sur cette partie de notre approche, la Figure 138 montre l'articulation entre le point de départ **(1)** et la contribution scientifique apportée par notre travail de recherche **(2)**. Le nuage de points, constituant l'élément essentiel de l'approche d'analyse morphologique, est produit par un processus de reconstruction tridimensionnelle basé sur les images, et référencé au sein d'un système de coordonnée absolu pour l'obtention de données métriques **(1.A.)**. Le nuage de points 3D, résultat de ce processus de traitement renferme des informations de plusieurs types, qui peuvent être mis en exergue grâce à des méthodes d'analyses géométrico-visuelles afin d'extraire des descripteurs morphologiques **(1.B.)** : des positions (coordonnées) et des données colorimétriques (fournies directement à la suite du processus de reconstruction 3D) **(1.B.1.)**, des valeurs de normales **(1.B.2.)**, des valeurs comparatives C2C de nuages de points **(1.B.3)**, des valeurs de distributions en profondeurs/ plan Ransac **(1.B.4.)**, des valeurs d'occlusion ambiante **(1.B.5.)**, des valeurs de courbures **(1.B.6)**, et enfin des valeurs de rugosité **(1.B.7.)**. Les méthodes d'analyse expérimentées donnent accès à des supports d'observations (et à des descripteurs) pertinents pour l'étude de l'état de conservation. Tous ces descripteurs **(2.A.1.)** sont extraits à partir d'un même nuage de points **(2.A.)**. Il s'agit donc d'un jeu de méthodes facilement adaptable à notre approche car nous avons la possibilité de structurer les données de la même façon que celles produites dans la dimension spatiale. C'est-à-dire que l'on peut stocker ces données en utilisant les mêmes index. Un point 3D du nuage de points sera donc associé à un index unique ayant *n* attributs géométrico-visuels. Lorsqu'un point 3D est sélectionné, nous pouvons donc accéder à ces valeurs, représentant des attributs morphologiques extraits **(2.A.2)**.

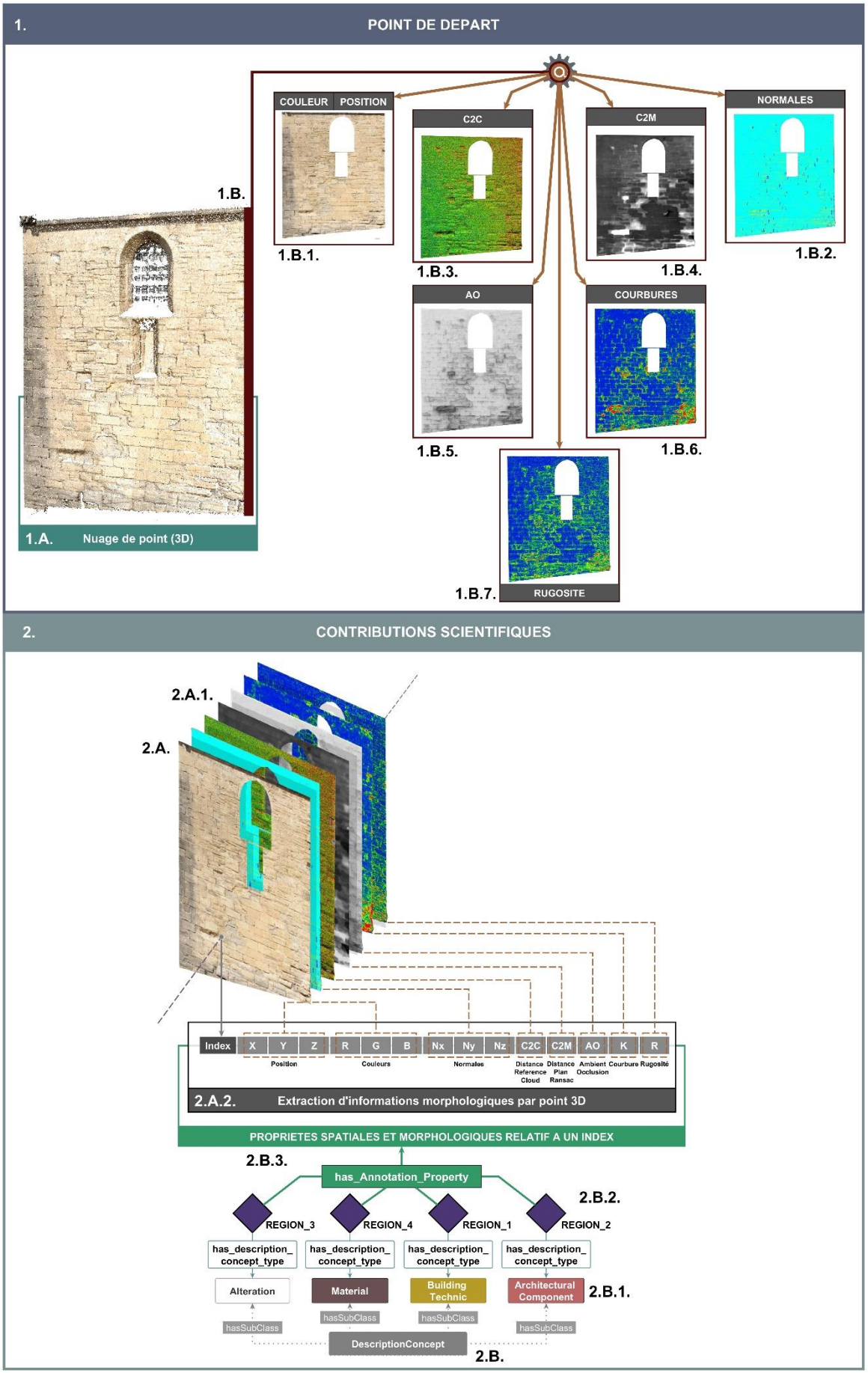


Figure 138 : Du point de départ sur l'analyse morphologique vers une contribution dans la conception de l'ontologie.

Ce qui nous emmène à la relation entre cette dimension et notre approche de modélisation conceptuelle. Comme nous l'avons expliqué dans la section 4.3.1., les connaissances de ce domaine sont réunies au sein de la classe « *ConceptDeDescription* » à travers les sous-classes « *Alteration* », « *Materiau* », « *TechniqueDeConstruction* » et « *ComposantArchitecturaux* » **(2.B.1.)**. Nous savons également que chacune d'elles (renfermant une hiérarchie formelle de concept) peut être mise en relation avec la classe « *D35_Area* » instanciée conceptuellement par les individus **(2.B.2.)** : « *REGION_1* », « *REGION_2* », « *REGION_3* » et *REGION_4* ».
Ces concepts/classes instancié(e)s ont été défini(e)s comme étant relié(e)s entre eux par des propriétés d'objets d'une part, puis d'autre part, décrit(e)s par des propriétés de données. En ce sens, nous avons donc utilisé les attributs issus d'une analyse morphologique des régions 2D/3D, pour les associer aux concepts (donc aux individus) en tant que propriétés de données, particulièrement pour les individus typés en vue de décrire et d'identifier leurs caractéristiques géométrico-visuelles [Hmida H. B. et al., 2013]. Donc pour chacun de ces quatre individus issus de la classe « *D35_Area* », nous avons 14 valeurs de description. Ainsi, il sera possible de réaliser des études de similarités. La contribution présentée dans la Figure 138 met donc bien l'accent sur le potentiel de corrélation entre l'aspect sémantique et morphologique de notre modèle conceptuel.

4.6. De l'intégration à la corrélation d'informations multidimensionnelles

Comme indiqué au début de ce chapitre, un système regroupant les trois dimensions présentées (sémantique, spatiale, morphologique) serait une solution pertinente pour décrire, dans toute sa complexité, les activités d'études de l'état de conservation d'un édifice patrimonial. Un travail de recherche récent, précédant cette thèse, et à l'état de l'art dans cette orientation scientifique, a tenté d'élaborer un système prenant en compte des caractéristiques assez proches de ces dimensions, mais n'exploite pas une ontologie pour représenter les informations et connaissances générées durant le processus d'observation scientifique. Il s'agit du projet SACRE [SACRE, 2017] [Janvier-Badosa S. et al., 2016]. Un projet coordonné par le PRISME, et dans lequel le laboratoire MAP s'est concentré pour élaborer un prototype de système d'information 3D, dans la continuité du projet NUBES [NUBES, 2017] [De Luca L., 2014]. Le paragraphe suivant est consacré à la présentation de ce projet, qui constitue pour nous un point de départ essentiel. Nous présenterons ensuite notre proposition qui consiste en un moteur de corrélation sémantique prenant en considération les trois dimensions présentés (sémantique, spatiale, et morphologique), en expliquant la manière dont nous les avons exploitées au travers de notre ontologie de domaine.

4.6.1. Un système pour l'intégration et la documentation numérique dédiée à la conservation : point de départ

Dans le cadre du projet SACRE (Suivi des Altérations, Caractérisation et REstauration des monuments en pierre calcaire) [SACRE, 2017], un système a été produit pour tenter de suivre et de mettre en relation les données et informations issues d'acquisitions concernant un bâti maçonné particulier.

Le cas d'étude expérimenté est le Château de Chambord, un édifice que nous avons déjà présenté dans le chapitre 2 (section 2.4.3.), sur lequel des analyses physico-chimiques par échantillon physique ont été réalisées, entre autres, parmi la panoplie de données disponibles sur ce bâtiment. Le projet se base sur un ensemble de données et informations riches issues d'acquisitions in situ et issues d'analyses en laboratoire, et comprend :

- D'anciens textes documentaires (acte notarié détaillant la date d'achat, et les types de pierre utilisés,
- Des signes lapidaires relevés sur la surface de la pierre,
- Des cartographies d'altérations effectuées par des observations in situ et identifiées grâce au glossaire d'altérations [Verges-Belmin V., 2008],
- Des rapports d'échantillons (section 2.4.3.2.2.),
- Des données météorologiques (section 2.2.3.),
- Des données topographiques et 3D (section 2.2.1.),
- Un modèle 3D des parties les plus pertinentes du bâti.

La partie du bâti étudiée pour l'expérimentation, est la Tour du Chaudron (Château de Chambord). Celle-ci a été modélisée en utilisant des principes de photomodélisation [De Luca L., 2009]. La méthode de structuration de la géométrie choisie consiste à former des sous-éléments établis en fonction de critères architecturaux en prenant en compte le jointage cohérent entre les éléments modélisés. Une extraction des textures à partir des photographies est ensuite réalisée avant qu'elles ne soient projetées sur le modèle 3D final discrétisé (Figure 139).

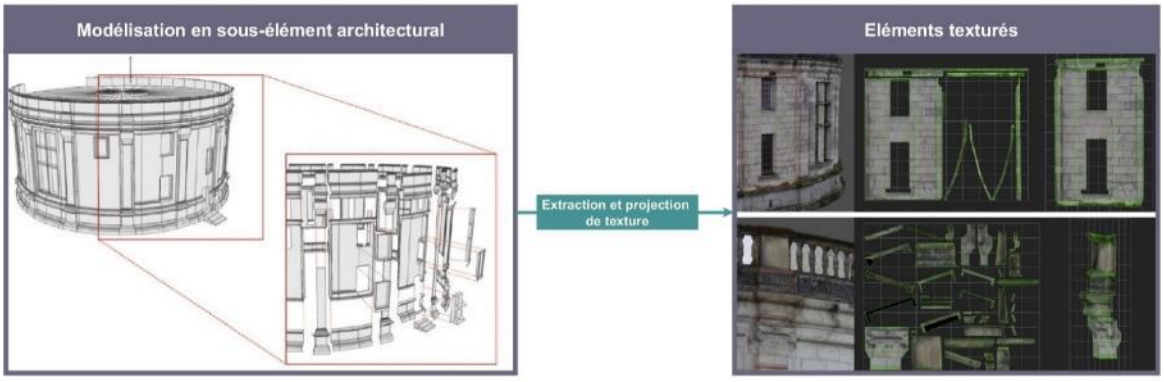


Figure 139 : Méthode de modélisation et de texturage pour la création du support d'annotation.

Le modèle tridimensionnel a ensuite été importé dans la plateforme NUBES (section 3.2.1.), qui a fait l'objet d'implémentations informatiques spécifiques pour ce projet [Stefani C. et al., 2014].

Pour l'identification graphique des altérations, NUBES a été doté d'un éditeur SVG pour dessiner des régions. L'ensemble de l'interface d'annotation est en directe relation avec la base de données et l'espace 3D. Les annotations sont réalisées sur la texture pour ensuite être projetées sur le modèle pour la visualisation tridimensionnelle. L'outil créé, dans le cadre du projet SACRE, permet d'annoter des régions sur des calques hiérarchiques spécifiques concernant trois principales catégories : la datation, les altérations et la provenance des pierres de construction. Chaque catégorie est structurée en sous-calques hiérarchiques, chacun d'eux contenant des sous-types. Par exemple, la catégorie « *dégradation de la pierre* » est hiérarchisée en « *dégradation biologique* », « *dégradation physico-chimique* » et « *dégradation mécanique* ». Puis la « *dégradation biologique* » a elle-même des sous-types, « *mousses* » et « *lichens* ». C'est grâce à cette catégorisation que les annotations sont enrichies sémantiquement.

Des requêtes sont possibles à travers une interface fournissant aux experts une nouvelle méthode pour afficher et croiser les annotations documentées. Nous les avons classés dans plusieurs catégories :

- **Distribution spatiale de cartographie à la volée** : les cartographies peuvent être affichées, être interrogées par des requêtes et comparées directement sur la scène 3D au moyen de liste hiérarchique de termes. Par exemple, une analyse de la distribution spatiale des signes lapidaires avec la datation des matériaux peut révéler des informations relatives à la progression temporelle du site de construction.
- **Analyses statistiques :** par exemple, la surface en pourcentage, occupée par un calque de description par rapport à la surface générale, peut être définie. Elle donne une information sur la surface de pierre la plus affectée par une altération.
- **Intersection entre différentes cartographies** : basée sur un algorithme de géométrie computationnel, cette fonctionnalité permet d'envoyer un « faisceau » qui « traverse » tous les calques pour ressortir des informations relatives à un point défini de la géométrie. Cette caractéristique peut aider les scientifiques à comprendre plusieurs processus de dégradations spécifiques en superposant des données cartographiques. Cette fonction permet de connaître le degré de corrélation entre deux annotations spécifiques ; en particulier, des corrélations statistiques entre Dégradation -> Matériau ou Dégradation -> datation peuvent être étudiées.

La méthode et le prototype proposé, dans le cadre du projet SACRE, sont certainement une première tentative de système d'information dédié au suivi de l'état de conservation d'un édifice. Le prototype présente déjà les fonctionnalités pertinentes pour notre sujet.
Premièrement via l'utilisation d'une représentation 3D volumique de qualité, nous donnons la possibilité aux experts de la conservation de réaliser des observations sur des entités

observables telles que les grandes catégories qui caractérisent le domaine : les altérations, les matériaux, la provenance.

Deuxièmement, la méthode de subdivision du modèle permet en effet d'associer, d'une part des textures qui leurs sont propres, sur lesquelles sont réalisées les annotations, et d'autre part de croiser deux informations basées sur l'élément architectural (par exemple : cet élément a une altération, et/ou ce matériau).

Enfin, le système général met à disposition une structuration de calque de telle sorte que les termes utilisés soient organisés en hiérarchie pour permettre de spécialiser les termes à trois niveaux de granularité. Grâce à cette application, nous pouvons réaliser des observations et, par le biais de requêtes spatiales, extraire des informations grâce aux données de la base.

Malgré la prise en compte de beaucoup d'aspects et des nombreuses ressources intégrées, ce système présente des limitations importantes que notre approche essaye de dépasser. Tout d'abord, ce système ne permet pas de décrire, de prendre en considération et de représenter l'ensemble du processus d'observation scientifique allant de l'acquisition de données jusqu'à la spatialisation de ces données en corrélation avec d'autres ressources. Par ailleurs, l'annotation ne peut se faire que sur un modèle 3D structuré et texturé de façon préalable sans possibilité d'associer des nouvelles géométries. De plus, l'utilisation d'un modèle volumique est une limite si l'on veut réaliser des analyses morphologiques plus précises. En effet, les murs « numériques » de l'édifice ne sont que des plans verticaux, ce qui ne permet pas de détecter des déformations, même minimes. En d'autres termes, la projection des textures sur des cartes UV implique des approximations sur le plan métrique en phase d'analyse géométrique des régions annotées. Donc, même si les textures permettent de réaliser des analyses visuelles de qualité, il n'est pas possible de discerner les reliefs fins dus à la morphologie irrégulière de l'enveloppe du bâti.

En outre, telle que réalisé dans cette approche, la reconstruction d'une représentation tridimensionnelle ne permet pas de fournir un suivi temporel précis. Il serait nécessaire de produire une seconde reconstruction en suivant exactement les mêmes protocoles, pour réaliser des analyses comparatives entre le modèle à l'état T0 et le modèle à l'état T+1, tous deux positionnées dans un système de référence métrique absolu.

L'utilisation de termes, liés au calque de description, est une première tentative de caractérisation d'une dimension sémantique nous laissant présager que la formalisation des informations et/ou des connaissances du domaine serait un grand pas vers l'analyse partagée des artefacts du patrimoine. Comme nous avons pu le constater dans la section 4.3.1.2., nous nous sommes également inspirés de la notion de calques thématiques pour afficher des informations. Cependant, nous tentons, grâce à ces classes liées dans la dimension sémantique, de recouvrir l'ensemble des données, informations et connaissances décrivant l'état de conservation des édifices patrimoniaux. Dans le cadre du projet SACRE, un scénario a été établi afin de connaître les verrous et possibilité en vue de réaliser un système prenant en compte de tels aspects (Figure 140).

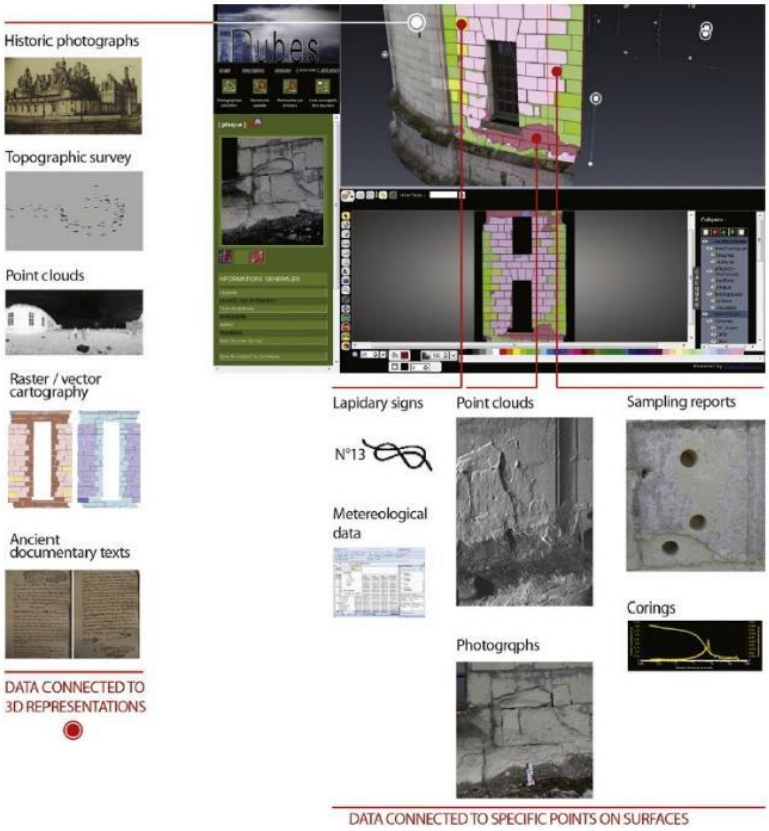


Figure 140 : Prise en considération des données d'acquisition pour la description et l'observation scientifique de la conservation du patrimoine architectural : cas du Château de Chambord [Stefani C. et al., 2014].

Le projet SACRE a été une opportunité pour entreprendre une véritable collecte de données, couvrant un grand nombre de bâtiments et grâce à auxquelles nous pouvons nous baser en vue d'initier notre travail de recherche.

4.6.2. Corrélation multidimensionnelle d'annotation sémantique

4.6.2.1. Processus de documentation basé sur l'ontologie de domaine : présentation générale

Comme souligné dans la présentation de l'architecture générale de notre approche, l'ontologie de domaine proposée est fortement connectée à la méthodologie de spatialisation d'annotations. Elle introduit un cadre général de travail pour suivre les observations scientifiques portées sur les analyses du bâti patrimonial. Le processus général est composé de cinq principales étapes représentées respectivement par quatre activités pouvant être réalisées par un même acteur ou des acteurs différents de manière collaborative (Figure 141).

4.6.2.1.1. Génération de support d'observation par ajout d'acquisitions spatialisables

Le système que nous avons conçu est principalement basé sur un outil d'annotation d'images spatialisées. Par conséquent, la première activité, réalisée par un acteur au sein du système, dans la mesure où celui devra disposer des droits pour y accéder, constitue une des

bases pour la suite de tout le processus. Cette étape cruciale est nommée « génération d'un support d'observation » **(T1)**. Cet expert, qui a acquis ou produit préalablement des images, peut les utiliser afin de créer une représentation 3D. Dans le cas où le modèle 3D du bâti patrimonial étudié est déjà produit, il a la possibilité de les spatialiser au sein d'une référence considérée comme absolue. En outre, par l'ajout de nouvelles images, l'expert fournit un support d'annotations pour effectuer des observations et des analyses.

4.6.2.1.2. Processus d'annotation : région d'une entité reconnue

À la suite de cet ajout de ressources iconographiques, un acteur (le même ou un second) peut réaliser des annotations sur les supports disponibles en dessinant des régions 2D : c'est la « phase d'annotation » **(T2)**. Les annotations concernent des éléments spécifiques et observables, relatives aux quatre calques de description thématiques. Lors de cette étape, l'expert est dans une phase d'identification.

4.6.2.1.3. Extraction d'information : analyse quantitative

Des annotations étant effectuées sur le support d'observation, un processus extrait des relations spatiales 2D/3D/2D et permet la propagation de l'annotation sur les autres images, ainsi que les caractéristiques morphologiques inhérentes à la région annotée : c'est la « phase de propagation et d'extraction de descripteurs morphologiques » **(T3)**.

4.6.2.1.4. Processus de désignation : analyse qualitative

Après avoir réalisé des annotations concernant des entités observables, l'acteur assigne un concept à l'annotation dessinée, en le sélectionnant dans une liste de terme parmi les quatre classes de description de l'ontologie pour la description du patrimoine : « Matériau », « Composant Architectural », « Altération » et « Technique de Construction » : c'est la « phase de désignation » **(T4).**

4.6.2.1.5. Processus d'argumentation

Enfin un acteur fournit une argumentation (une justification scientifique), relative à son choix de concept lors du processus d'annotation, en indiquant également les ressources et les références qu'il a exploitées pour obtenir cette conclusion (sources documentaires, observation in situ, données analytiques par exemple, disponible dans la base de données) : c'est la « phase d'argumentation » **(T5)**.

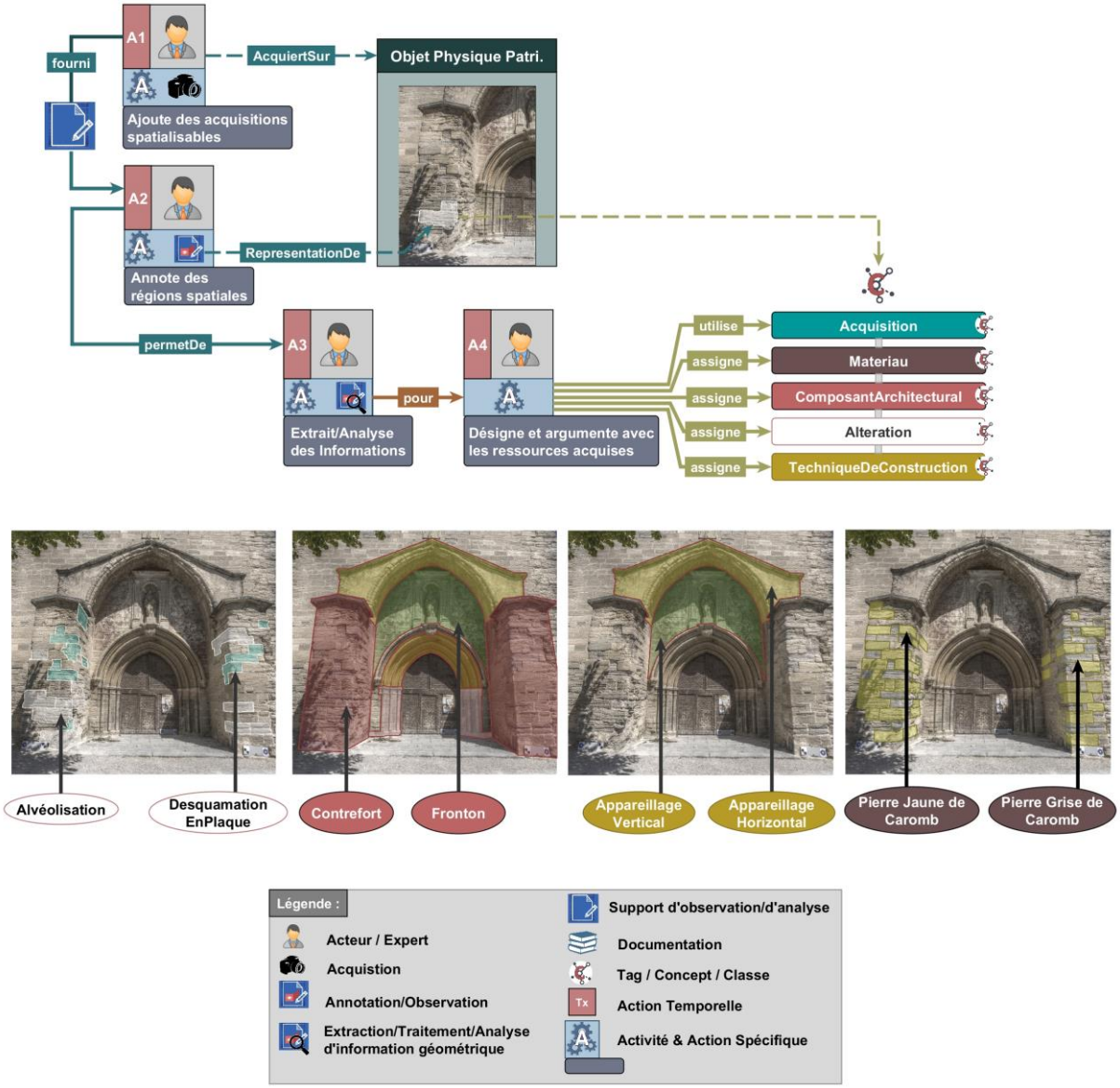


Figure 141 : Approche générale du système avec exemples.

4.6.2.2. Documentation des acquisitions et des processus

Le système est donc principalement fondé sur un processus d'annotation sémantique 2D/3D produit par une reconstruction automatique 3D basée sur les images. Nous ne voulons pas seulement extraire des données brutes, mais également documenter la façon dont ces données ont été acquises (Annexe A.3.b). Par conséquent, nous pouvons décrire ces types d'acquisitions (comme une image par exemple) en utilisant l'extension **CRMdig** disponible à présent dans notre ontologie de domaine. Par exemple, des images acquises lors d'une campagne photogrammétrique, sur lesquelles sera réalisée une annotation, sont d'abord transformées, à travers un processus d'orientation, en images orientées 3D, comme nous l'avons vu lors de la description de la dimension spatiale (section4.4.3.) (Annexe A.3.c). Ces images sont accompagnées de leurs caractéristiques spécifiques (métadonnées). Notre ontologie fournit un cadre de travail pour la documenter, pour suivre précisément la provenance de la donnée (Figure 142).

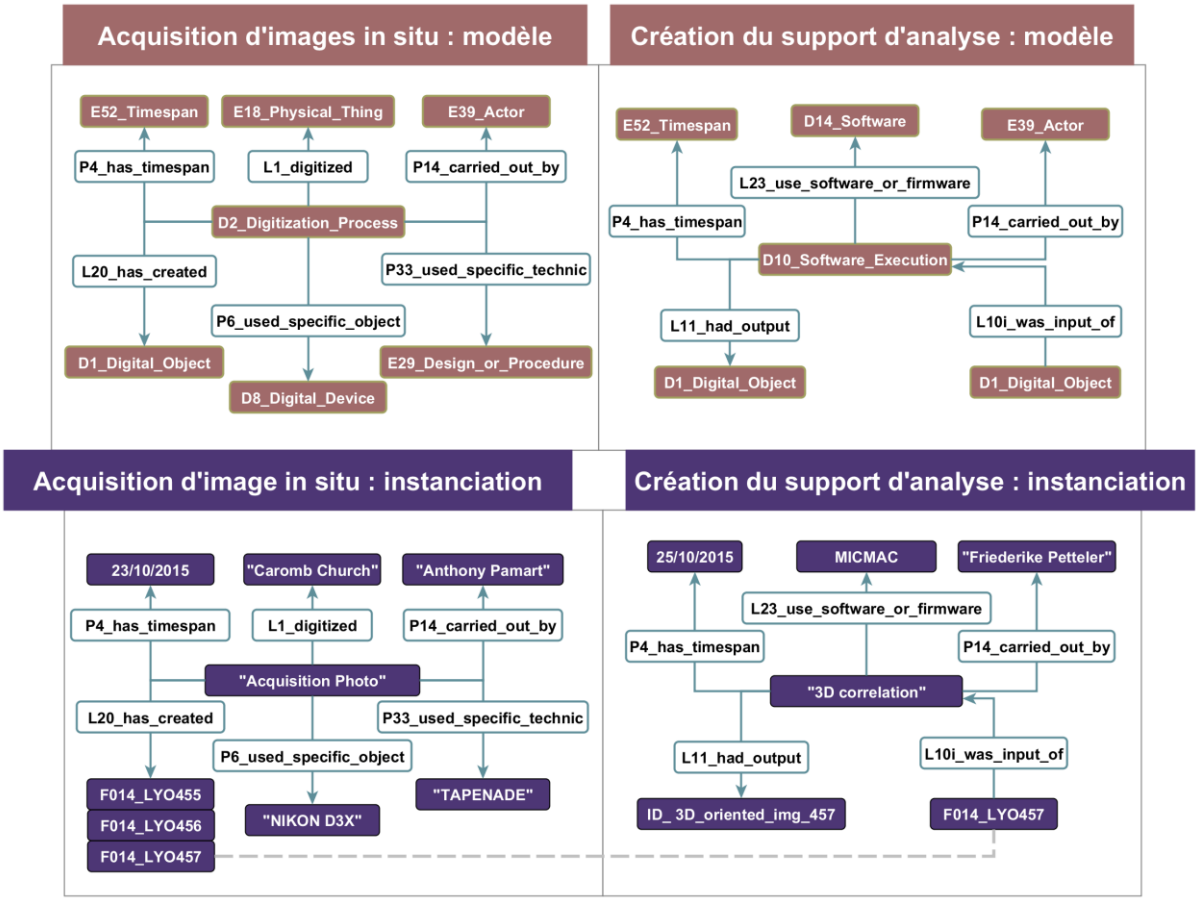


Figure 142 : Exemple de description d'une acquisition par le CRMdig pour la provenance des données : modèle général conceptuel (à droite) et son instanciation (à gauche).

L'image 3D, spatialisée autour du modèle 3D global, est associée avec un type d'acquisition : « *3D_oriented_image* » sous-classe de « *Processed_Data* » (T1). À partir de cette étape, le processus d'annotation des images orientées est possible, car elles constituent un support de description (T1). Des régions peuvent être dessinées et propagées sur les autres images par une projection 2D/3D (T2).

À travers la dimension spatiale et le processus d'orientation 3D de l'image, des descripteurs peuvent être extraits et mis à disposition par la base de données (T3). Puis les régions sont liées à des concepts de l'ontologie selon les calques de description thématique expliquée dans la dimension sémantique (T4), pour enfin justifier leur choix avec des arguments pertinents (T5).

Grâce à la dimension sémantique, le processus d'annotation (T2 à T4) peut être utilisé pour réaliser des descriptions sémantiques de plusieurs aspects de l'état de conservation (également de manière collaborative) au sein d'un système de référence géométrique cohérent. Cet aspect représente le principal potentiel de notre approche. En combinant la superposition 2D des régions sur une image, leurs référencements spatiaux 3D et leurs analyses morphologiques, le processus d'annotation permet d'établir des corrélations multidimensionnelles entre les concepts de l'ontologie de domaine.

Par exemple dans la Figure 145, un acteur dessine une région 2D de couleur rouge sur une image et assigne un concept appartenant à la classe de description sur les dégradations de l'ontologie (*desquamation en plaque*, ENG : *Spalling*). Lors de l'observation, l'ontologie enregistre l'image sur laquelle l'utilisateur a réalisé l'annotation. Cette annotation ainsi que sa représentation 3D, devient donc un individu de la classe « Annotation » dont le concept de description est « *Desquamation* en Plaque », accompagné d'une extraction d'informations sur ses propriétés (propriétés de données) spatiales et morphologiques. Puis, sur le même jeu d'images orientées (pour une acquisition et une reconstruction 3D données), un autre acteur de la conservation dessine une autre région sur la même zone que la première et assigne un concept appartenant à la classe de description « *Composant Architectural* » de l'ontologie (par exemple « *Mur* »). D'autres annotations peuvent être effectuées, décrivant notamment les autres classes thématiques de la conservation (« *Matériau* » et « *Technique de Construction* »).

Chaque annotation possède donc un concept désigné. Une annotation sémantique est une région dessinée avec une couleur choisie par l'utilisateur contenant, par définition, une liste d'index 3D possédant des informations spatiales et morphologiques. Nous obtenons donc des descripteurs, concernant la région : la **position** du barycentre, **l'orientation** principale de l'annotation, l'**extension** spatiale, la **couleur** et la **topologie**. Puis, des descripteurs géométrico-visuels concernant chaque point 3D contenu dans cette région : leur **position**, leur **normale**, leur **couleur**, leur valeur de **plan Ransac**, leur valeur d'**occlusion ambiante**, leur valeur de **courbure** et leur valeur de **rugosité** (Figure 143).

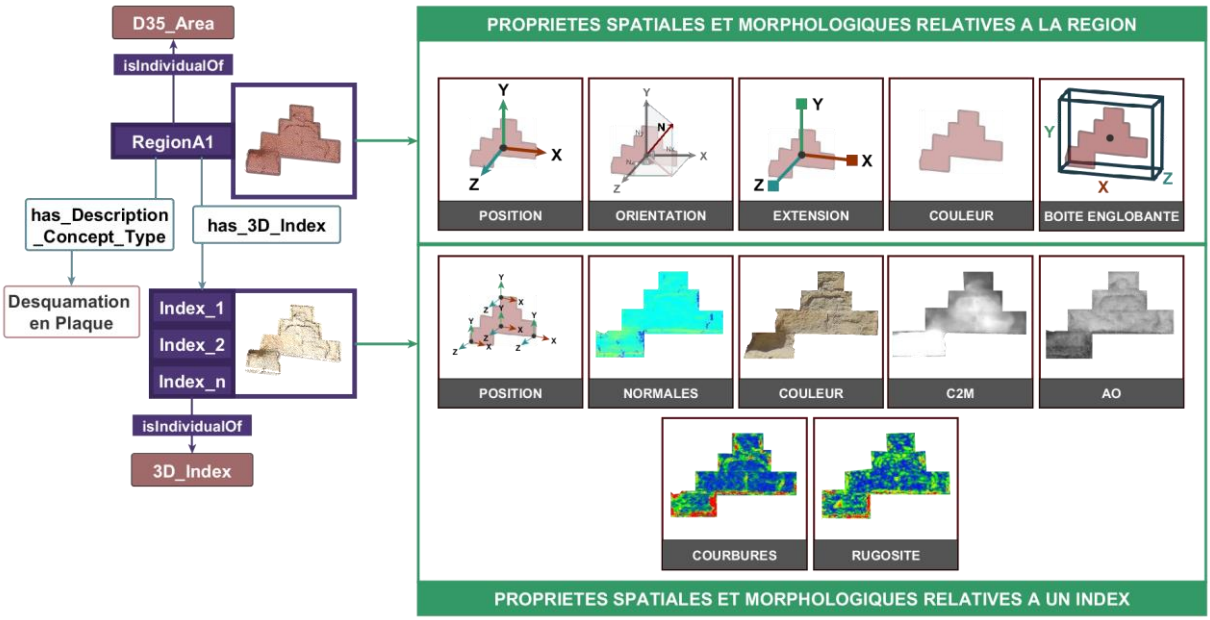


Figure 143 : Précision sur les propriétés spatiales et morphologiques associées à la région et aux indexes 3D contenus dans cette région.

Il est important de souligner que plusieurs informations doivent être saisies à la main, par exemple le nom d'une carrière où la pierre a été extraite, qui est le plus souvent obtenu dans

des documents historiques (tels que des rapports de restaurateurs, devis de construction, facture, etc.).

Un expert peut assigner un terme à son annotation et l'argumenter. De ce fait, d'autres experts peuvent approuver l'observation effectuée par le précédent, et donner plus d'arguments pour lui donner davantage de crédibilité en ajoutant une nouvelle observation. Toutefois, il est également possible de désapprouver une observation, mais impose que l'on donne une autre suggestion (Figure 144). Le degré de pertinence de la désignation peut être défini en interrogeant la base de connaissances. Par exemple, un nombre d'approbations important accompagné d'arguments augmente la pertinence d'une observation.

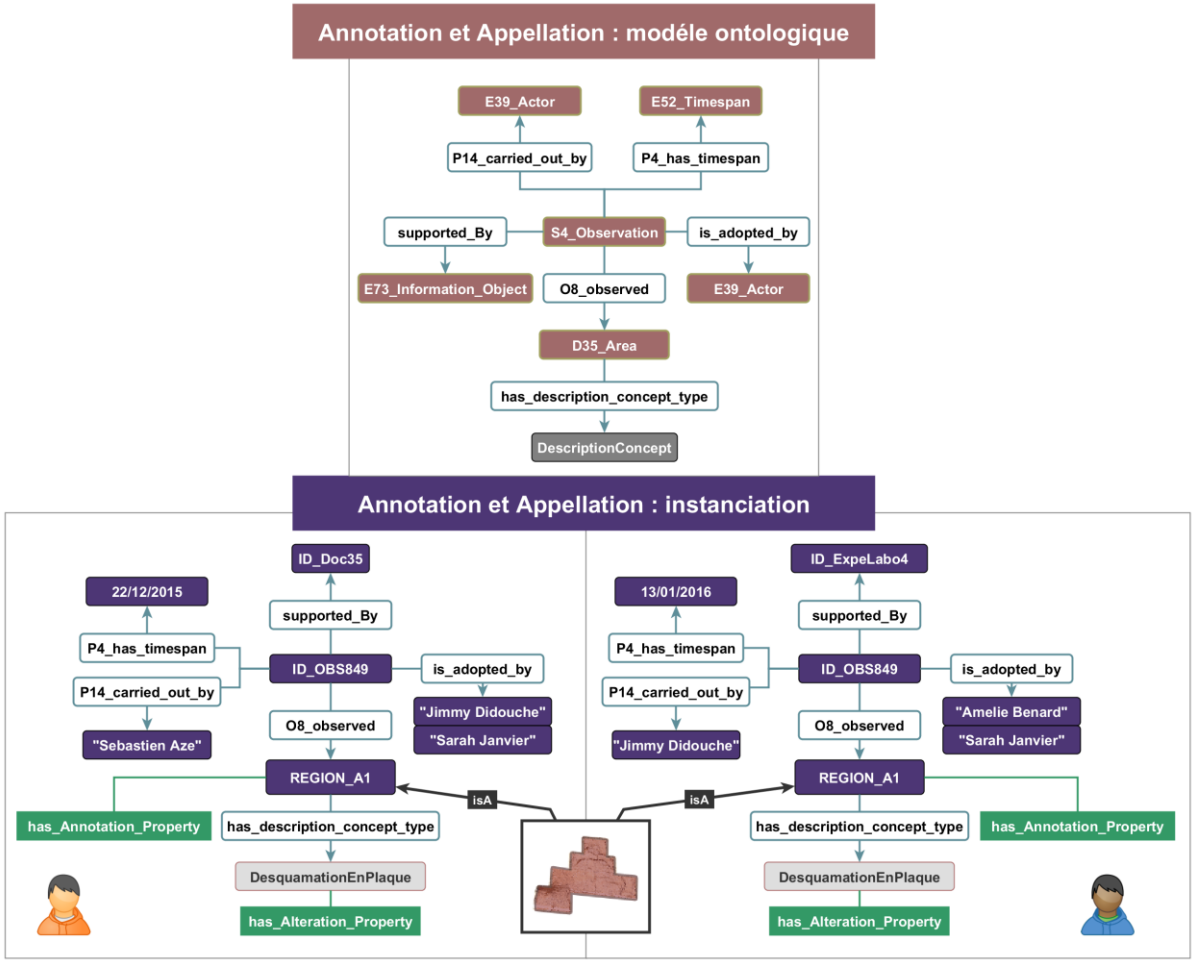


Figure 144 : Observation scientifique d'une altération: modèle conceptuel général (en haut à gauche), première observation (en haut à droite) et enrichissement de l'argumentation (en bas).

À chaque évènement (T1 à T4), il y a une date afin de suivre temporellement les activités de chacun. L'ontologie de domaine documente l'ensemble des évènements, de la reconstruction jusqu'à l'annotation d'images par un expert donné.

Le moteur de corrélation fournit le moyen de croiser ces régions et d'extraire les informations qualitatives et quantitatives reliées. De cette façon, l'expert sera capable d'extraire une chaîne sémantique complète, afin de lui donner l'opportunité d'émettre des hypothèses sur le contexte de création et de progression d'un phénomène d'altération particulier.

4.6.2.3. Analyse statistique des observations instanciées

Dans ce paragraphe, nous présenterons le potentiel d'analyse des observations introduites dans le système. Les précédentes observations impliquant le concept « *Desquamation en Plaque* » par l'intermédiaire d'une région porte ce type, sera relié avec ceux déjà disponibles dans la base de connaissances afin de réaliser des analyses statistiques. Des requêtes SPARQL (ENG : Simple Protocol And RDF Query Language) (section 3.4.4.), peuvent extraire des informations sur cette forme d'altérations spécifiques. De plus, en utilisant ce langage, nous pourrions effectuer plusieurs types de requêtes (mono-concept, mono-calque, et multi-calque) afin de réaliser des similarités, d'extraire des orientations, et des extensions. Nous prenons en considération tous ces aspects d'un point de vue technique et fonctionnel dans le cadre d'une expérimentation qui est développé dans la section 5.

4.6.3. Bilan de notre approche par corrélation multidimensionnelle

La Figure 145, qui synthétise les principales dimensions de notre modélisation conceptuelle, ainsi que ses liens avec des fonctionnalités informatiques du système, peut être divisée en cinq parties distinctes. Elle nous permet de rassembler et de présenter tous les aspects relatifs aux éléments essentiels de notre approche. La première partie est nommée **support de spatialisation et d'analyse multicouche (1.)**. Celle-ci met l'accent sur la mise à disposition d'un support d'analyse, porteur de toutes les observations, de la part des experts, sous forme d'annotations. La dimension spatiale rend possible l'annotation d'images 2D sur **quatre calques de description thématiques** nécessaire et suffisant : Altération, Matériau, Technique de Construction, et Composant Architectural **(1.A.)**. Chacun de ces calques est édité, et nous pouvons aisément comprendre que visuellement ils se superposent. L'annotation de couleur rouge avec le contour blanc est mise davantage en évidence et constitue notre référence pour poursuivre l'explication de la figure. Toutes les images 2D, exploitées pour réaliser des annotations, sont en réalité spatialisées en tant qu'**images orientées 3D (1.B.)** autour d'une représentation 3D de l'édifice. La transformation d'images 2D **(1.A.)** en images orientées 3D **(1.B)** a lieu lors du processus de reconstruction 3D de l'édifice considéré, pris en considération dans la dimension spatiale. Les annotations 2D réalisées sur l'image 2D s'affichent également sur l'image orientée 3D pour les projeter dans un espace tridimensionnel. Comme expliqué précédemment, chaque pixel des images 2D contiennent des index associés au nuage de points par la relation bijective 2D/3D créée lors du processus de modélisation tridimensionnel. Donc une annotation (contenant des index) possède une unique représentation 3D.

Ce qui nous emmène à la partie **2.** de notre figure : **la spatialisation 3D d'annotations**. Nous avons projeté et décomposé, dans l'espace tridimensionnel, les quatre régions 3D superposées, et éditées sur les quatre calques de description. Les calques **2.A.**, **2.B.**, **2.C.**, et **2.D.** concernent respectivement les régions 3D superposées des claques thématiques.

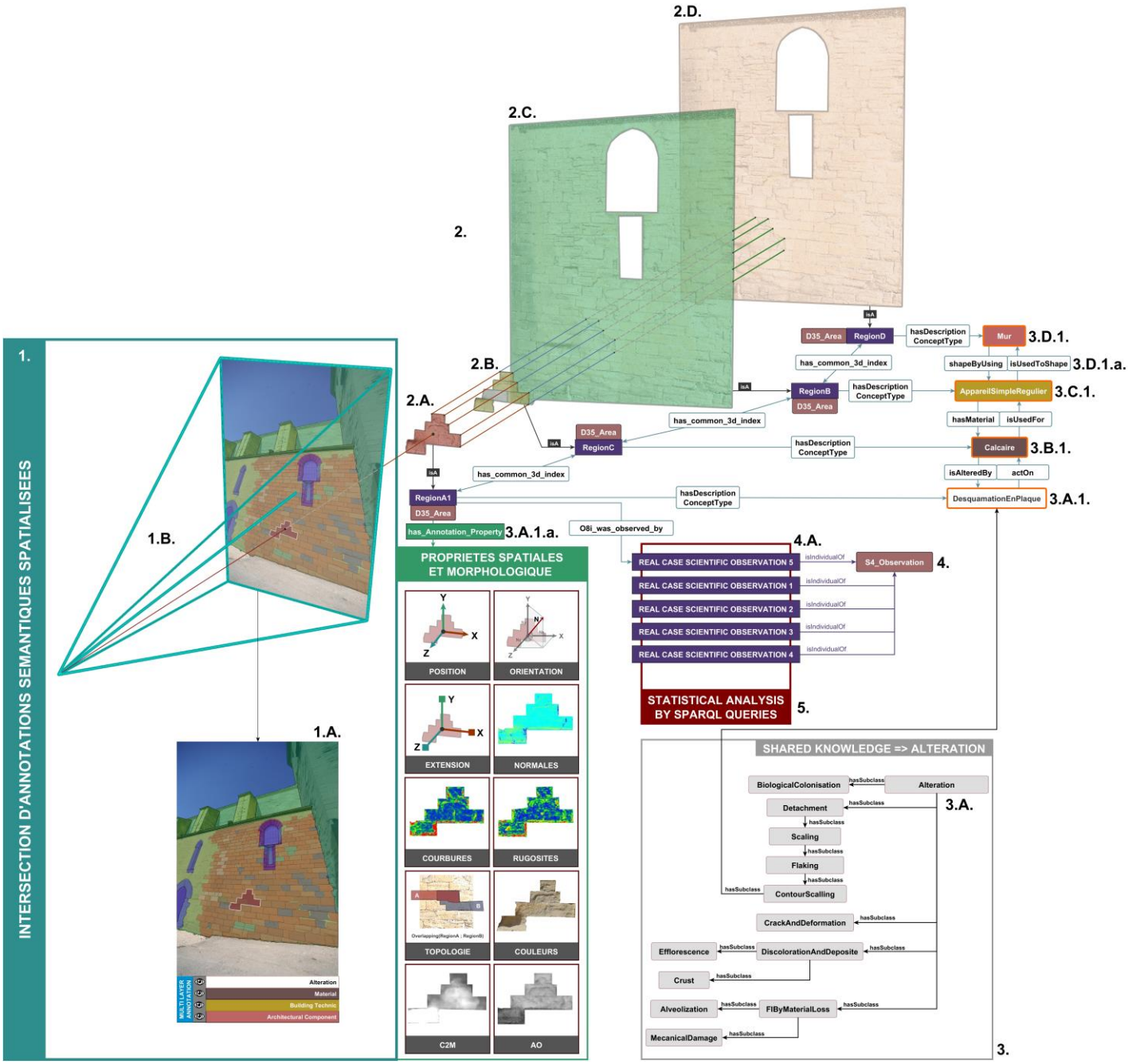


Figure 145 : Moteur de corrélation sémantique multidimensionnel pour le suivi de la conservation du patrimoine culturel architectural.

Ces quatre annotations sont reliées spatialement par le partage de point 3D mais possède cependant des niveaux d'observations différents. Donc pour un point 3D, nous pouvons, dans notre cas, observer quatre niveaux d'informations. À cet étape, la dimension spatiale rend possible la propagation de ces annotations sur les autres images, contenant les mêmes index. Cependant, nous ne pouvons les qualifier sémantiquement. Les régions 2D et 3D sont présentes sous forme de données dans une base de données générées par différentes processus. C'est grâce à la dimension sémantique que les données spatiales sont porteuses

d'un aspect intelligible **(3.) (4.)** à travers l'utilisation d'URIs fourni par notre ontologie de domaine.

Comme nous l'avons vu dans la présentation de la dimension sémantique, notre cœur ontologique est composé de deux parties en étroite relation : les connaissances partagées sur la conservation du patrimoine culturel **(3.)**, puis le modèle conceptuel basé sur la description d'observations scientifiques et des données digitales mises en jeu **(4.)**. La description d'observations se décline (via des vocabulaires contrôlés) en quatre classes principales : **3.A.** correspond notamment au vocabulaire contrôlé sur les altérations de la pierre. Implicitement, 3.B. concerne le vocabulaire défini sur la typologie des matériaux de construction, 3.C. représente le thésaurus sur les techniques de construction, et enfin 3.D. les composants architecturaux. Grâce aux propriétés objets définies lors de la conception de l'ontologie de domaine (par exemple **3.D.1.a.**), les classes sont sémantiquement reliées (en utilisant le langage OWL qui permet de le faire avec plus d'expressivité).

L'observation en tant que telle **(4.)**, est porteuse du processus identification et du processus de désignation de la part de l'expert lors de son diagnostic. Le processus d'observation scientifique fait partie intégrante du modèle conceptuel de référence générique CIDOC-CRM, avec lequel nous décrivons les ressources impliquées dans la description de la conservation du patrimoine culturel. En effet, plusieurs d'entre elles identifient et annotent des régions sur une ou plusieurs images. Chacune des régions dessinées doit faire l'objet d'une désignation. De ce fait, les experts parcourent les thésaurus correspondant au calque de description, afin de trouver le terme qui leur parait le plus adapté. C'est lors de cette étape précise qu'une relation entre la dimension spatiale, (via les régions 3D), et la dimension sémantique (via des concepts de l'ontologie), est créée. Nous sommes donc une phase appelée : le peuplement de l'ontologie. C'est-à-dire que la région créée constitue une instance de la classe « *D35_Area* » qui est associée à un concept choisi par l'expert par la propriété objet « aUnTypeDeConceptDeDescription ». L'ensemble des individus constitue la liaison entre la spatialité et la sémantique. Donc, lors d'un processus d'observation scientifique, également instancié **(4.a)** nommé « Observation scientifique de cas Reel 5 », un expert désigne la région 3D **(2.A.)**, un individu nommée « RegionA1 » au concept désigné « *Desquamation En Plaque* ». Pour les autres annotations affichées dans la figure, le ou les experts ont réalisé le même processus (au sein d'autres observations scientifiques, qui ne sont pas affichées dans ce schéma mais qui, conceptuellement, sont bien présentes). L'annotation 3D **(2.B.)** a été identifiée et désignée comme étant un individu « RegionC » ayant pour type « *Calcaire* » **(3.B.1.)**, l'annotation 3D **(2.C.)** constitue l'individu « RegionB » ayant pour concept de description « *AppareilSimpleRegulier* » **(3.C.1.)**, et enfin la région tridimensionnelle **(2.D.)** forme l'individu nommé « RegionB » désignée par « *Mur* » **(3.D.1.)**.

Comme expliqué dans la section 4.4.3., le processus d'annotation permet de spatialiser toutes ces régions au sein d'un unique système de référence, en fournissant un environnement privilégié pour l'exploration de la corrélation sémantique. En effet, la superposition spatiale d'annotations 2D/3D projetées permet d'établir des liens sémantiques au sein de l'ontologie

de domaine. Grâce à la superposition spatiale représentée par la relation « has_common_3d_index », et d'après les annotations disponibles, nous pouvons impliquer les quatre classes de description en énonçant sémantiquement (en français) que :

« **RegionA1** (classe ***Altération*** : sous-classe ***Desquamation en Plaque***) **agit sur RegionC** (classe ***Matériau*** : sous-classe ***Calcaire***) qui **est utilisé pour RegionB** (Classe ***Technique de Construction*** : sous-classe ***Appareillage Simple***) qui **est utilisé pour former RegionD** (classe ***Composant Architectural*** : sous-classe ***Mur***).

Chaque annotation, donc chaque individu créé, n'est pas seulement relié à des propriétés objet mais également à des propriétés de données **(3.A.1.a.)** caractérisant quantitativement l'individu avec des attributs définis lors de la conception.
Chaque observation scientifique réalisée est relative à au moins une des quatre classes de descriptions, créant un individu d'une part pour l'observation et d'autre part pour une annotation désignée. Pour un terme de description donné, il est alors possible de réaliser des analyses statistiques **(5.)** en comparant les attributs de chacun et ainsi identifier et extraire des occurrences. Dans notre cas, nous schématisons une requête mono-concept (impliquant les individus d'un seul concept) susceptible de fournir des tendances morphologiques et spatiales pour une altération précise par exemple. Il est possible de réaliser des requêtes multi-concept (impliquant les individus de plusieurs concepts), afin d'obtenir des réponses quant à la distribution spatiale d'un type d'altération « agissant » sur un matériau précis.

Notre approche présente un caractère innovant fort dans la mesure où nous structurons, à notre connaissance, pour la première fois dans le domaine de la conservation trois dimensions de description (sémantique, spatiale et morphologique) autour d'un accès aux données basé sur l'ontologie (ENG : OBDA => Ontology Data Base Access). C'est-à-dire que la structuration conceptuelle ontologique et sa capacité de raisonnement est combinée avec la structuration des bases de données relationnelles. En d'autres termes, la base de données nous fournit les ressources, et nous les structurons grâce à des connaissances représentées dans une ontologie de domaine (dimension sémantique), pour raisonner dessus. Un agrandissement de la figure Figure 145, particulièrement sur la partie centrale où se présente l'aspect innovant de notre contribution, est disponible en Annexe A.2.

Dans les chapitres suivants, nous présentons le plan d'implémentation (chapitre 5) des aspects intégrés dans ce modèle (Figure 145) ainsi que les résultats de nos expérimentations, portant sur la formulation de requête couplant bases de données et ontologie, réalisées à partir de l'élaboration d'un jeu d'annotations sémantiques spatialisées.

4.7. Conclusion sur l'approche proposée

Ce chapitre a introduit un modèle d'ontologie de domaine dédiée à l'annotation sémantique 2D/3D pour le suivi de l'état de conservation des édifices patrimoniaux.

La Figure 146 résume l'ensemble de notre travail de recherche et met l'accent sur les points de départ analysés (état de l'art), jusqu'à l'aboutissement de notre contribution scientifique en les exploitant stratégiquement. Dans cette figure, nous avons volontairement représenté les points de départs des trois dimensions dans des cadres graphiques complètement « fermés » car ils n'ont pas fait l'objet d'une association fonctionnelle avant d'entreprendre notre travail de recherche. C'est pourquoi leur exploitation, au sein de notre contribution, montre des cadres en pointillé, symbolisant l'échange de données, et d'informations, structurées par des connaissances.

L'approche proposée, qui a fait l'objet de notre contribution principale, a eu pour but de définir un modèle conceptuel pour prendre en considération les trois niveaux d'études rassemblant l'ensemble des analyses effectuées sur le patrimoine : l'aspect visuel de sa surface, sa forme géométrique, et la composition (physique et chimique) de ses matériaux de construction. Les trois dimensions constituent des sujets de recherche à part entière et ont eu pour ambition d'être reliées au sein d'une même représentation conceptuelle. Dans la dimension sémantique **(1)**, le choix s'est porté sur l'exploitation du CIDOC-CRM, un modèle générique de référence, avec ses extensions **(1.A.)**. Il propose la possibilité de décrire, à un niveau de détail important, les ressources et les pratiques relatives à l'analyse du patrimoine architectural. En outre, à travers la méthode de conception de Lassila, nous avons exploité ce modèle en l'amalgamant avec notre cœur ontologique **(1.B.).** Le point de fusion entre notre ontologie et le CIDOC-CRM est la classe porteuse de toutes les observations : « *S4_Observation* » **(1.C.)**.

Un autre travail s'est porté sur le choix d'un système de référence permettant de réaliser et de spatialiser ces observations scientifiques. L'approche d'annotation sémantique, développée par [Manuel A., 2016] est la technique retenue pour représenter la dimension spatiale **(2.)**. Cette approche propose d'une part, de générer des supports 3D basés sur des images, puis d'autre part, de réaliser des cartographies visuelles à travers une relation bijective 2D/3D **(2.A.)**. Les régions éditées, nous donnent également l'accès à des données essentielles concernant les points tridimensionnels sélectionnés tels que, la position, la couleur et l'orientation. D'un point de vue méthodologique, cette capacité d'annoter et de propager des régions 2D/3D dans un système de référence absolu **(2.C.)**, ainsi que les données qui en résultent, constituent un raccord possible et cohérent entre la dimension spatiale et la dimension sémantique modélisée. De plus, d'un point de vue métier, cette approche d'annotation sémantique propose une utilisation en cohérence avec les savoir-faire dédiés à l'observation basée sur l'analyse cartographique, emblématiques du domaine de la conservation.

Nous pouvons donc utiliser la dimension spatiale afin de réaliser des analyses : l'orientation et l'analyse multi-temporelle, l'ajout d'images multi spectrales, et l'ajout d'images de détails. Des annotations 2D peuvent donc être réalisées par les experts, représentant des régions 3D uniques spatialisées dans un repère de coordonnées absolu **(2.B.)**. La relation sémantico-spatiale est rendu possible à travers une phase d'association de l'annotation (désignation)

avec un terme de l'ontologie de domaine, structurant les connaissances du domaine **(1.D.)**. Chacun d'eux représente une région spatiale du concept désigné (« Region5 » et « Region6 » individu de la classe « *D35_Area* »).

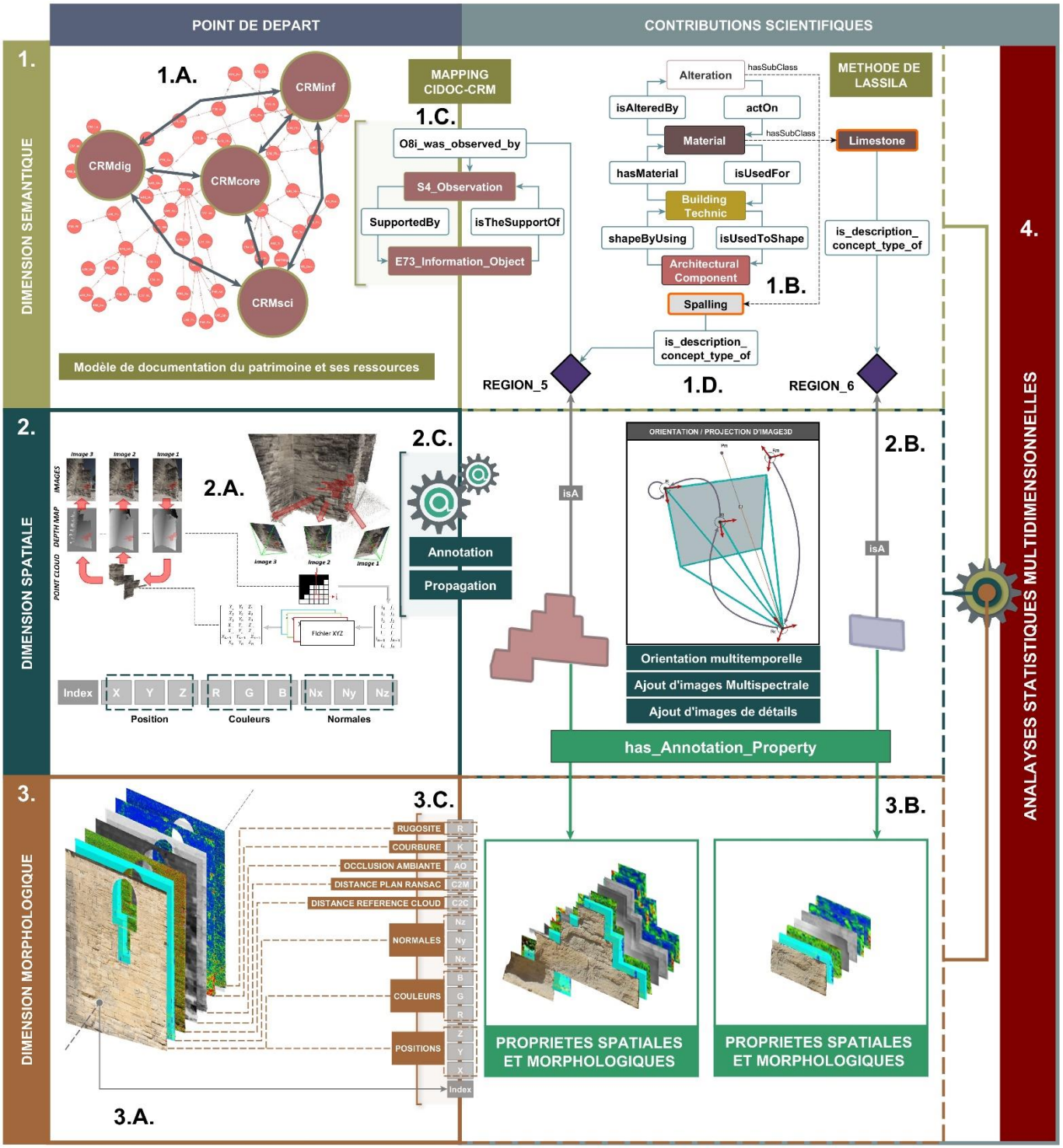


Figure 146 : Tableau récapitulatif sur l'exploitation de l'état de l'art dédié à chaque dimension pour notre contribution scientifique.

Dans le cas de cette figure, les deux annotations ont respectivement un concept de description de type « *DesquamationEnPlaque* » (ENG : « *Spalling* ») et « *Calcaire* » (ENG : « *Limestone* »).

En ce sens, elles peuvent être comparées spatialement grâce à leurs propriétés de données intégrées dans l'ontologie de domaine.

La dimension morphologique **(3.)** renferme une solution permettant de générer des données géométrico-visuelle, utiles pour diagnostiquer l'état de surface des édifices patrimoniaux. La méthode de [Nespeca R. et al., 2016] a permis de générer des cartes d'analyses adaptées pour l'étude quantitative des déformations et pathologies visuelles de surfaces. Grâce à elle, il est possible pour chaque point 3D de proposer, selon des paramètres prédéfinis, une liste de quatorze éléments avec des niveaux d'analyses différents. Par conséquent, cette liste de valeurs constitue de nouveaux descripteurs caractérisant les concepts/individus de notre ontologie. Nous associons donc des données géométrico-visuelles pour chacune des annotations 3D. Cette approche, par analyse de nuage de points, n'est pas seulement adapter à la dimension sémantique, mais constitue une extension à la dimension spatiale. Ce qui nous permet de rendre possible une analyse locale dont la frontière est l'annotation elle-même. En outre, chaque index contenu dans la région se verra associé à des données quantitatives supplémentaires.

Les trois dimensions ainsi connectées, permettent de réaliser des requêtes sur l'ensemble des données intégrées. Dans notre cas de figure, nous impliquons le concept « *DesquamationEnPlaque* », pour extraire ses individus, donc les régions 2D/3D accompagnées de leurs caractéristiques spatio-morphologiques. Ils seront mis en relation afin d'identifier des similarités, d'extraire des orientations, des extensions et des « tendances » géométrico-visuelles en relation avec un matériau, un composant architectural et une technique de construction, identifiés comme étant superposés **(4.)**.

Le moteur de corrélation proposé, permet aux experts de la conservation d'obtenir des informations relatives aux régions spatialement référencées autour d'une représentation 3D. La superposition des annotations produit une chaîne de liens sémantiques permettant d'extraire, à travers des requêtes SPARQL, des données et des informations reliées à chaque classe de description en interrelation. Le système autorise non seulement la corrélation d'information parmi les annotations concernant un seul édifice, mais également la corrélation avec des observations réalisées sur d'autres bâtiments.

Les connaissances formelles du domaine, actuellement intégrables dans notre ontologie (en s'appuyant sur les classes, sous-classes et relations définies), permettent par conséquent de recueillir les premières entités de descriptions munies de leurs informations morphologiques et spatiales. Lorsqu'une collection d'annotations sera disponible, nous pourrons non seulement réaliser des croisements entre elles, mais également de définir, par déduction et par des calculs statistiques pour un concept donné (« *Desquamation en Plaque* » par exemple), les caractéristiques morphologiques et spatiales les plus rencontrées grâce à l'annotation avec laquelle ce concept est relié.

Chapitre 5. Implémentation informatique du système d'annotation basé sur l'ontologie de domaine proposée

À travers cette partie, nous allons, d'une part, présenter les différentes briques technologiques et l'environnement de développement pour réaliser une plateforme dédiée au suivi de l'état de conservation. D'autre part, nous nous intéresserons à l'implémentation, puis à l'application du prototype informatique développé dans le cadre de la thèse, à l'analyse d'un jeu de données provenant d'un cas réel.

5.1. Architecture logicielle

Comme nous l'avons développé dans la partie précédente, notre approche de description se base sur le couplage d'une ontologie de domaine et d'un outil d'annotation sémantique 2D/3D (Figure 147). Une plateforme web (dans laquelle ma contribution s'inscrit) proposant un environnement collaboratif pour la spatialisation et l'annotation sémantique est actuellement en cours de construction au sein du laboratoire MAP. Cette plateforme donne la possibilité aux utilisateurs d'insérer des jeux d'images de l'édifice pour générer une représentation tridimensionnelle à travers un processus de reconstruction 3D automatique. Puis, l'utilisateur peut réaliser des annotations sur les images orientées, ces annotations sont alors automatiquement propagées sur les autres images par projection 2D/3D/2D [Manuel A., 2016].

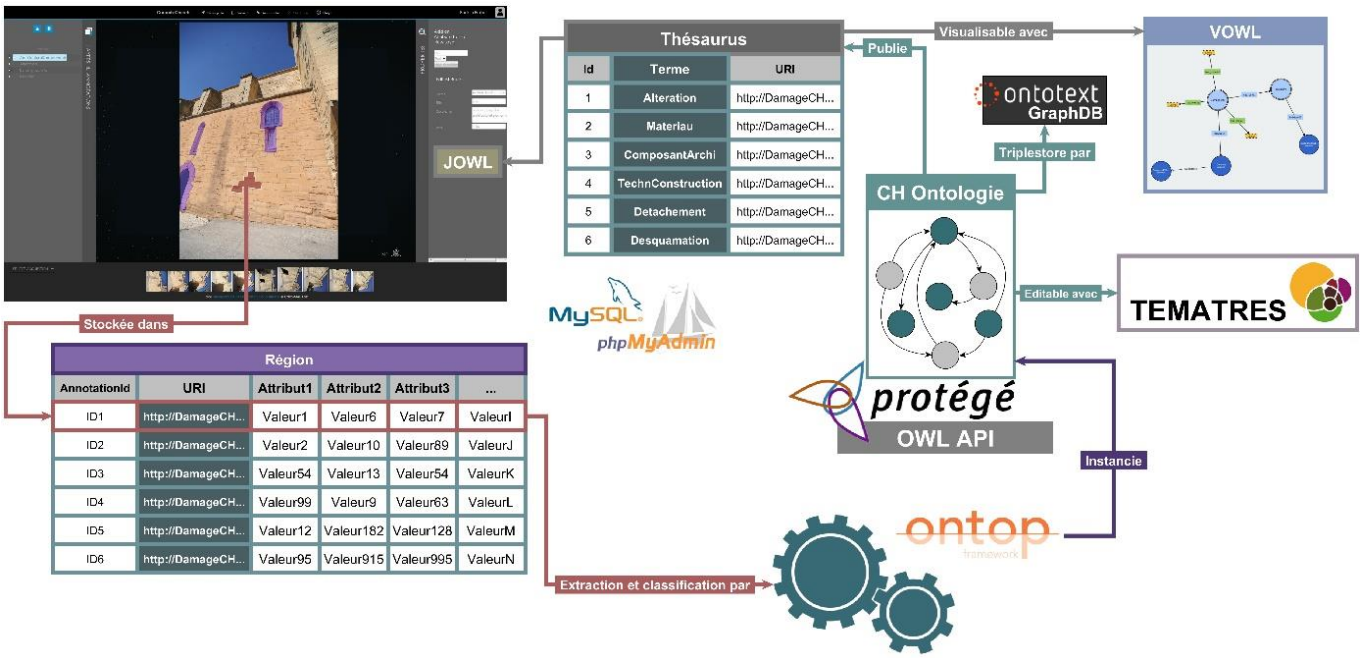


Figure 147 : Architecture de l'implémentation générale pour l'outil d'analyse et d'aide à la décision pour le suivi de la conservation du patrimoine bâti.

La plateforme est construite autour d'un ensemble de services (briques de calcul, passerelles de conversion, etc..) articulés autour d'une architecture cloud. L'interface utilisateur, développée en HTML5, PHP et JS, se découpe en quatre parties principales :

- **Un navigateur / gestionnaire de calque** permet d'afficher ou cacher les calques et les annotations ;
- **Une zone de visualisation et d'interaction** permet la transition naturelle entre la visualisation 3D d'un nuage de points et la visualisation 2D d'images orientées ;
- **Une boîte à outils** permet de sélectionner les outils pour l'annotation ainsi que pour l'analyse (sur l'image et sur le nuage de points 3D).
- **Un gestionnaire d'attributs** permet à l'utilisateur de qualifier les annotations à travers des jeux d'attributs personnalisables : champs de texte, champs de chiffres, fichiers attachés (images, vidéos, audio, etc.), URI/liens vers d'autres ressources (y compris les termes de vocabulaires contrôlés, les concepts d'une ontologie, etc.).

5.1.1. Fusion entre la base de données relationnelles (annotations 2D/3D) et l'ontologie de domaine avec ONTOP

Afin d'instancier notre ontologie de domaine, nous avons choisi d'utiliser des URI ou IRI pour connecter les concepts relatifs aux dimensions de description de notre approche à la base de données intégrée au sein de la plateforme web d'annotation sémantique 2D/3D. Cette approche, appelée accès aux données basés sur les ontologies (ENG : OBDA => Ontology-Based Data Access) [Astrova I. et al., 2008] est considérée comme étant un ingrédient-clé pour la nouvelle génération de système, particulièrement pour les applications exploitant le web sémantique. Dans ce paradigme de l'OBDA, une ontologie de domaine définit un schéma global de haut-niveau en fournissant un vocabulaire pour les requêtes-utilisateurs. Celles-ci sont donc isolées des détails inhérents de la structure de la base de données-sources (qui peut être une base de données relationnelle, ou même un triplestore). Le système OBDA a donc l'objectif de transformer les requêtes-utilisateurs dans un vocabulaire sémantique afin d'accéder à la source qui est le plus souvent une ou plusieurs bases de données [Rodriguez-Muro M. et al., 2013]. Malgré la structure stricte de ces dernières, il est possible, par un lien spécifique, dans notre cas un JDBC (Java DataBase Connectivity), de connecter notre base de connaissance ontologique à une base de données sur le réseau.

Pour réaliser cela, nous utilisons l'extension **Ontop** (Figure 148) qui renferme plusieurs composants intéressants pour nos besoins : elle permet d'être directement installé dans un éditeur d'ontologie, tel que Protégé afin de valider notre approche via des expérimentations (section 5.2.), et ainsi valider son exploitation pour son intégration future en tant qu'API. De plus, Ontop possède son propre raisonneur pour inférer sur des données ontologiques en version OWL 2 QL et en RDFS. Il répond rapidement aux requêtes en utilisant des SGBD Relationnel via SQL.

Cette approche se base sur un « *mapping* » ou « *correspondance* » définie entre le langage SQL (langage de requête des bases de données) et le langage SPARQL. Lorsque les « *mappings* » sont créés, il est possible d'enrichir la base de données pour ensuite réaliser des inférences grâce au raisonneur dédié d'**ONTOP**, QUEST, via des requêtes SPARQL. Il nous permet donc de

créer un lien conceptuel et fonctionnel entre l'ontologie de domaine créée et la base de données existante où sont stockées toutes les ressources.

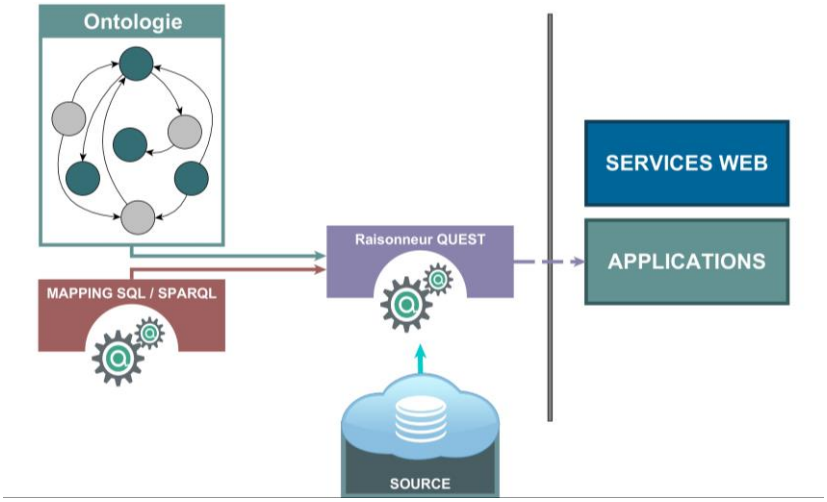


Figure 148 : Principe de fonctionnement d'Ontop.

5.1.2. Gestion de l'ontologie et stockage des données de sortie : les triplets.

L'ontologie de domaine créée a pour ambition d'être gérée par une Interface de Programmation Applicative (ENG : API => Application Programming Interface) : OWL API. C'est une API développée en Java, qui fournit une interface d'implémentation de référence afin de créer, manipuler et sérialiser (transformation OWL/RDF en une chaine de bit pour le stocker sur un disque) des ontologies en OWL. Celle-ci inclut exactement les mêmes fonctionnalités que **Protégé** (car implémentée et créée avec cette API).

Afin de stocker tous les triplets, nous utiliserons un système de gestion de données RDF nommée **GraphDB** du groupe **OntoText** [GraphDB, 2016]. Ce dernier est une base de données graphes sémantiques conformes à la réglementation W3C. Les bases de données graphes sémantiques (également appelé triplestores RDF) fournissent une infrastructure pour des solutions où la modélisation, l'intégration de données, exploration des relations est importante. C'est un des seuls triplestore qui peut réaliser des inférences permettant aux utilisateurs de créer de nouveaux "faits sémantiques" à partir des existants. Il peut également traiter des chargements massifs de données, de requêtes et d'inférences en temps réel. De plus, il améliore l'échange de données en publiant et croisant les données de plusieurs applications [GraphDB, 2016].

Ce triplestore est très intéressant car il permet, d'une part, de traiter et de stocker une importante quantité de données sémantiques et d'autre part, dans des perspectives futures, il nous permettra d'intégrer la modélisation de nouvelles connaissances à partir de faits présents intégrés. Comme on le verra dans la suite, ces faits sont portés par les instances interreliées des concepts de notre ontologie de domaine.

5.1.3. Intégration d'une fonctionnalité de sélection et de visualisation : les outils jOWL et VOWL

Comme expliqué précédemment, notre développement informatique s'intègre à une interface d'annotation d'images orientées, référencées autour d'une représentation tridimensionnelle, au sein d'un référentiel géométrique absolu. En effet, les annotations réalisées par les experts à travers cette plateforme constituent la base de leur réflexion pour instancier des observations scientifiques, argumentées en rapport avec une classe de description. Nous savons déjà que ce qui fera le lien entre l'ontologie et la plateforme d'annotation est cet élément essentiel permettant d'identifier des concepts uniques : l'IRI / URI. Cependant, il fallait trouver le moyen de sélectionner un terme du vocabulaire de manière interactive sur l'interface afin de l'associer à l'annotation réalisée. C'est pour cela que nous avons exploité et nous nous sommes inspirés de deux extensions programmées en JavaScript **: jOWL (A)** [jOWL, 2016] pour le choix du concept dans un vocabulaire mis à disposition de l'ontologie, et **VOWL (B)** [VOWL, 2016] pour la visualisation de graphe (Figure 149).

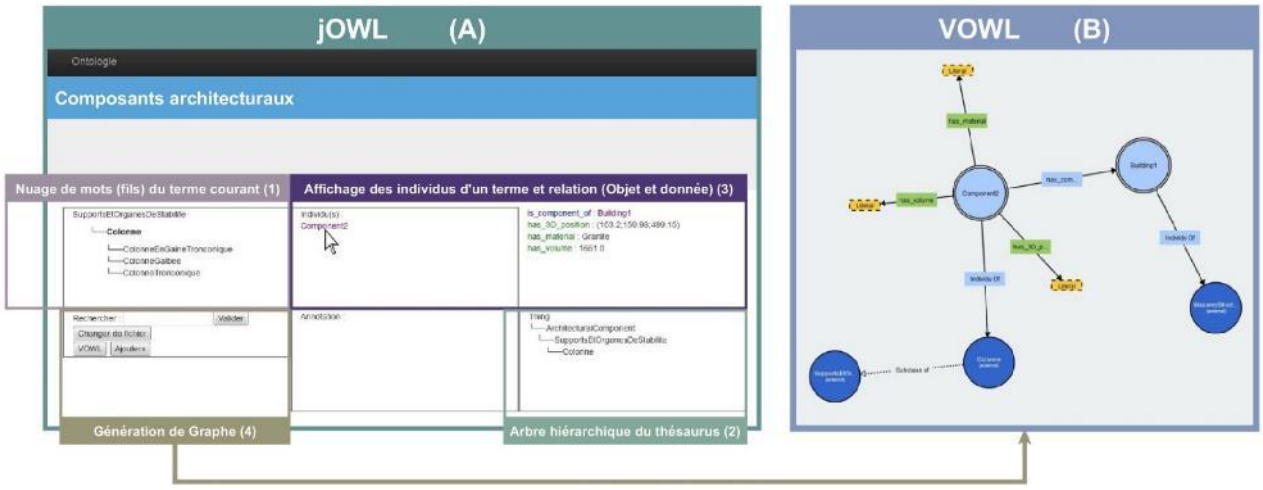


Figure 149 : Interface jOWL et VOWL, connectés, interactifs.

Le plug-in ***jOWL*** **(A)** a pour fonction d'ouvrir un fichier en format OWL ou même RDFS représentant une ontologie, ou un thésaurus et d'extraire les termes qui s'y trouvent pour les proposer sous différentes formes :

- (1) Un nuage des termes: correspondant aux fils du terme courant (terme-parent). Tous sont cliquables et affichent des informations.
- (2) Un arbre hiérarchique, affichant le parcours des termes sélectionnés depuis le terme racine « *Thing* ».
- (3) Un affichage des individus présents sur lesquels il est possible de visualiser les propriétés en passant le curseur sur celui-ci.
- (4) Plusieurs fonctions :

- Génération d'un graphe en **VOWL (B)** [Lohmann S. et al., 2014]. Il montre les relations que renferme le terme courant avec d'autres termes en affichant les individus et leurs propriétés, respectivement sous forme de nœuds et de flèches. Lorsque l'on parcourt le nuage de termes ou l'arbre hiérarchique, le graphe se met à jour automatiquement montrant à chaque clic le terme courant à visualiser.
- Recherche d'un terme disponible par auto-complétion.
- Chargement d'un autre fichier contenant un thésaurus.
- Ajouter un fichier dans la base de connaissances.

Ces deux interfaces peuvent être très utiles pour les experts de la conservation qui ont ainsi la possibilité de naviguer au sein de concepts traduisant des connaissances du domaine. La visualisation en graphe offre à l'utilisateur une autre manière d'afficher les relations entre les différents concepts instanciés ou non de l'ontologie [Srivastava V., 2011] afin de mieux comprendre les relations complexes entre les entités conceptuelles.

5.1.4. Gestion des vocabulaires par TemaTres

Un autre cas de figure devait être pris en compte, c'est la disponibilité des concepts pour une observation donnée. Il est possible qu'un expert de la conservation ne puisse pas trouver un terme spécifique pour désigner son annotation. En effet, les différentes connaissances sont intégrées, mais la multiplicité des termes à travers les thésaurus peut être incomplète.

C'est la raison pour laquelle nous avons mis en place une extension de notre outil pour gérer des vocabulaires contrôlés, des taxonomies, des thésaurus (toutes les représentations abstraites) en exploitant la solution open source ***TemaTres*** [TemaTres, 2016] (Figure 150).

Sa particularité est qu'il permet d'exporter/importer des vocabulaires dans divers formats (XML, RDF par exemple) dans plusieurs langages si ceux-ci sont disponibles. De plus, étant donné qu'il est basé sur des technologies web, il permet de faire des connexions vers différentes bases existantes (DBpedia, Getty, etc.). L'utilisateur, connecté avec un login et un mot de passe, peut également ajouter un terme en le saisissant manuellement, et en l'intégrant dans une liste de termes déjà existante dans la base.

L'ontologie de domaine que nous avons modélisée constitue une base solide pour y ajouter des thésaurus, qui dans tous les cas seront associés à nos quatre calques de descriptions thématiques (en héritant de façon transparente et naturelle des relations sémantiques préalablement construite entre les différents niveaux de description). Notre stratégie consiste à faire utiliser ***TemaTres*** comme un outil collaboratif pour ajouter de la connaissance experte à chaque sous-domaine introduit dans l'ontologie de domaine. D'autant plus que cet outil peut s'intégrer à d'autres composants via de interfaces de types jOWL et VOWL [Courouble F., 2016].

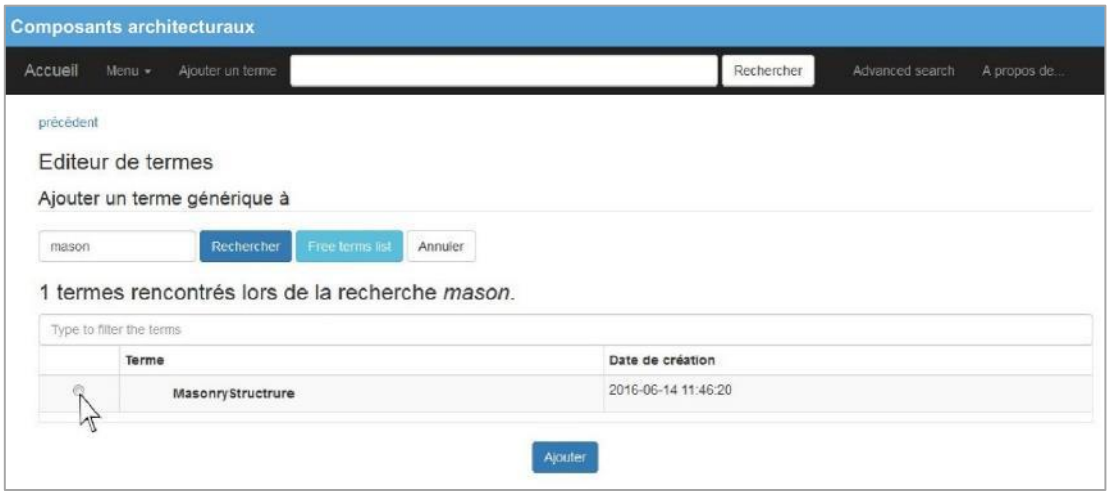


Figure 150 : Interface TemaTres [TemaTres, 2016].

5.1.5. Implémentation générale : bilan

Le moteur de corrélation présenté dans le chapitre précédent (Section 4.6.) est basé sur un outil web en cours d'implémentation (Figure 147). Ce dernier donne la possibilité d'insérer des jeux d'images multi-temporels, pour ensuite réaliser des annotations et de les propager par une projection 2D/3D/2D. L'étape d'appellation/désignation est gérée par un plug-in en cours de réalisation dont les fonctionnalités sont basées sur l'extension **jOWL**. Cette dernière propose de choisir un terme parmi un vocabulaire contrôlé (intégré ou associé avec l'ensemble de l'ontologie) accompagné de leurs URIs. L'annotation est donc associée avec un concept et l'ensemble est intégré en tant qu'instance dans la corrélation sémantique gérée par l'ontologie de domaine supportée par **OWL API**. Le moteur de corrélation est réalisé par le plug-in **Ontop**, qui joint la base de données relationnelle existante (à travers des « mappings » SQL/SPARQL) avec l'ontologie. Puis des requêtes SPARQL, par l'utilisation du raisonneur QUEST, nous permet de générer des informations pertinentes à travers des analyses statistiques. Pour visualiser les individus disponibles du modèle conceptuel et mieux comprendre leurs relations, nous exploitons le plug-in **VOWL** basé sur une visualisation d'ontologie interactive. L'ensemble du modèle conceptuel peut être enrichi, en ajoutant de nouveaux concepts, ou de nouveaux vocabulaires (pour intégrer de nouvelles connaissances) en utilisant les fonctions du logiciel **TemaTres**. Grâce à celui-ci, nous pouvons créer une plateforme de gestion d'utilisateurs afin d'ajouter/supprimer/mettre à jour des termes. Enfin, les informations extraites à partir du moteur de corrélation sont stockées dans un triplestore fournissant un point de sortie pour des requêtes SPARQL : **GraphDB**. Une première expérimentation mettant en place un bon nombre de ces outils a montré des résultats encourageants (section 5.2.).

5.2. Expérimentation et résultats

Afin de valider notre approche (et notre implémentation informatique), nous avons réalisé une expérimentation sur un cas d'étude impliquant notre modèle conceptuel. Dans les prochains paragraphes nous expliquons, phase après phase, la construction technique mise en œuvre.

5.2.1. Cas d'étude pour l'expérimentation

Le cas d'étude que nous avons utilisé a été présenté tout au long de notre manuscrit : l'église Saint Maurice de Caromb. Ce site a été sélectionné, car nous disposons d'une importante quantité de données 3D notamment concernant une surface d'intérêt : le mur Est. Afin de s'appuyer sur des données réelles, nous avons exploité une étude du site sur laquelle étaient référencées des cartographies d'altérations, des matériaux et des composants architecturaux [Benard A., 2015]. Une analyse documentaire sur l'ensemble de l'église fournit des informations historiques, constructives et morphologiques nécessaires afin de comprendre l'évolution de la conservation du bâti. Toutes les données disponibles sont susceptibles d'être intégrées au sein de la future plateforme d'annotation collaborative.

Nous allons dans un premier temps expliquer la mise en place de toutes les briques technologiques (outil d'annotation, base de données, et ontologie de domaine) pour ensuite donner un exemple d'utilisation de cet outil en montrant ses potentialités. Lors d'une campagne d'acquisition, seize images ont été acquises en respectant un protocole spécifique (prises de vue convergentes et/ou parallèles avec un recouvrement de 80%) en vue de réaliser une reconstruction tridimensionnelle automatique. Comme nous l'avons spécifié et développé dans le chapitre 4, notre approche se base sur un outil d'annotation sémantique qui s'appuie sur des représentations 3D. Cet outil prend donc en considération tout le processus allant de l'ajout d'image à la génération du nuage de points. Il nous fournit beaucoup de données stockées sous forme d'index dans une base de données (Section 5.2.2.2.). Pour chaque annotation, nous avons accès à l'ensemble des descripteurs spatiaux : les triplets de coordonnées (X, Y, Z), les valeurs de normales (Nx, Ny, Nz) et les triplets de couleurs (R, G, B), ainsi que d'autres descripteurs morphologiques (Section 4.5.2.) (distance entre deux nuages de points, plan Ransac, occlusion ambiante, courbure, rugosité). Ces derniers ne seront pas pris en compte lors de notre expérimentation.

5.2.2. Constitution de la base de données relationnelle

5.2.2.1. Environnement de développement

Afin de stocker les données relatives aux processus de reconstruction 3D, aux annotations sémantiques et aux observations scientifiques, nous avons choisi de réaliser une base de données relationnelle spécifique à l'expérimentation. Ceci nous a donné beaucoup plus de liberté en phase d'implémentation, tout en assurant l'interopérabilité de notre travail avec les activités d'implémentation informatique de la plateforme d'annotation collaborative. Car le système web s'appuie également sur ce type de technologie pour stocker toutes les

ressources. Pour concevoir et gérer cette base de données, nous avons utilisé le logiciel UwAmp [UwAmp, 2017]. Il s'agit d'une plate-forme portable de développement qui utilise WAMP (Windows, Apache, MySQL, PHP) afin de créer des applications web. Sa particularité est qu'il possède phpMyAdmin pour gérer les bases de données créées. UwAmp est un package qui simplifie la création d'un serveur web sur Windows. Pour plus de praticité, nous avons également choisi d'utiliser un logiciel visuel unifié pour gérer les bases de données avec beaucoup plus d'ergonomie que phpMyAdmin : MySQL Workbench.

5.2.2.2. Mise en place du schéma relationnel

La base de données créée doit être capable de prendre en considération toutes les données produites lors de l'analyse de notre cas d'étude. De plus, ayant pour ambition de créer un lien entre notre ontologie de domaine et cette base de données, nous devons faire le nécessaire pour trouver des correspondances entre les données de la base et les classes de notre ontologie. Or, il est possible, pour un concepteur d'ontologie de ne pas connaître précisément la structure interne de la base de données à laquelle il se connecte. La Figure 151 montre le contenu précis de notre base de données sous forme d'un schéma Entité/Association.

L'intégration s'est faite directement dans la base de données après la génération du nuage de points et la phase d'annotation supportée par l'outil. Nous avons utilisé un format .CSV (ENG : Comma-Separated Value, FR : Valeur Séparée par des Virgules), pour les tables « 3d_index_list_table » (contenant plus de 600 000 enregistrements), « semantic_annotation_table », « index_in_annotation_table », « acquired_image_table ». Le reste a été saisi manuellement.

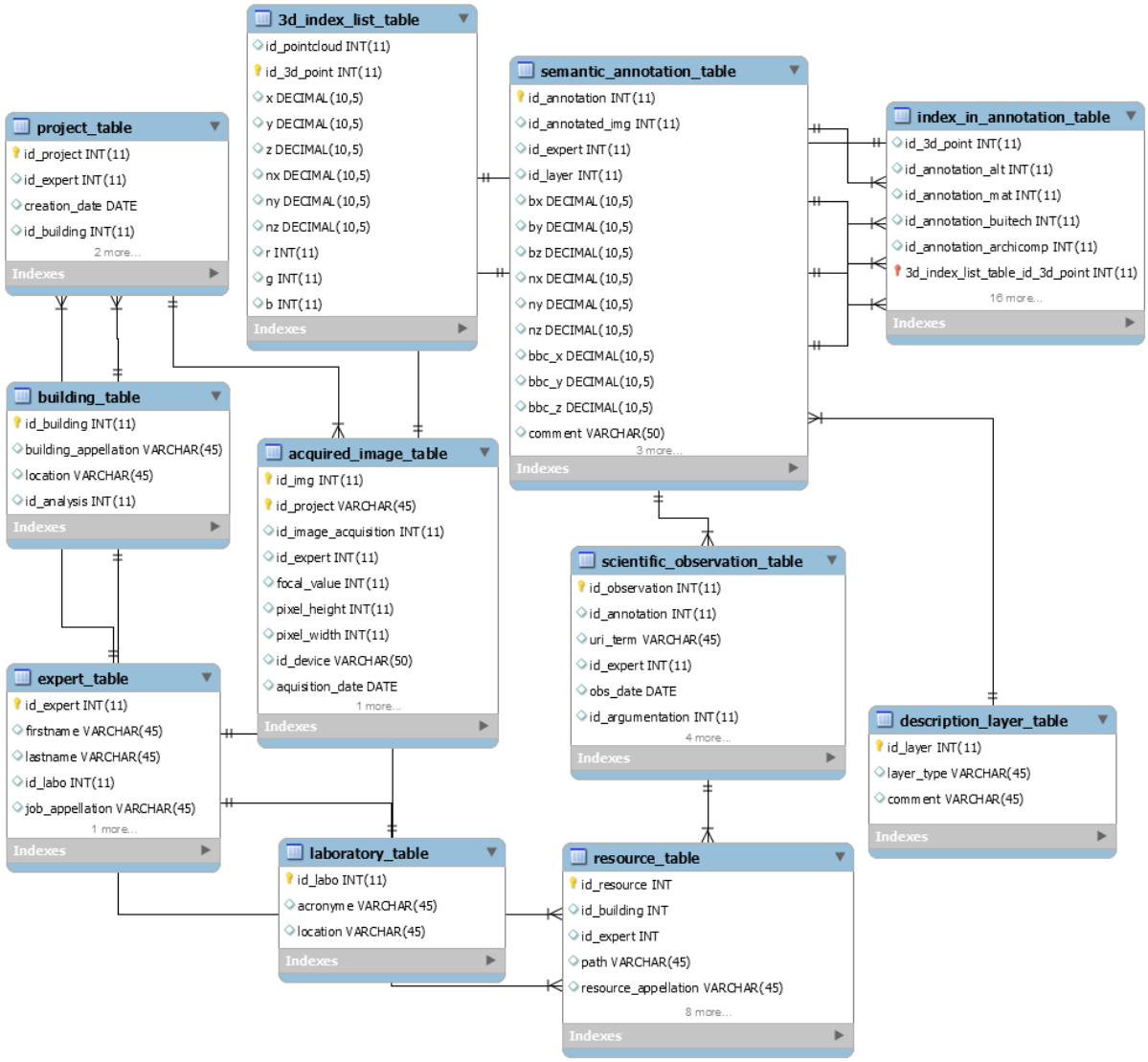


Figure 151 : Schéma entité/association de la base de données pour le suivi de la conservation du patrimoine.

5.2.3. Construction de l'ontologie de domaine

La construction de l'ontologie de domaine, présenté dans le chapitre 4 (section 4.6.2.) a été réalisée via Protégé 5 [Protégé, 2017]. Il s'agit d'un logiciel open source qui propose un espace dédié pour construire des systèmes basés sur les connaissances. Nous allons vous présenter dans un premier temps l'intégration et la mise en relation des classes de description, constituant l'intégrité de notre ontologie de domaine. Nous nous intéresserons ensuite à la liaison de cette dernière avec la base de données relationnelle.

5.2.3.1. Intégration et mise en relation des quatre classes de description pour la conservation du patrimoine culturel bâti

Une contribution essentielle de notre thèse a été la formalisation d'un environnement de description de l'état de conservation au travers l'articulation de quatre classes thématiques interdépendantes : « *Altération* », « *Matériau* », « *Technique de Construction* », et

« *Composant Architectural* ». Chacune d'elle, dans un premier temps, fait l'objet d'une intégration manuelle en respectant les principes fournis par la méthode de Lassila [Lassila O. et al., 1999] dont l'utilisation de glossaire est déterminante. Celle-ci nous a permis d'intégrer dans Protégé les classes thématiques sous forme de thésaurus (Figure 152).

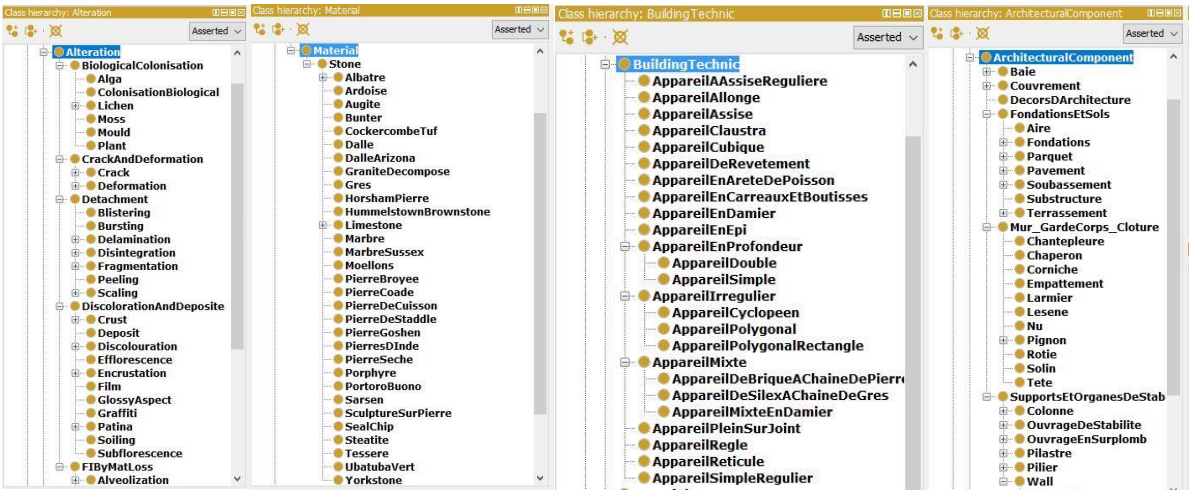


Figure 152 : Quatre thésaurus thématiques : Altération, Matériau, Technique de Construction, et Composant Architectural : capture d'écran de Protégé.

Grâce à l'expressivité du langage OWL, nous pouvons relier les tops classes de ces thésaurus en utilisant des propriétés d'objet (Figure 153).

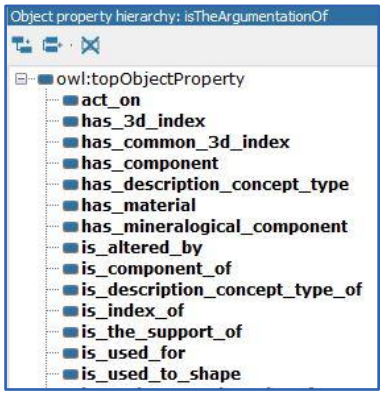


Figure 153 : Exemple de propriétés d'objet reliant les quatre classes de description : capture d'écran de Protégé.

Ce type de propriété relie un individu d'une classe avec un autre. L'ensemble des relations que nous avons réalisées est spécifié dans la Figure 103.

Chacune d'elles doit nécessairement faire référence à deux informations : un domaine (ENG : Domain) et une cible (ENG : Range).

D'autres classes sont intégrées et font référence aux diverses données et informations qui interviennent, d'une part, lors du processus d'observation scientifique de l'édifice étudié in situ (acteurs, acquisitions, etc.), et d'autre part, à travers un système numérique (nuages de points, données analytiques, annotations, etc.) via la dimension sémantique (section 4.3.2.).

Des propriétés d'objet relient un individu à un autre, mais il existe également un autre type de propriété : les propriétés de données. Elles permettent de relier un individu avec des valeurs numériques ou littérales, en lui donnant des caractéristiques particulières. Elles permettent ainsi de différencier les instances d'une même classe (Figure 154).

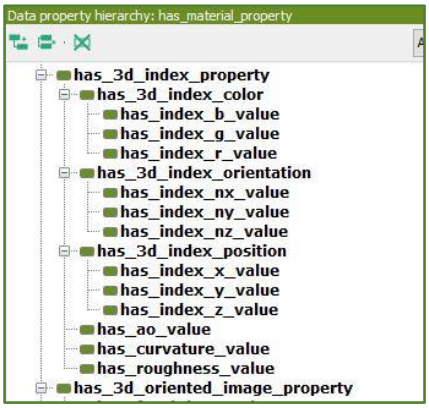


Figure 154 : Exemple de propriétés de données caractérisant les classes de l'ontologie de domaine : capture d'écran de Protégé.

5.2.3.2. Fusion de notre ontologie de domaine avec le modèle conceptuel de référence CIDOC-CRM

L'ensemble de l'ontologie de référence CIDOC-CRM est composé d'un cœur et des extensions que nous allons rassembler au sein d'un seul modèle conceptuel. CRMcore propose des classes de bases pour intégrer les autres extensions. C'est la raison pour laquelle nous allons l'ouvrir dans un nouveau fichier. Le CIDOC-CRM propose ses modèles conceptuels et les stocke au sein de leur serveur. Protégé propose deux façons d'ouvrir des fichiers : soit la méthode traditionnelle en cherchant un fichier dans le système local, soit en chargeant un fichier l'aide d'une URL stockée dans un serveur. L'ouverture se fait donc comme suit : File > Open from URL et saisir ***URL = http://www.cidoc-crm.org/rdfs/cidoc_crm_v6.2.1-draft-b-2015October.rdfs***. Protégé parvient à lire les différentes informations intégrées dans ce fichier : les classes et les propriétés. Le cœur du CIDOC CRM est donc intégré dans un fichier au format RDFS. Nous allons ensuite ajouter les différentes extensions. Elles peuvent être intégrées de manière assez flexible, car l'ensemble des modèles utilise le même formalisme (URI avec convention de nommage identique). Les extensions CRMsci, CRMdig, et CRMinf ont respectivement les URL suivantes : ***http://www.ics.forth.gr/isl/CRMext/CRMsci_v1.2.3.rdfs***, ***http://www.ics.forth.gr/isl/CRMext/CRMsci_v1.2.3.rdfs et http://new.cidoc-crm.org/crminf/sites/default/files/CRMinf_v0.7_.rdfs.***

Par cette action dans Protégé, Refractor > Merge ontology, nous pourrons reconstruire le modèle dont nous avons besoin. Le modèle de réception des extensions est CRMcore. Nous obtenons donc un modèle fusionné. Une vérification avec la documentation est nécessaire afin de constater si la fusion des ontologies s'est bien effectuée. Les extensions doivent rester au langage RDFS sur l'ensemble du processus d'intégration et de capitalisation des

connaissances. Sinon certaines incohérences apparaissent comme la perte des paramètres concernant les propriétés, notamment la correspondance *Domain – PropertyObjectName -> Range*.

À cette étape, nous pouvons donc fusionner et réaliser les correspondances entre le CIDOC-CRM général et nos classes capitalisant les connaissances du domaine de la conservation représentées par la classe "Concept de Description" : "Altération", "Matériau", "Technique de Construction" et "Composant Architectural". La fusion a lieu de la même façon que les précédentes sauf que l'ontologie de réception sera la nôtre. Aucune correspondance n'est possible entre ces deux modèles, car il n'y a aucune classe générique similaire, ni pour les concepts de description, ni pour les classes décrivant les données produites (Annotations, index 3D, images, etc.). Grâce aux outils proposés par Protégé, nous pouvons déplacer les classes les unes par rapport aux autres et modifier le domaine et la portée des propriétés disponibles. Les principales correspondances sélectionnées s'appuient sur une analyse de la documentation du CIDOC-CRM. Elles sont listées ci-dessous : « Alteration » -> « S18_Alteration », « Material » -> « *E55_Material* », « *BuildingTechnic* » -> « *E29_Design_or_Procedure* », « *ArchitecturalComponent* » -> « *E24_Physical_Man-Made_Thing* ». La classe « *Acquisition* », utilisée pour l'argumentation de la désignation, sera intégrée dans la classe « *E73_Information_Object* » qui possède des sous-classes de description « *E31_Document* » et « *D1_Digital_Object* ». L'ensemble des connaissances définies et prises en compte dans le domaine de la conservation du patrimoine sont à présent intégrées. Les parties numérotées de la Figure 155 montrant les aspects principaux de l'ontologie de domaine font l'objet de zoom en annexe 1.1..

Nous avons ensuite associé les propriétés de données : il s'agit des données morphologiques et spatiales. Une région 2D dessinée et propagée concerne une zone dans le CIDOC-CRM : "*D35_Area*". Cette classe correspond d'une part à la région 2D dessinée sur une image par l'utilisateur. Et d'autre part, elle peut être considérée comme étant les régions 2D propagées sur les autres images de l'ensemble du projet MICMAC. Enfin, une dernière entité peut aussi être considérée comme une région, c'est la région 3D référencée dans le modèle tridimensionnel sur lequel sont réalisés les différents algorithmes d'extraction de données morphologiques et spatiales. Par définition, une région, dans notre système d'annotation, est une zone 2D et 3D qui comprend des index. Nous associons donc des attributs spatiaux et morphologiques relatifs à la zone puis à ces index.

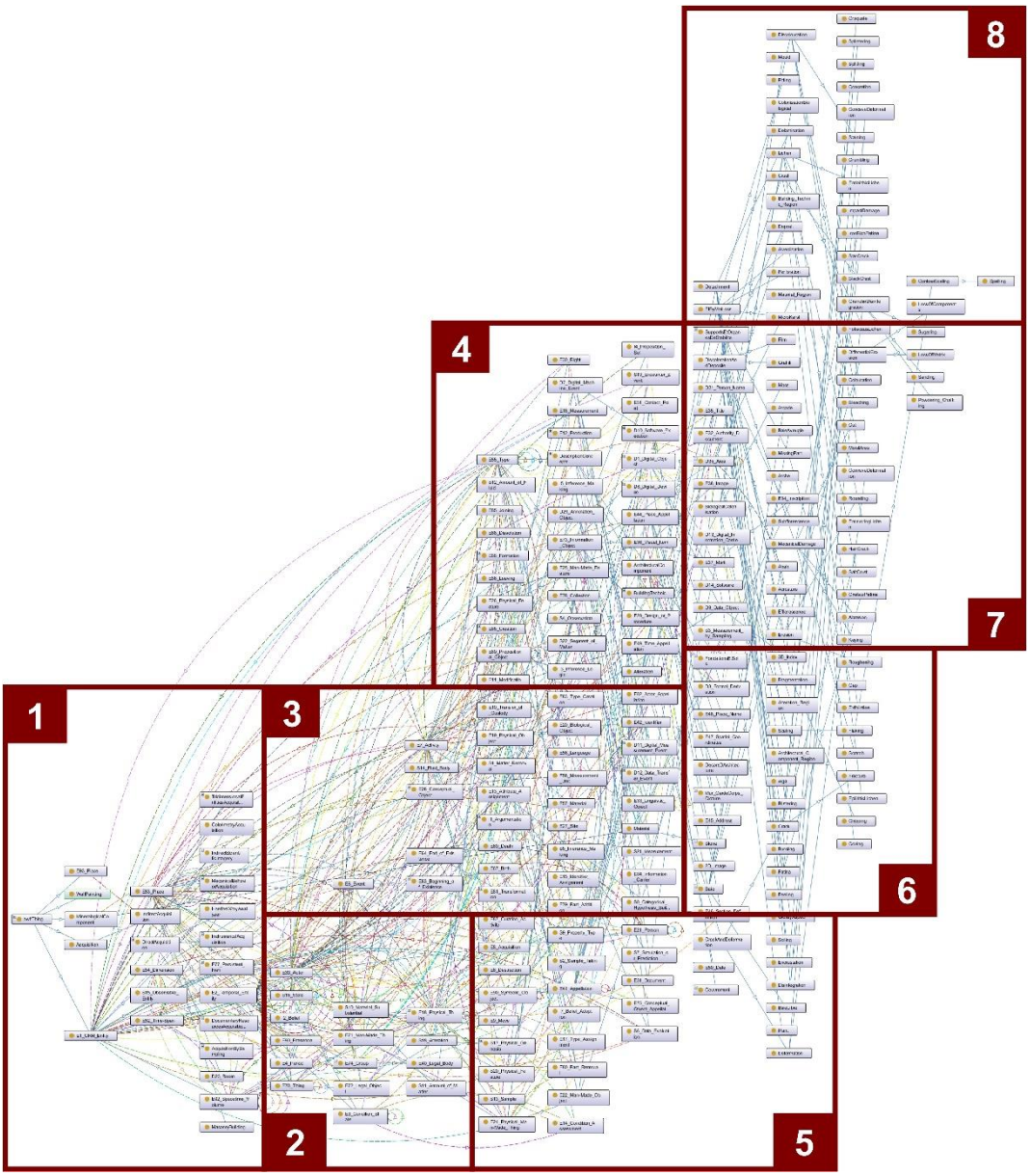


Figure 155 : Portion de l'ontologie de domaine générée après intégration du CIDOC-CRM.

5.2.4. Fusion de l'ontologie de domaine et de la base de données par ONTOP

ONTOP (Section 5.1.1.) est un outil utilisé afin d'accéder, grâce à des ontologies, à des données d'une base de données relationnelle. Celui-ci est proposé sous forme de librairie exploitable dans une API afin de créer une application web exploitant un SGBD structuré par une ontologie. Dans notre expérimentation, nous avons exploité ONTOP sous forme de librairie intégrable dans Protégé pour valider notre approche.

5.2.4.1. Connexion de Protégé vers la base de données

Afin de trouver une solution pour créer ce lien entre notre base de données (Section 5.2.2.) et l'ontologie créée (Section 5.2.3.), nous avons utilisé un connecteur capable de relier une application basée sur du MySQL (phpMyAdmin) et une autre (Protégé) basée sur du Java. Cette relation sert à nous connecter et à accéder à la base de données grâce à l'ontologie à

travers des requêtes SQL. Un connecteur, appelé plus communément driver JDBC (ENG : Java DataBase Connectivity, FR : Connectivité Base de données / Java), est donc nécessaire.

5.2.4.2. Mapping SQL/SPARQL

Après la validation de la connexion, nous avons réalisé nos correspondances dans le Mapping Manager. Cette étape est primordiale et finalise concrètement la mise en relation de notre ontologie et la base de données. Les données produites lors du processus de reconstruction jusqu'à la phase d'observation scientifique (stocker dans la BDD) constituent des individus des classes que nous allons faire correspondre avec nos classes. Le mapping SQL/SPARQL correspond à la définition de deux requêtes basées sur deux langages différents permettant l'extraction de données (Source) à associer à des classes précises (Target) (Figure 156).

Figure 156 : Exemple de Mapping entre notre base de données (source) et notre ontologie de domaine (cible) : capture d'écran Protégé.

Il existe des mappings simples qui n'impliquent qu'un seul champ de la base de données, donc une classe de l'ontologie. C'est le cas du premier exemple de la liste de la Figure 156. De ce dernier, nous cherchons à extraire les données reliées à la connaissance « *E21_Person* » répondant à sa représentation conceptuelle et à ses propriétés de données, si celles-ci sont disponibles (Figure 157). L'entité identifiée comme étant une « *E21_Person* » est la donnée se trouvant dans le champ *id_expert*. Il est possible de tester la requête SQL proposée, dont les résultats seront les instances des classes déclarées (Figure 158).

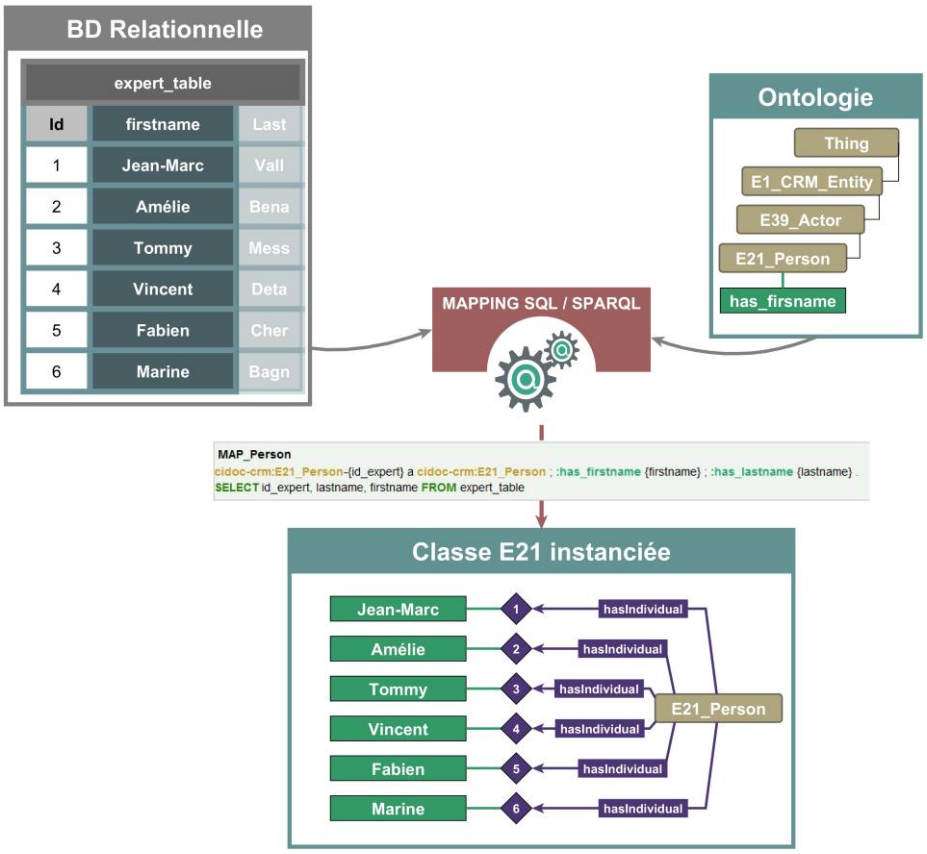


Figure 157 : Instanciation de la classe E21_Person par le mapping MAP_Person.

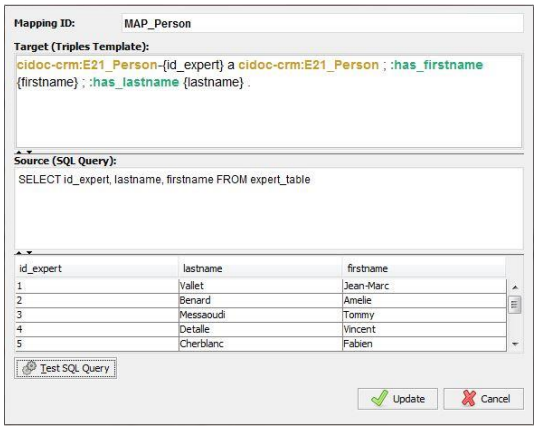


Figure 158 : Fenêtre du mapping manager de Protégé pour l'exemple MAP_Person.

Lorsqu'un mapping implique plusieurs champs de la base de données, c'est qu'ils ont nécessairement une relation conceptuelle du côté SQL et également du côté SPARQL. C'est le cas, par exemple, du quatrième mapping (Figure 156). Celui-ci extrait les personnes réalisant une observation scientifique. Les personnes sont représentées par la connaissance « *E21_Person* », dont l'action a été d'effectuer, par la propriété d'objet « *P14i_performed* », une observation scientifique représentée par la connaissance « *S4_Observation* ».

Chaque classe reliée peut être instanciée en utilisant ce type de technique. Dans notre ontologie, nous avons également décrit une annotation comme étant une entité qui regroupe

des index spécifiques référencés dans chaque image et dans le nuage de points par les correspondances de la Figure 159.

Figure 159 : Correspondances permettant d'extraire les index 3D de chaque annotation : capture d'écran de Protégé.

Lorsque le terme de désignation est disponible, nous pouvons directement classifier une annotation dans une classe plus spécifique dans la hiérarchie de « D35_Area ». Par exemple, si une annotation a pour concept de description « *Spalling* », un terme subsumant la classe « *Alteration* », alors celle-ci instanciera la classe « *D35_Area* » - subClass-> « ***AlterationRegion*** ». Nous pouvons également obtenir cette information en connaissant le calque thématique sur lequel l'expert a annoté la région considérée.

Comme nous l'avons développé dans notre approche méthodologique, la phase de désignation fait intervenir plusieurs classes dont l'annotation, en tant que telle, par la classe « *D35_Area* » et un concept de description décrit dans la classe « *DescriptionConcept* » (Figure 159).

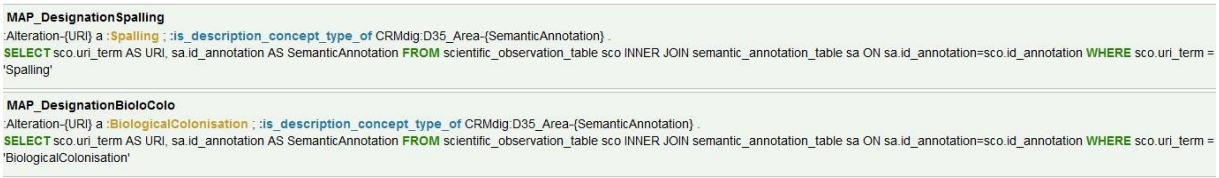


Figure 160 : Exemples de mapping de la phase de désignation par un expert sur une annotation : capture d'écran de Protégé.

5.2.5. Requêtes possibles par SPARQL via ONTOP et résultats

Après la fusion de l'ontologie de domaine et de la base de données par des mappings, il est possible de réaliser des requêtes SPARQL sur les données intégrées et extraire des informations utiles sur les différentes observations scientifiques réalisées (Figure 145). Tout d'abord, lorsque l'expert souhaite analyser la conservation d'un bâtiment, il réalise des acquisitions avec l'objectif de générer un support d'analyse multicouches. Pour cela, il fera des photographies afin de recouvrir la zone d'intérêt en suivant un protocole en vue de produire une reconstruction tridimensionnelle (Figure 13). Le système d'annotation permet ensuite à différents experts d'annoter sur quatre calques de description thématique : Altération, Matériau, Technique de Construction et Composant Architecturaux. Nous pouvons compter seize observations scientifiques dans la base de données et visibles graphiquement à travers leurs régions dessinées grâce au système d'annotations sémantiques (Figure 161).

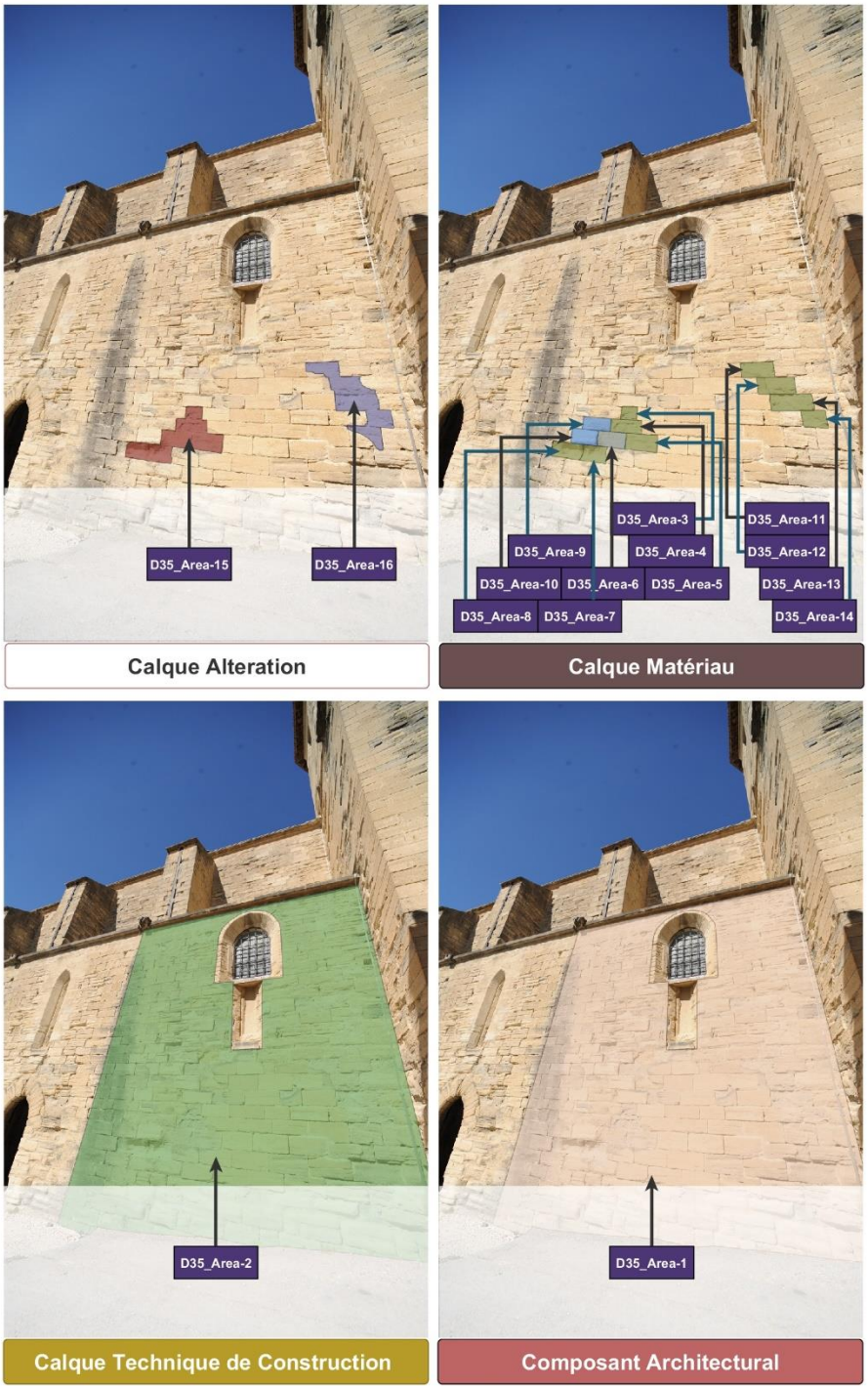


Figure 161 : Calque de description avec leurs annotations sur les images orientées.

Les annotations ont été réalisées et propagées sur les autres images du jeu intégré initialement. Comme expliqué dans notre approche, une observation scientifique implique, d'une part, l'action de dessiner une région et d'autre part de lui donner une désignation en s'appuyant sur une argumentation.

Notre objectif est d'extraire des informations pertinentes concernant les éventuels croisements entre les entités intégrées. Pour cela, nous utilisons un raisonneur avec lequel il est possible de réaliser plusieurs choses. D'une part, QUEST (le raisonneur dédié d'ONTOP) est

utilisé afin de tester si l'ontologie, peuplée de ses individus reliés, est cohérente (ENG : Consistant). D'autre part, il permet de raisonner sur les données intégrées, structurées par l'ontologie de domaine. Nous utilisons le langage SPARQL afin d'extraire des informations. Tout comme l'ontologie en elle-même (via l'intégration d'ontologie de différentes URL), le SPARQL utilise des préfixes afin de simplifier le codage et également pour extraire la connaissance dans la bonne source. Pour chacun des exemples, nous affichons la requête en langage SPARQL, le tableau de triplet qui en ressort et enfin le résultat visuel sur une image de référence accompagnée de son graphe (réalisé manuellement). Sur le système réel, les annotations sont visibles sur toutes les images parmi lesquelles la propagation est possible.

Requête 1 : Afficher toutes les annotations et leur nombre de points 3D (Figure 162).

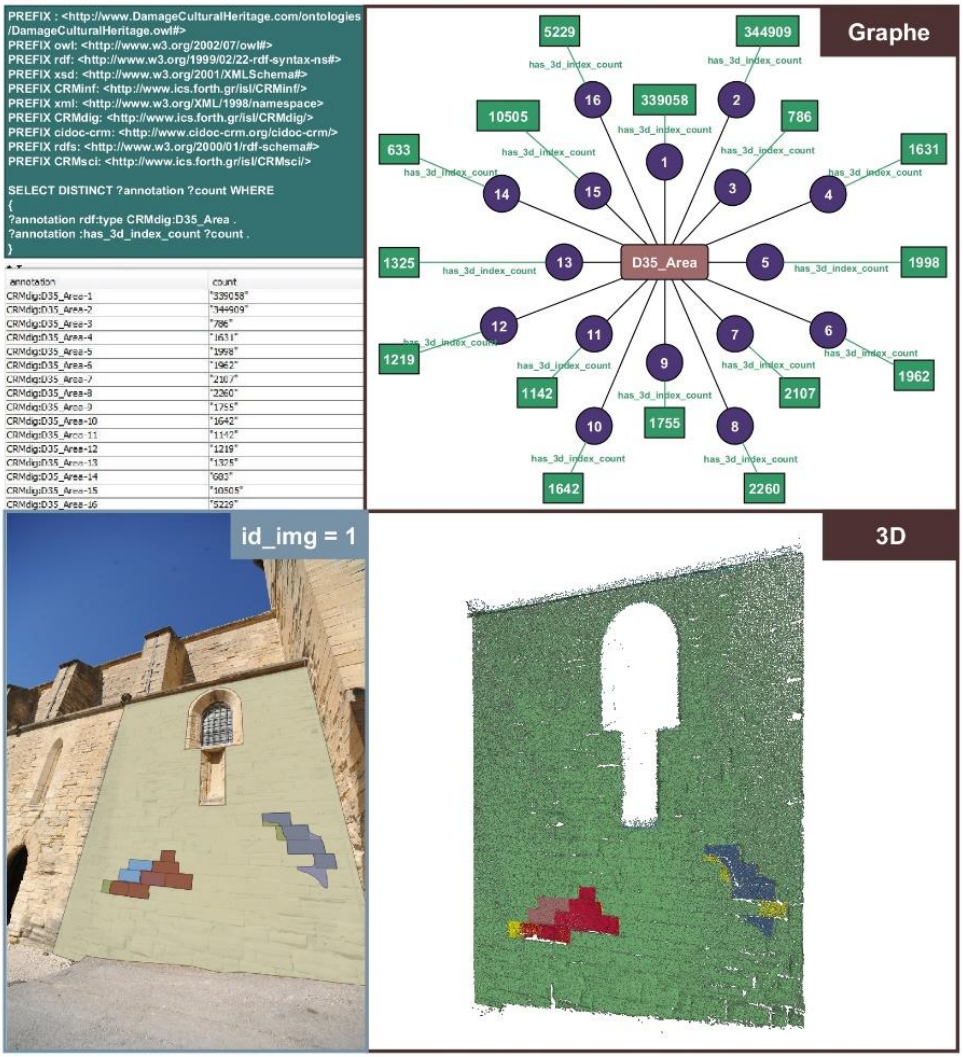


Figure 162 : Résultat de la requête SPARQL et de son graphe en haut), et de son visuel en 2D puis en 3D (en bas).

Ceci est une requête simple que l'on peut réaliser afin de constater toutes les annotations par les experts, sans se soucier des calques de description. Ensuite, il est intéressant de connaître les concepts de description désignés dans le cadre d'un processus d'observation scientifique.

Requête 2 : Afficher l'ensemble des observations scientifiques disponible de cette maçonnerie (Figure 163).

Pour l'affichage et pour plus de visibilité, nous remplacerons la relation :

- « *supported_by* » par « *s_by* »
- « *has_description_concept_type* » par « *has_dct* ».
- « *O8i_observed » par « O8i* »
- « *P14i_performed* » par « *P14i* ».

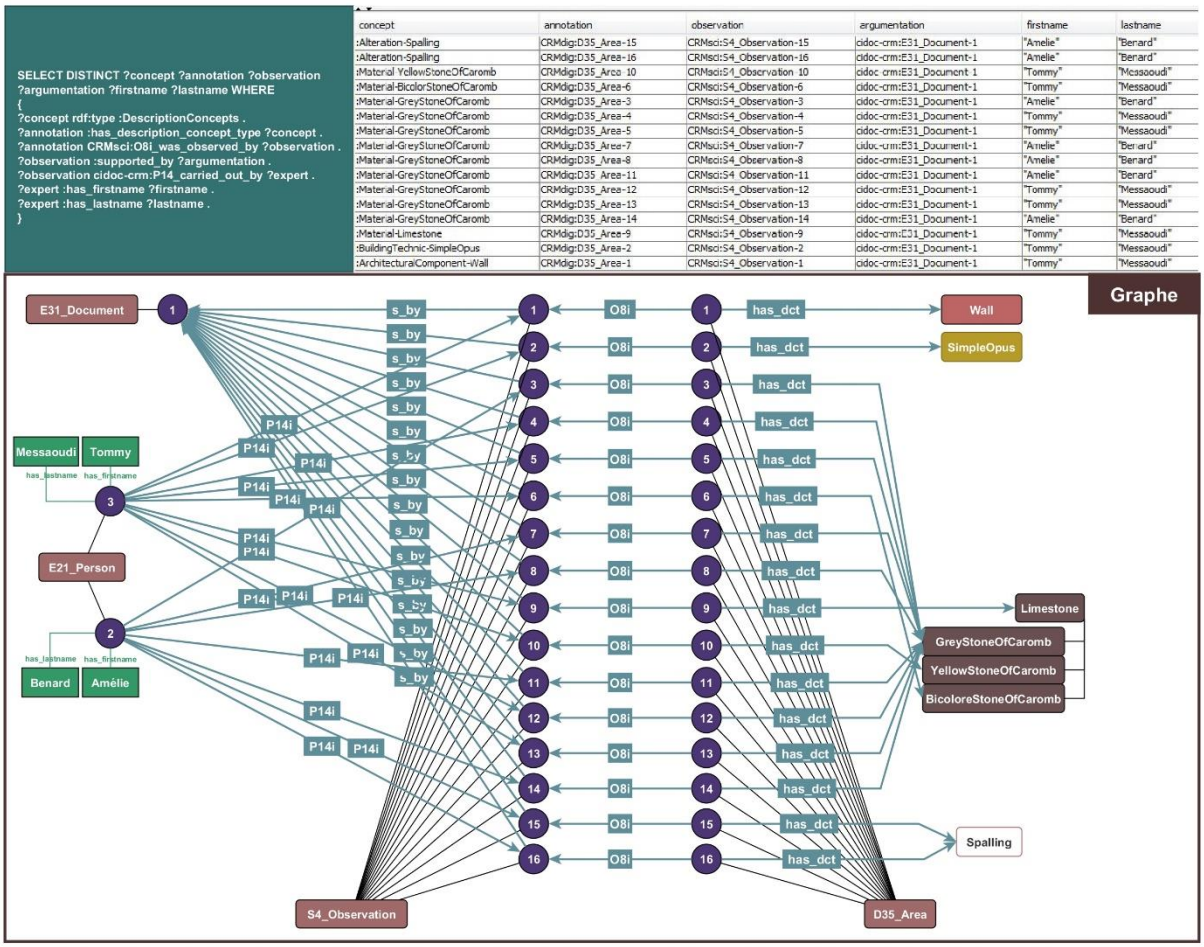


Figure 163 : Requête d'extraction de l'ensemble des processus d'observations dédiés à cet édifice : résultats (en haut) et graphe (en bas).

Grâce à cette dernière, nous pouvons extraire les termes de l'ontologie de domaine utilisés pour désigner une annotation, et la/les ressource(s) documentaire(s) exploitée(s) pour argumenter son choix. Nous pouvons ensuite accéder à un autre niveau d'information. En effet, le modèle tridimensionnel nous fournit une information spatiale que nous avons pu relier avec notre ontologie de domaine. Concrètement, chaque annotation peut se superposer avec d'autres. Si une région est superposée à une autre, alors c'est que ces deux régions ont au moins un index 3D en commun (requête 3). Et inversement, si deux annotations ont un point commun alors elles se superposent. Dans notre cas, nous pouvons donc, d'une part, comparer si sémantiquement deux concepts, parmi les quatre classes thématiques, se superposent, et d'autre part, filtrer le résultat en testant quelles annotations se superposent

spatialement. De cette façon, en prenant en considération les observations scientifiques réalisées par divers experts, nous pourrons obtenir une chaîne sémantique sur les différents niveaux de description. Cette chaîne sémantique nous donne, à une région spatiale donnée, l'état de conservation à un instant t. Prenons par exemple la relation « *act_on* » qui lie une « *Altération* » à un « *Matériau* » (requête 4).

Requête 3 : Montrer les annotations partageant les mêmes index 3D (Figure 164).

Pour plus de lisibilité, nous avons remplacé les propriétés objets :

- « *has_3d_index » par « has_3di* »
- « *has_description_concept_type* » par « *has_dct* »

Le résultat de cette requête compte 13 690 lignes de triplets. Afin de réaliser le graphe, nous avons choisi d'impliquer la région 15 et la région 10 avec leur index 3D en commun.

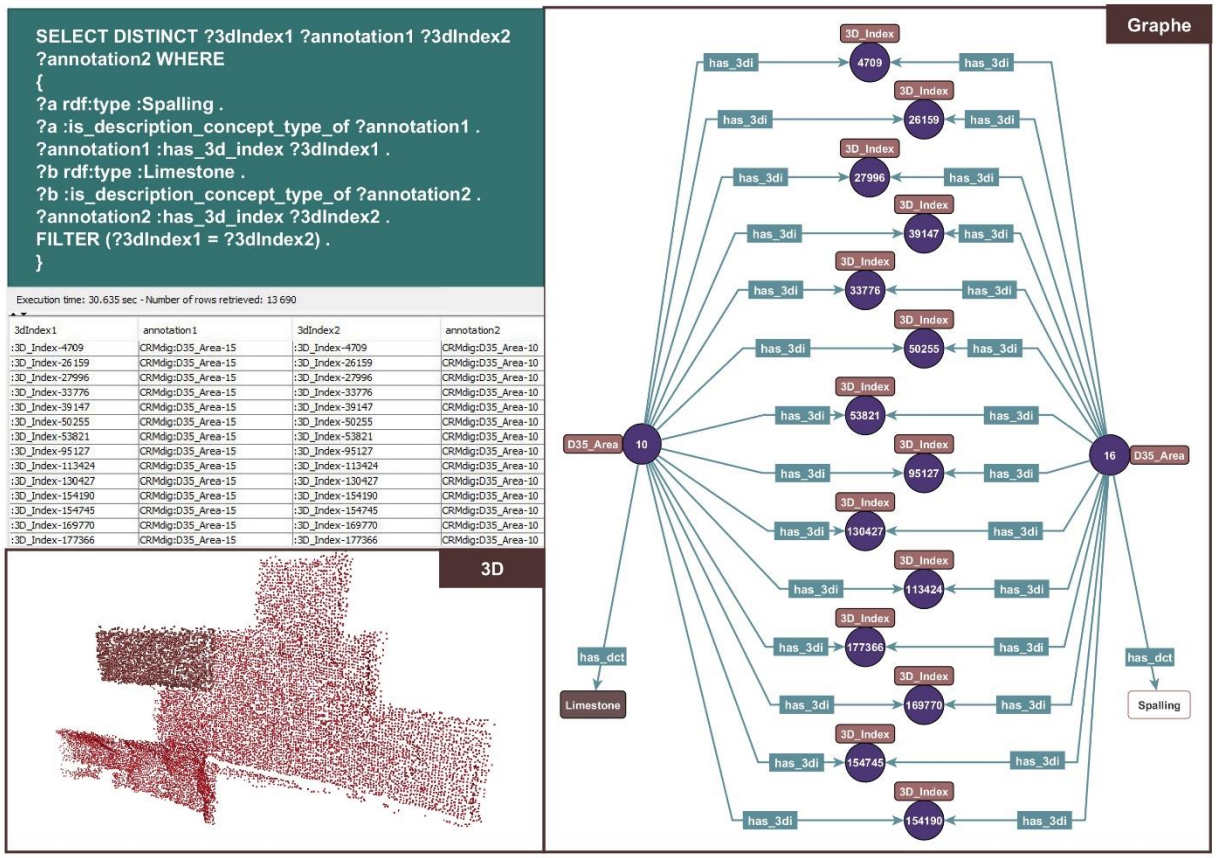


Figure 164 : Requête d'extraction des annotations et de leurs index 3D communs : résultats en graphe et sa visualisation 3D.

Comme nous pouvons le constater ici, nous sommes capables de déterminer si des annotations sont superposées. En d'autres termes, via une comparaison de leur index 3D, nous pouvons dire si les annotations intégrées dans le système partagent les mêmes index du nuage de points. Notre outil ne peut pas réaliser un comptage de ligne, car la fonction n'est pas implémentée (en cours de développement). Cependant, si des points en commun sont sélectionnés, alors le couple d'annotations possédant ces points est également impliqué dans la relation « *has_common_3d_index* » afin de réaliser des calculs de superposition (requête 5).

Requête 4 : Lister les altérations qui agissent sur des matériaux en affichant les régions correspondantes (Figure 165).

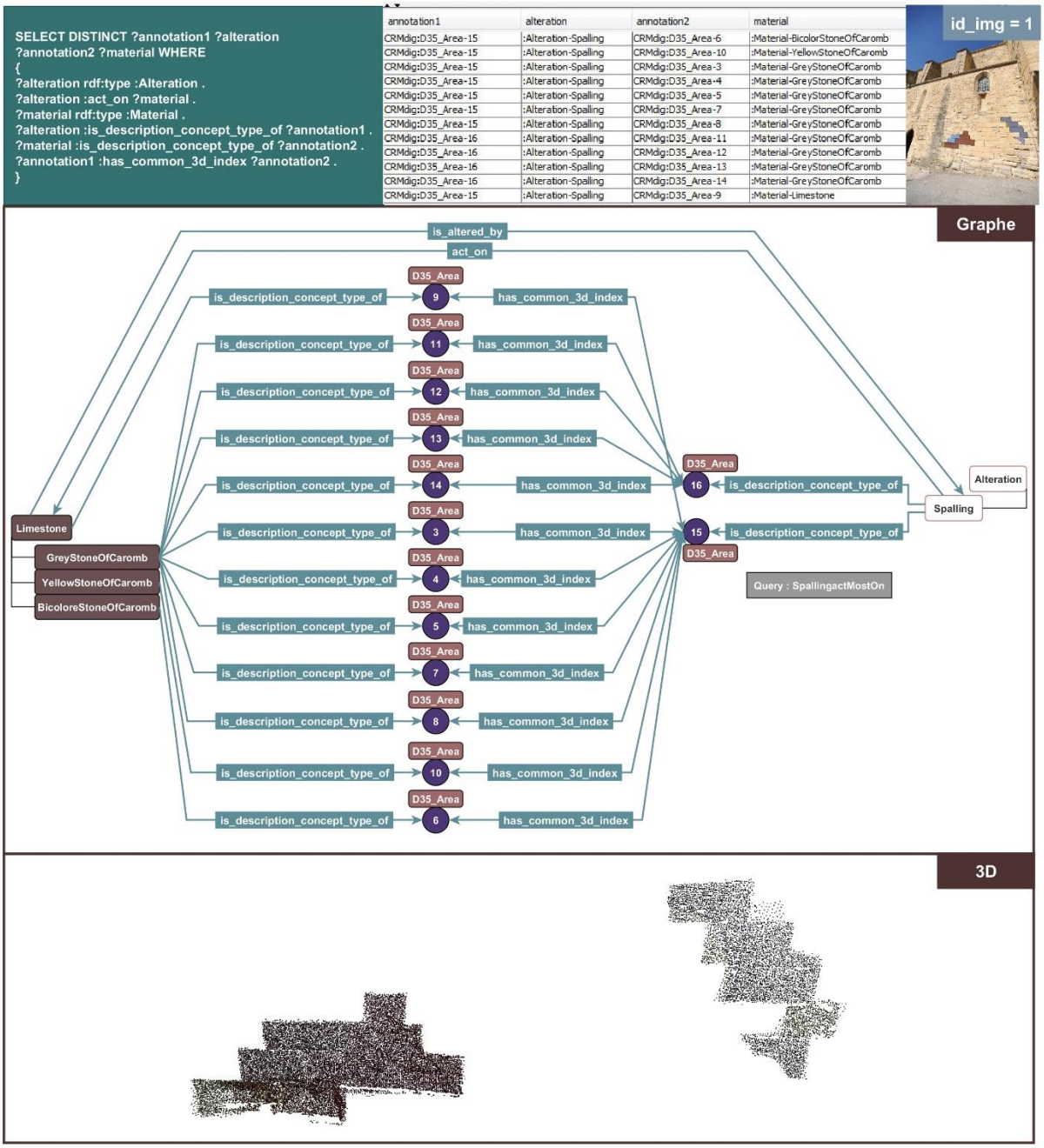


Figure 165 : Requêtes d'extraction des altérations qui agissent sur des matériaux : résultat des triplets et visualisation 2D (en haut), le graphe (au milieu), et la visualisation 3D (en bas).

Il n'y a que deux régions typées « Alteration – subClass -> Spalling » superposées à douze régions typées « Material – SubClass -> GreyStoneOfCaromb -> YellowStoneOfCaromb -> BicolorStoneOfCaromb ». Nous pouvons voir le résultat de cette requête sous forme de graphe (Figure 165). Ce que nous pouvons observer c'est qu'elle répond à une autre question que les experts rencontrent souvent sur site : quel *matériau* est le plus altéré par l'altération de type *desquamation en plaque* (ENG : *Spalling*) ? Résultat : Materiau-GreyStoneOfCaromb

(Pierre Grise de Caromb). En effet, ce sont les régions qui ont ce type de matériau qui possèdent le plus de relations spatiales avec les annotations de types « *Spalling* ».

La requête suivante est basée sur les résultats de cette dernière. Nous souhaitons également connaître, pour une altération donnée, quel matériau est le plus altéré, en calculant son degré de superposition. C'est une information pertinente pour l'expert qui réalise un diagnostic. Pour toutes les superpositions sémantiques et spatiales, l'extraction de cette extension pourrait être intéressante afin de connaître les relations entre les matériaux et les formes d'altérations qui agissent dessus.

Requête 5 : Quantification de la superposition en pourcentage (Figure 166).

Si nous nous concentrons sur l'annotation « *CRMdig:D35_Area-15* », nous pouvons calculer le degré de superposition avec toutes les régions avec lesquelles elle partage des points 3D. Chaque état de superposition, impliquant nécessairement deux annotations, est instancié dans la classe « *Overlapped_Area* » (FR : région superposée). Cette classe fait intervenir deux instances de « *D35_Area* » de type « *Concept de Description* » déjà reliées conceptuellement comme ayant des index en communs. Le compte d'index communs pourra être stocké dans la propriété de données « *has_common_3d_index_count* ». Ne proposant pas de comptages d'occurrences dans sa version actuelle, ONTOP ne nous permet pas de réaliser des calculs de superpositions sur des annotations. L'exemple sera donc réalisé en utilisant le Raisonneur intégré dans Protégé. Nous remplaçons ces propriétés pour davantage de visibilité :

- « *implies_first_area* » par « *a1* »
- « *implies_second_area* » par « *a2* »
- « *has_3d_index_count* » par « *3d_i_count* »
- « *has_common_3d_index_count* » par « *c3di _count* ».

Cette requête peut être réalisée sur l'ensemble des annotations répondant à des relations de superpositions via « *has_common_3d_point* ». Pour une annotation donnée de type « Altération », comme l'individu « CRMdig:D35_Area-15 », nous voulons savoir quelle(s) annotation(s) de type « Matériau » est/sont superposée(s) à elle ? Et quel est le pourcentage de superposition ? Nous pouvons répondre à la première question grâce à la requête 4, puis à l'aide de calcul arithmétique simple nous pouvons calculer le pourcentage de chacun des évènements instanciés. Pour cela, prenons l'exemple de « *Overlap-154* ». Celui-ci implique d'une part la région « *CRMdig:D35_Area-15* » de type « *Alteration-Spalling* » composée de « 10505 » index 3D, et d'autre part la région « *CRMdig:D35_Area-4* » de type « *Material-GreyStoneOfCaromb* » composée de « 1631 » index 3D. « *Overlap-154* » compte « 1581 » index 3D en commun. Nous pouvons ensuite faire un produit en croix en prenant pour référence la région la plus grande à travers la question : de combien de pourcent « *CRMdig:D35_Area-15* » recouvrent « *CRMdig:D35_Area-4* » ? Résultat : 1581 x 100 / 1631 = 96,7 %.

Les requêtes 3 et 4 peuvent fournir beaucoup d'informations, particulièrement où les observations touchent les quatre classes de description. Ces classes correspondent à des connaissances reliées du domaine de la conservation. Les données de sorties, les triplets,

peuvent être exportées en tableaux CSV avec lesquelles nous pouvons générer d'autres niveaux d'informations. Nous avons donc exporté les triplets des requêtes 4 et 5, et avons édité les fichiers en ajoutant seulement les propriétés (relations) que ceux-ci ont entre eux (relations utilisées dans la requête SPARQL). Nous avons ensuite exploité une solution open-source de manipulation et de visualisation de graphe : Gephi [Gephi, 2016]. Cet outil nous permet de constater le comportement du graphe soumis à différents algorithmes de spatialisation de nœuds. Nous devons créer deux fichiers CSV. Il y a, dans un premier fichier, la liste de tous les identifiants des individus impliqués issus des requêtes SPARQL, définis comme des nœuds (index 3D, annotations, termes). Le second fichier liste les relations que les individus ont entre eux. Une relation identifie une source et une cible, donc nous avons deux colonnes d'individus, puis une troisième colonne qui fournit le label de la relation. Nous chargeons ces fichiers dans Gephi, pour créer ensuite une visualisation. Un graphe est créé, mais ne donne aucune information visuelle exploitable pour documenter la conservation du patrimoine. Pour rendre le graphe plus pertinent, nous lui appliquons une suite d'algorithmes. Nous utilisons plus particulièrement un calcul de spatialisation appelé Yifan Hu [Hu Y., 2011]. Les réseaux et les graphes encapsulent des relations complexes dans plusieurs domaines d'application. Les algorithmes de spatialisation pour analyser ces graphes jouent un rôle important dans la découverte des structures et dans l'acquisition des connaissances. La méthode Yifan Hu est un algorithme appelé de force dirigée multiniveau avec une grande rapidité de calcul. Elle utilise des structures de données en octree et est basée sur une approximation de la force des nœuds. Elle est fortement liée au nombre de relations générées par le graphe. Le résultat visuel (Figure 167) est davantage exploitable et permet de nous rendre compte du résultat des requêtes 3 et 4, en l'occurrence de répondre à question : sur quel matériau l'altération desquamation en plaque agit le plus ?

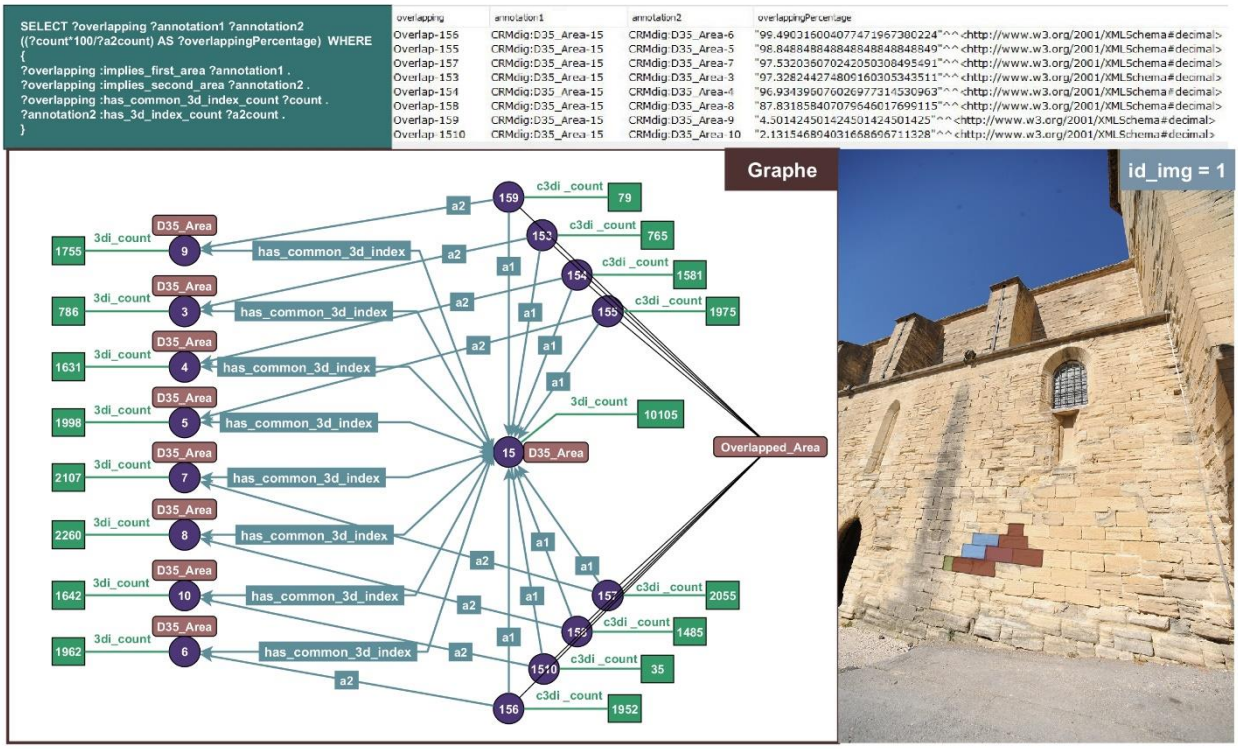


Figure 166 : requête d'extraction du degré de superposition entre une région de type "Altération" et des régions de type "Matériau" : résultat des triplets (en haut), graphe et image spatialisant les annotations (en bas).

Comme nous pouvons l'observer, les points de plus petites tailles correspondent aux index 3D. Nous pouvons voir qu'ils sont reliés aux régions. Un même point peut être dans plusieurs régions : ceci est représenté par des relations. Les régions sont reliées à des concepts de descriptions également spatialisées dans cet espace. Deux groupes se forment autour des nœuds Region15 et Region16. Ce phénomène se produit, car il partage un groupe d'index 3D différents. Un lien réunit ces deux groupes. Cette réunion se produit, car l'algorithme a détecté des modalités de relations similaires dans l'ensemble du graphe, renforçant la gravité entre les nœuds en fonction du nombre de relations qu'ils possèdent. D'un point de vue spatial, cela se traduit par le rapprochement de deux nœuds caractéristiques qui constitue le résultat de la requête en comptant le nombre de relations qu'il comporte : « *GreyStoneOfCaromb* », noté ici « *GS_Caromb* », est le matériau le plus affecté par l'altération « *Spalling* ».

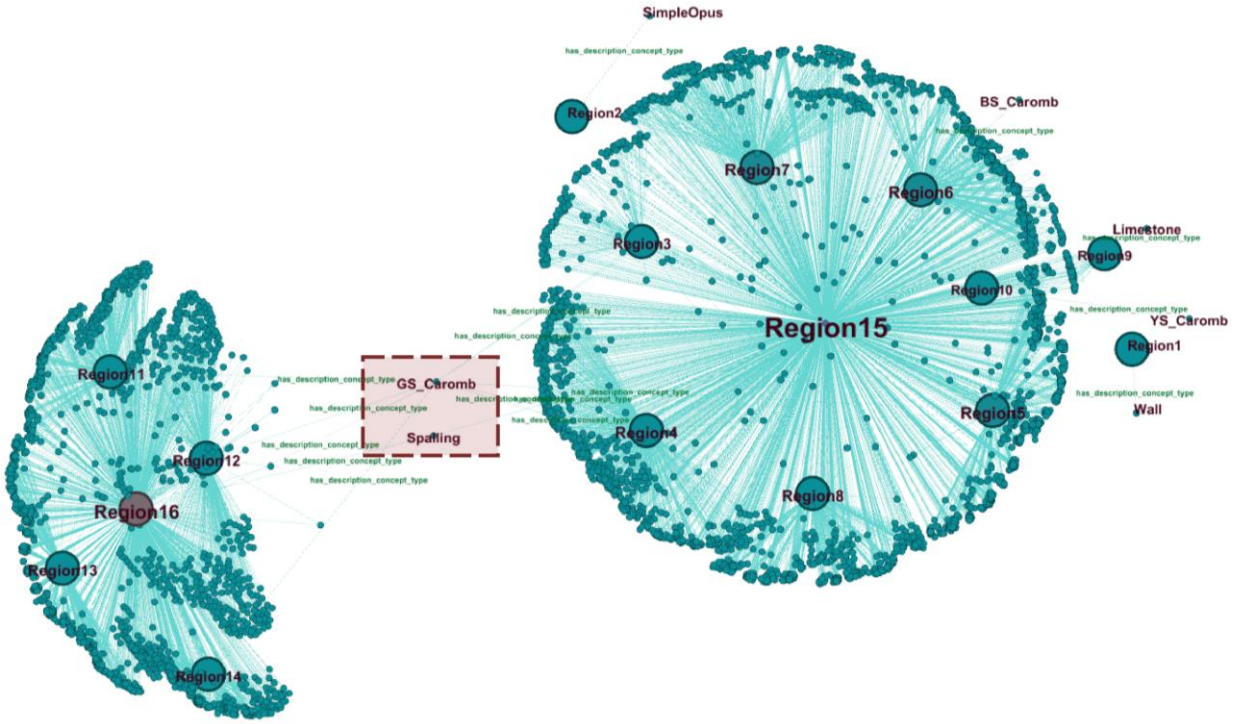


Figure 167 : Graphe de visualisation par l'algorithme de spatialisation de Yifan Hu.

5.2.6. Conclusion sur l'expérimentation

Nous avons présenté dans cette partie l'expérimentation de notre ontologie de domaine dédiée à l'annotation d'images spatialisées pour l'étude de la conservation de bâti patrimonial. Cette proposition nous a permis de valider notre approche de modélisation conceptuelle ainsi que d'en explorer les principales potentialités en termes d'implémentation. Telle qu'elle est structurée, la base de données est représentative de la diversité des ressources à considérer pour analyser les aspects visuels, géométriques et physico-chimiques de l'édifice. Grâce à l'ontologie, nous pouvons relier ces données à travers les quatre classes de description de notre ontologie de domaine. Les ressources intégrées sont croisées par une approche d'accès aux données basée sur les ontologies, et permettent de décrire, à travers des connaissances formalisées, la conservation du patrimoine. La véritable innovation de notre approche est que, pour la première fois, la dimension spatiale, la dimension sémantique et la dimension morphologique sont reliées au sein d'un seul modèle de connaissances (basé sur la corrélation de quatre aspects thématiques). Ces dimensions nous ont permis, d'une part, de structurer des données, et d'autre part, d'accompagner la spatialisation et l'analyse d'observations scientifiques argumentées. La corrélation de ces observations rend possible l'accès à de nouveaux niveaux d'analyse et de gestion d'informations au sein d'environnements de travail collaboratifs : la documentation des acquisitions et des ressources documentaires, l'association d'entités spatiales avec des classes de description, puis la classification d'occurrences et l'analyse quantitative des superpositions spatiales par des requêtes SPARQL.

Chapitre 6. Conclusion et perspectives

Ce travail de recherche s'est intéressé à la proposition d'une ontologie de domaine dédiée à l'annotation d'images spatialisées pour le suivi de l'état de conservation du patrimoine bâti. La fusion des trois dimensions essentielles (sémantique, spatiale et morphologique) articulée avec l'identification de quatre classes thématiques d'observation (« *Altération* », « *Matériau* », « *Technique de Construction* » et « *Composants Architecturaux* »), nous a permis de prendre en considération les aspects quantitatifs et les aspects qualitatifs inhérents des études (visuelle, géométrique et physico-chimique) réalisées par les experts de la conservation. Par cette approche, pleinement inscrite au sein du développement d'un dispositif de collecte, d'enrichissement et d'analyse de données 2D/3D, nous avons su prendre en compte l'exploitation d'un cadre d'observation scientifique collaboratif pour faire dialoguer les données acquises, les informations extraites et les connaissances formalisées au sein d'un modèle conceptuel innovant. Parmi ces données, se trouve un élément essentiel qui, dans notre approche, permet de spatialiser des observations scientifiques et constitue un support d'analyse multi-couches avec plusieurs niveaux de granularité : la représentation tridimensionnelle de l'édifice. Cette entité-clé nous ouvre des possibilités en matière de support pour les observations scientifiques menées sur le bâtiment. Elle nous permet de réaliser des mesures quantitatives, mais aussi, dans notre cas, elle permet de spatialiser précisément des données relatives à sa morphologie, son état visuel et sa composition afin de produire une instance du bâtiment réel dans toute sa complexité.

Grâce aux données 3D et aux données analytiques, le bâti constitue un objet d'analyse quantitatif. Cependant, cet aspect ne peut être utile que si un domaine de connaissances est défini à travers une liste de termes c'est-à-dire l'aspect qualitatif. De ce fait, la prise en compte de ces deux composants rend possible l'analyse intelligible de l'état de conservation de l'édifice observé. Les données formant la base de toutes réflexions sont les éléments objectifs qui incitent les experts à produire des informations en les contextualisant. Cette accumulation et le croisement d'informations hétérogènes permettent d'obtenir une stabilité dans la compréhension des mécanismes d'altération, par exemple, et de définir des hypothèses et même des affirmations sur les phénomènes en question, spécifique au bâti en interaction avec son environnement. L'expert, dans son domaine d'étude, se sert de ses compétences et ses savoir-faire relatifs à ses analyses et conduise à définir des connaissances tacites et formelles au sein de la communauté.

Ce que nous faisons émerger grâce à cette approche, c'est la présence de deux entités porteuses essentielles : une représentation 3D et une ontologie de domaine (Figure 168). La première représente l'enveloppe de l'édifice patrimonial et porte toutes les données relatives à sa complexité : le visuel de sa surface, sa forme géométrique et sa composition physico-chimique (en cas de spatialisation d'analyses ponctuelles). La deuxième est un modèle conceptuel représentant des connaissances du domaine. Il est constitué de termes instanciés issus de l'information concrète du cas d'étude observé, qui sont reliés par des propriétés complexes.

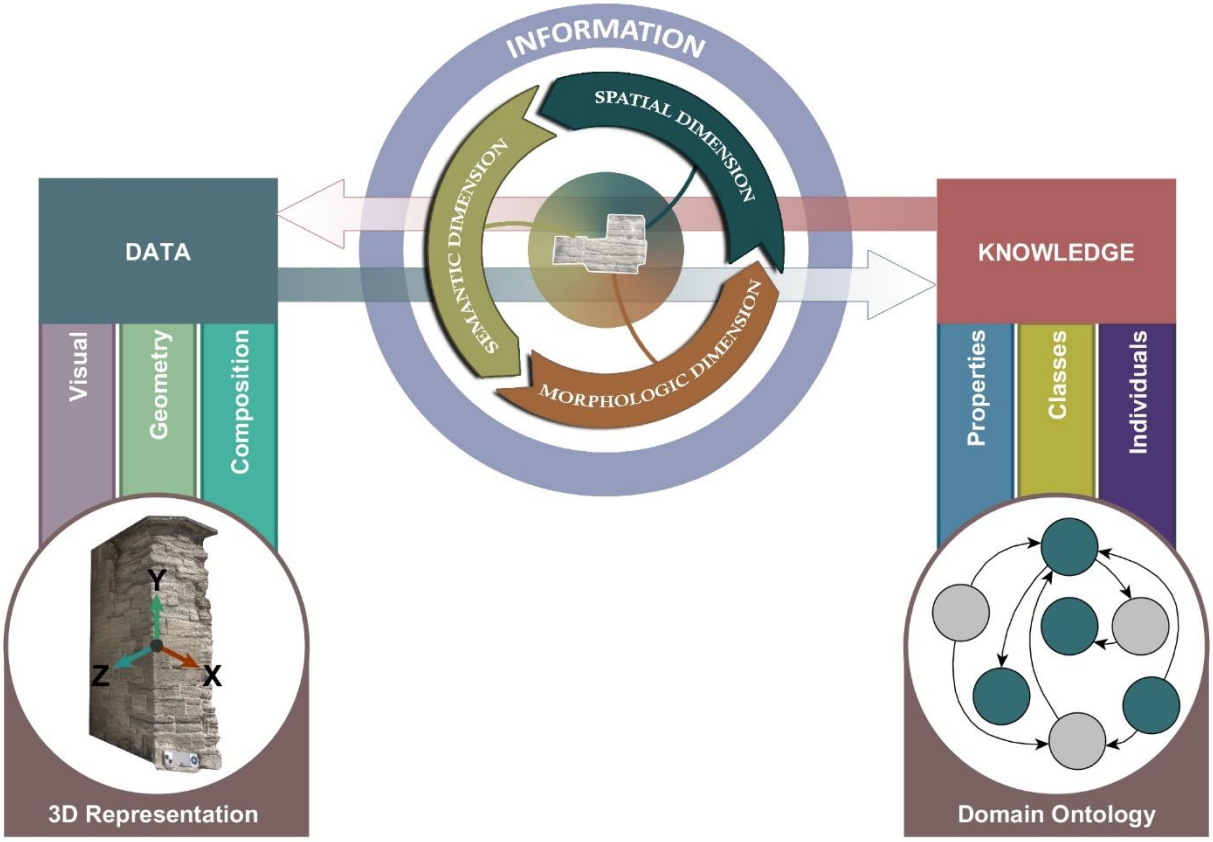


Figure 168 : L'information interfaçant deux entités essentielles pour la description : la représentation tridimensionnelle (donnée) et l'ontologie de domaine (connaissance).

L'information, considérée comme une interface, permet de passer d'une représentation à l'autre. D'une part, des données sont acquises afin de produire des informations pertinentes quant à la conservation du bâti. Ces informations instancient des connaissances dans la représentation conceptuelle modélisée, raisonnant sur des individus déjà intégrés. D'autre part, grâce à des observations scientifiques, des informations sémantiques, provenant des connaissances, pourraient être proposées en vue de suggérer à l'expert de réaliser de nouvelles acquisitions ou de nouvelles investigations, en retournant sur le réel pour comprendre davantage sa complexité. Cette relation bijective est essentielle et donne des solutions innovantes sur le plan méthodologique et technique pour conduire l'observation, l'analyse et le suivi des altérations d'un édifice historique. Elle s'appuie sur un continuum numérique (que nous avons su anticiper, structurer et articuler avec des exigences du domaine) permettant la collecte, la manipulation, l'enrichissement sémantique et la visualisation d'informations spatialisées.

Notre contribution, construite au sein d'un contexte spécifique fortement interdisciplinaire, pourra faire émerger, au sein des futures applications, des parcours d'hybridation de méthodes de travail (entre les disciplines). Ils seront essentiels pour l'analyse de plusieurs facteurs déterminant : (1) l'état sanitaire d'un édifice, (2) l'étude des transformations et des évolutions des formes et des phénomènes dans le temps, et (3) la classification des phénomènes observés par le cumul d'observations collectives.

Cette ontologie a encore besoin d'être complétée, mais l'intégration innovante des dimensions étudiées nous permet déjà d'introduire la notion de « continuum informationnel » comme une clé pour l'interconnexion de photographies spatialisées et enrichies sémantiquement, pour instancier une base de connaissances fondée sur le suivi des dégradations du patrimoine architectural.

6.1. Limites

L'approche proposée, répond à la problématique posée, mais certains aspects restent encore à prendre en compte et à améliorer d'une manière générale.

Des limites, concernant l'intégration des données, ont été mises en évidence. Certaines ressources d'experts ne peuvent pas être extraites de façon semi-automatique (ou automatique) comme nous pourrions le faire avec des images contenant des métadonnées. Des ressources documentaires par exemple (sources textuelles, iconographie, etc.), ou provenant d'acquisitions analytiques (caractérisation des matériaux), d'expérimentation en laboratoire (analyses chimiques), de simulations, doivent faire l'objet d'une interconnexion approfondie des données et des informations via des formulaires reliés à l'ontologie, ainsi que via des interfaces spécifiques pour l'annotation.

De plus, d'un point de vue de l'expérimentation, tout en ayant pu tester et valider l'articulation de notre moteur de corrélation avec l'interface d'annotation sémantique d'un côté et l'ontologie de domaine de l'autre, la connexion informatique définitive (capable de produire de façon automatique la transmission des données entres les parties) reste à réaliser. Pour réaliser ce travail, d'ores et déjà programmé dans le cadre d'actions futures au sein du laboratoire MAP, il faudrait modifier une partie de la structure (du schéma relationnel) afin d'optimiser la correspondance entre cette base de données et l'ontologie. Par conséquent, compte tenu des avancées en termes d'implémentation, les vraies potentialités de ce modèle ne pourront s'exprimer que lorsque nous possèderons une importante quantité d'instances pour amplifier l'expressivité et la crédibilité des résultats statistiques via des raisonnements sur les données (individus).

Une autre limite concerne l'intégration de connaissances pour la conception de l'ontologie de domaine. Pour notre approche, nous avons saisi manuellement les termes des différents glossaires dédiés aux altérations du patrimoine architectural (sur la base des échanges avec les experts de la conservation impliqués dans notre projet). Des techniques, aujourd'hui en plein essor, peuvent être utilisées, grâce aux méthodes de Traitement Automatique de la Langue Naturel (TALN), pour extraire sémantiquement des informations conceptuelles provenant de corpus (rapports de diagnostics, etc.) afin de les transformer en « connaissances formalisées » (réseaux de concepts corrélés) au sein d'un modèle conceptuel ontologique. La découverte et la compréhension tardive de ces techniques ne nous a pas permis de l'exploiter dans notre travail.

Un autre frein porte sur l'acquisition de données pour une bonne spatialisation d'images. Notre méthode se base sur le référencement spatial autour du nuage de points. Ceci étant relatif à l'utilisation de MICMAC, il est donc nécessaire que les photographies prises pour la génération du nuage de points suivent un protocole précis adapté à MICMAC en fonction de l'objet à analyser [Martin-Beaumont N. et al, 2012]. Ce protocole nécessite de posséder un minimum de connaissances en prise de vues photographique et en photogrammétrie. C'est pourquoi l'acquisition des photographies reste aujourd'hui limitée à un public averti.

Des verrous scientifiques concernant la gestion des états temporels pour suivre l'état de conservation d'un édifice sont encore lever. Même si les premières expérimentations menées sur l'utilisation du référencement spatial pour la mise en relation d'états multi- temporels sont encourageantes, l'implémentation actuelle reste très limitée pour une utilisation au sein du système (calcul et visualisation). Néanmoins, l'ontologie de domaine permet aujourd'hui de référencer conceptuellement ces états temporels pour comparer deux altérations qui ont évolué. De plus, la génération de graphes référençant les annotations représentées par les individus de l'ontologie est possible.

Par ailleurs, la collecte de données pour l'expérimentation et la validation d'un suivi temporel dans ce domaine nécessite la prise en compte d'écarts temporels larges (les phénomènes d'altérations étant très lents), ce qui limite clairement l'exploration de ce sujet à une simple "mise en perspective" des méthodes et des technologies que l'on conçoit aujourd'hui.

6.2. Perspectives de recherche

6.2.1. Vers une production participative : le crowdsourcing

Le domaine de la conservation fait intervenir un nombre important d'experts pour étudier les dégradations d'un patrimoine architectural. Cependant, bien que ces acteurs soient essentiels dans le processus d'observation du bâtiment, il serait intéressant d'étendre la perception de cette communauté au sein d'une infrastructure numérique via les enjeux du **crowdsourcing** (production participative) afin d'ouvrir la documentation patrimoniale à d'autres formes de participation [Zhao Y. et al., 2016]. L'ontologie de domaine conçue lors de notre travail de recherche, pourrait être exploitée en vue de structurer et décrire des tâches partagées. Ceci rend possible la spatialisation de données et d'informations provenant de la collecte participative et a fortiori l'observation de celles-ci par des experts. Cette vision permet d'étendre le cadre d'observation collaborative au-delà de la sphère scientifique, vers les sphères des professions du patrimoine (administrateurs, restaurateurs, etc.), voire celles des amateurs du patrimoine. Cette perspective fait émerger de nouveaux enjeux en matière de systèmes. Même au sein du seul domaine de la conservation, la production d'un système interfacé multi-utilisateur, multi-métiers donc multi-vues serait à envisager afin de proposer la construction d'un environnement numérique complexe [Boton C., 2013].

6.2.2. Vers une reconstruction tridimensionnel basée sur les connaissances du patrimoine architectural

Notre travail de recherche pourrait être un point de départ pour l'appréhension d'un autre verrou scientifique : la reconstruction 3D basée sur les connaissances du patrimoine bâti [Boochs F. et al., 2011]. Les classes de description interreliées que nous avons définies dans notre ontologie permettent de rendre compte de la complexité du bâti d'un point de vue des phénomènes d'altération. Les composants architecturaux ou même l'édifice de manière générale, sont également des entités qui ont pour vocations d'être reconstruit sémantiquement et numériquement afin d'anticiper le processus de restauration et de mise en en œuvre, assurant par là-même des gains économiques. Dans le domaine de l'architecture, de l'ingénierie et de la construction, une « révolution numérique » est actuellement à l'œuvre : le BIM. Le Building Information Modeling, ou modélisation des informations du bâtiment, est comparable à un système d'information appliqué à l'architecture. Nous souhaitons étendre cette technique au domaine du patrimoine architectural. À la différence des relevés numériques bruts, les modèles 3D manipulés dans une approche BIM sont sémantiquement enrichis. D'une part, les formes présentes dans le modèle représentent des ouvrages décrits par leur géométrie, leur matériau et leurs interrelations, et d'autre part, ces formes sont enrichies d'informations non géométriques, mais utiles au diagnostic, à la conception, à la simulation et à la mise en œuvre, ou encore à la maintenance. Dans le cadre d'un projet de post-doctorat, nous avons pour ambition d'élaborer des méthodes produisant une chaîne de traitement allant de l'acquisition jusqu'à la reconstruction tridimensionnelle sémantique d'artefacts patrimoniaux. L'utilisation d'une ontologie de domaine [Cruz C. et al., 2007] [Arayici Y. et al., 2017] semblerait être une solution pour rendre possible la formalisation de classes (connaissances) afin de générer des modèles (individus) théoriques comme le ferait le BIM en utilisant des règles de construction issues des classes IFC.

6.2.3. Vers la prise en compte du comportement mécanique des structures

Un élément, pris en compte exclusivement au niveau de notre modèle conceptuel, concerne l'intégration, l'extraction et la visualisation des données et informations sur le comportement mécanique des structures. À travers les propriétés de la classe de description « *TechniqueDeConstruction* », nous donnons la possibilité à l'utilisateur d'intégrer des données de calcul de structure.

Dans le cadre du projet MONUMENTUM, certains travaux se sont concentrés sur la possibilité d'intégrer dans la chaîne du processus de traitement des données, la construction de modèles géométriques structurés, puis le calcul du comportement mécanique. Ce volet du projet se relie aussi à la connaissance des matériaux (caractérisation physico-chimique, mesure des propriétés mécaniques, etc.). En effet, le comportement des matériaux de construction constitue une part importante dans la compréhension de l'apparition de pathologie de surface sur le bâti patrimonial. Un travail d'intégration (en termes de structure de données ainsi que

d'interface informatique) est actuellement en cours au sein du projet, et a pour ambition première d'interfacer la plateforme d'annotation 2D/3D avec LMGC90 (Section 2.3.5.2.). Ce dernier permet de générer des modèles de calculs numériques (volumiques) représentant le volume général de la structure complexe, et y intégrer des paramètres de simulations comme : des données relatives aux matériaux de construction, des propriétés inhérentes à la pierre (porosité, densité, couleur, etc.), leurs comportements dans des conditions environnementales spécifiques simulées (teneur en eau, contrainte à la rupture, coefficient de Poisson, etc.).
Comme nous l'avons déjà souligné dans le chapitre 2, LMGC90 permet de réaliser un panel d'analyse très important. Au vue de toutes les données (d'entrée et de sortie) qu'il est possible de prendre en compte dans le cadre de cette intégration, il a été nécessaire de définir et de sélectionner les concepts, propriétés et descripteurs à faire figurer dans l'ontologie de domaine. À partir des ressources que nous avons à notre disposition grâce au processus d'acquisition, il a été essentiel d'identifier d'une part, les données utiles à intégrer dans LMGC90, et d'autre part, les informations à visualiser (restituer) à l'utilisateur via l'interface. Par ailleurs, une réflexion devrait également concerner la distribution des éléments à gérer au sein de la base de données et au sein de l'ontologie de domaine.

Dans la Section 4.3.1.1.3., nous avons définis des attributs (descripteurs quantitatifs et qualitatifs) associés à la classe « *Materiau* » afin d'y intégrer des données et informations relatives au matériau étudié lors d'un processus d'observation scientifique. Grâce à la logique de description et les processus de raisonnement pris en considération dans l'ontologie, les propriétés sont transmises d'une classe à l'autre si ces classes ont explicitement été définies comme étant reliées (relation de subsumption, ou relation de propriété objet). Les propriétés associées à une instance de « *Materiau* », utilisé par un individu de « Technique de Construction » spécifiques, sont donc utilisées comme données d'entrée de LMGC90. Pour réaliser des calculs de structure une géométrie simple peut être utilisée et paramétrée comme étant une entité semi-rigide. Les objets modélisés peuvent également être discrétisés de manière plus précise, jusqu'à l'échelle du bloc.

Les données obtenues à la suite des calculs pourraient être visualisées via **ParaViewWeb** [ParaViewWeb, 2016] (Figure 169). C'est une application open-source, de visualisation et d'analyse de données multiplateforme. Cet outil peut intégrer des composants de visualisation 3D interactifs à travers une API légère en JavaScript. Il permet aux utilisateurs de construire une visualisation pour analyser leurs données en utilisant des techniques quantitatives et qualitatives. Un des avantages d'un point de vue système, est qu'il peut être lancé sur serveur afin d'analyser des jeux de données de taille importante. En effet, les données que nous devons étudier demandent beaucoup de ressources car elles impliquent l'analyse de bâtiments patrimoniaux de taille importante.

De plus, ces données et informations visuelles, générées par le processus de calcul de structure, fournissent des valeurs de descripteurs qui étaient auparavant absentes,

concernant un individu donné de la classe « Technique de Construction » par laquelle un matériau spécifique a été utilisé (Figure 169).

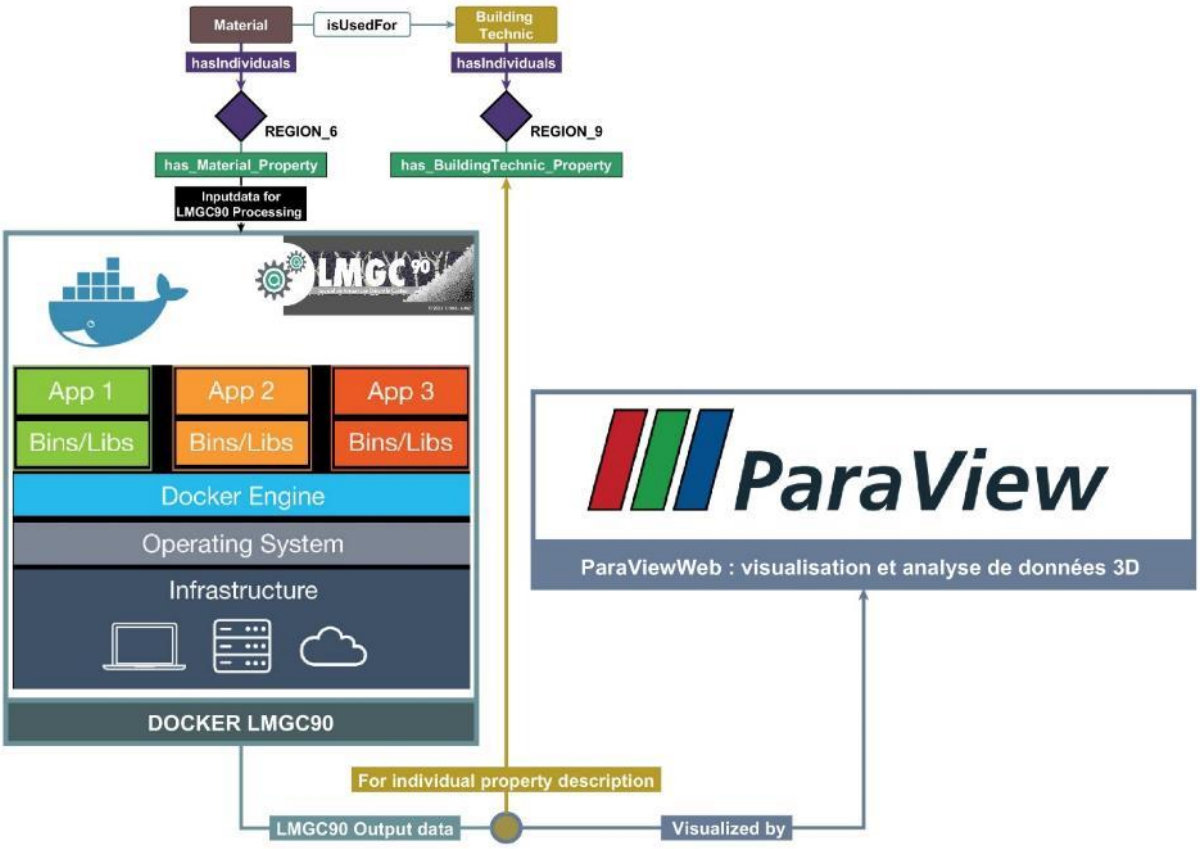


Figure 169 : Interface entre le modèle ontologique, l'outil LMCG90 et l'outil de visualisation de données et d'analyse ParaViewerWeb.

En ce sens, nous pourrions donc en conclure que pour un « *Materiau* » donné utilisé pour une « *Technique de Construction* », nous pouvons mettre à disposition à l'utilisateur final des informations concernant les conséquences du comportement mécanique sur la surface visuelle de l'édifice. Grâce à des processus de raisonnement, nous pouvons obtenir toutes les informations morphologiques et structurelles de tous les individus superposés, spatialement et sémantiquement, en réalisant des requêtes sur une classe de description.

6.2.4. Vers une approche de création de connaissances pour le raisonnement basé sur les cas

Au stade actuel de notre travail, l'ontologie de domaine dédié au suivi de la conservation du patrimoine ne permet que de collecter des annotations en relation avec des concepts appartenant aux quatre calques de descriptions thématiques. Nous pourrions imaginer à long terme, la possibilité de rendre l'ontologie plus expressive, lorsque le nombre d'individus (accompagnés de leurs attributs sémantiques, spatiales et morphologiques) pour chaque classe de description et concernant un grand nombre d'édifices, sera important. En effet, par des raisonnements, nous pourrions extraire pour chaque concept de l'ontologie des règles d'inférence : des restrictions universelles ou des restrictions existentielles (quantitative

ou non). Ces règles permettent de classifier les individus, dont nous ne connaissons pas le concept, seulement grâce à la valeur de leurs attributs [Hmida H. B. et al., 2013]. Il est évident qu'aujourd'hui, compte tenu des connaissances formelles que nous possédons, nous ne connaissons pas clairement les processus physico-chimiques affectant les pierres de taille et faisant apparaître des pathologies de différentes formes sur la surface de l'édifice. Il s'agirait, grâce à un modèle amélioré, d'extraire les tendances morphologiques spatiales et sémantiques, pour un concept donné. Cela permet également de tester si l'ontologie générale est « cohérente ».

Prenons par exemple, une altération caractéristique rencontrée sur l'enveloppe de l'église Saint-Maurice : l' « *Alvéolisation* ». Dans le cas où nous aurions suffisamment d'instances d'annotations sémantiques (« *D35_Area* ») ayant pour concept de description (« has_description_concept_type ») « *Alveolization* » (FR : « *Alvéolisation* »), nous pourrions extraire leurs propriétés spatiales et géométrico-visuelles. Ces dernières seraient utilisées pour proposer une instance théorique décrite par des valeurs de propriétés moyenne (ou une tendance) calculées statistiquement : une règle d'inférence caractérisant l'altération « *Alveolization* ». D'un point de vue ontologique, nous pouvons la représenter conceptuellement de cette façon (Figure 170). Grâce à cette règle, tous les individus de régions spatiales étant reliés au concept « *Altération* » et répondant à ces restrictions seront automatiquement de type « *Alvéolisation* ».

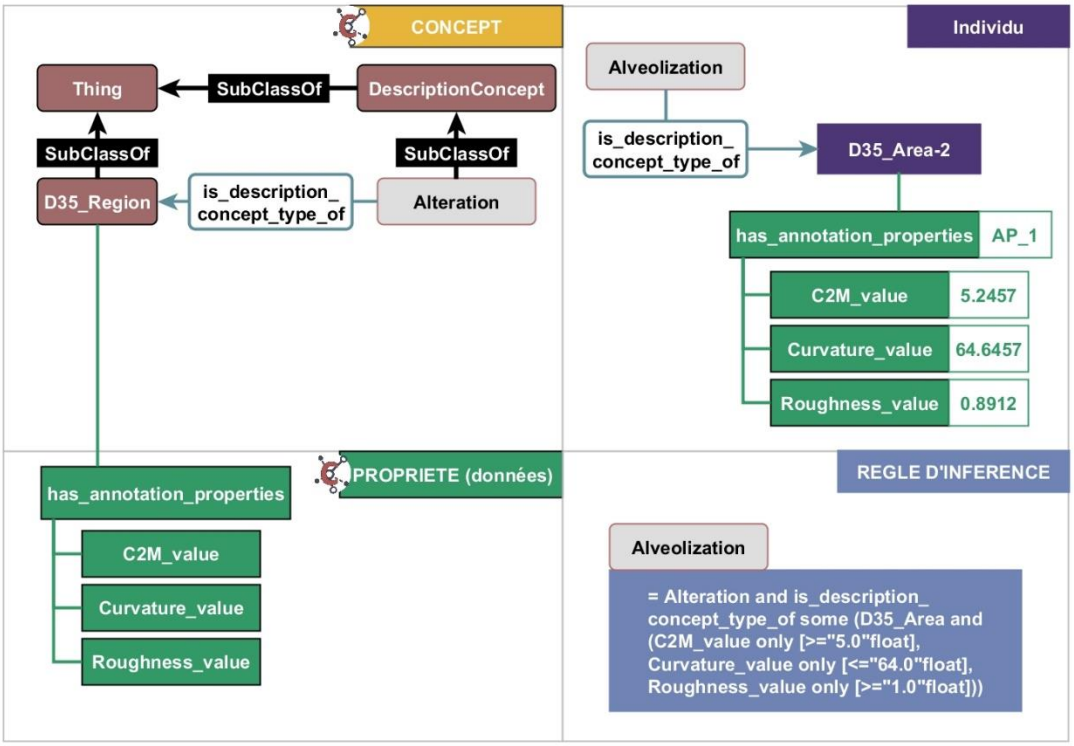


Figure 170 : Exemple de règle d'inférences.

Nous souhaitons réaliser, a posteriori, ce type d'amélioration pour chacun des concepts instanciés de l'ontologie de domaine pour la conservation. La définition de règle sur les

propriétés d'objets et de données pourrait considérablement améliorer le modèle. De cette façon, un individu dont on ne connaît pas la qualification pourrait, grâce à ses attributs disponibles, être classé automatiquement, sous validation de l'utilisateur. Ce type de système renfermerait une base de règles de raisonnement, dédiée au suivi de la conservation du patrimoine.

En ce sens, dans des perspectives à long terme, nous tendrons vers le développement d'un système qui serait capable d'analyser la représentation tridimensionnelle et extraire automatiquement des régions en proposant à l'utilisateur une liste de concept correspondant aux descripteurs extraits automatiquement.

Par ce moyen, nous nous rapprocherons des Systèmes dits d'Apprentissages à Base de Connaissances (SABC) [Kasabov N., 2001] ou des systèmes de raisonnement à partir de cas (section 3.3.1.). Il est ambitieux d'avoir une explication pour chaque phénomène de dégradation, apparu sur un bâtiment particulier, en interaction avec des contraintes environnementales spécifiques et mesurées. Une telle explication serait utilisée comme « cas » pour fournir des solutions à des problèmes similaires par le croisement des connaissances disponibles.

6.2.5. Vers une application mobile exploitant les technologies et techniques de Réalité Augmentée

Le système, à présent en cours d'implémentation, donne des solutions logicielles aux utilisateurs pour intégrer, spatialiser, annoter des données acquises sur le terrain telles que des images, afin d'analyser, de comparer et de comprendre les phénomènes de dégradation altérant le bâti patrimonial.

Au vu de l'essor des technologies mobiles et embarquées, il pourrait être intéressant de proposer aux experts de la conservation de combiner toutes les pratiques et activités menées sur le bâti, mais in situ. Par ce moyen, les données, déjà intégrées dans le serveur distant, pourront être disponibles et accessibles via un dispositif dédié accompagnant les experts lors de leurs investigations (Figure 171).

L'appareil mobile ne permettrait pas seulement de visualiser toutes les données spatialisées autour d'une représentation déjà présente et d'effectuer des observations scientifiques, mais donnerait aussi l'opportunité d'acquérir d'autres photographies, de les géolocaliser (grâce aux différents capteurs internes et externes de l'appareil) et de les spatialiser autour du modèle 3D. Il n'existe pas encore de tels terminaux mobiles capables de supporter de lourds calculs. C'est la raison pour laquelle, des moyens de communication réseau existent pour effectuer du stockage, du calcul, en établissant des processus dits en « cloud computing » (Figure 171). Ce dernier reçoit les données, puis les implique dans des calculs, et enfin retransmet les résultats sur le terminal.

De plus, par une approche de corrélation « réelle/virtuelle », nous pourrions, grâce à une extension logicielle, proposer à l'utilisateur de superposer des annotations/modèles 3D virtuel(le)s avec le bâti réel (Figure 171) en exploitant des technologies de Réalité Augmentée.

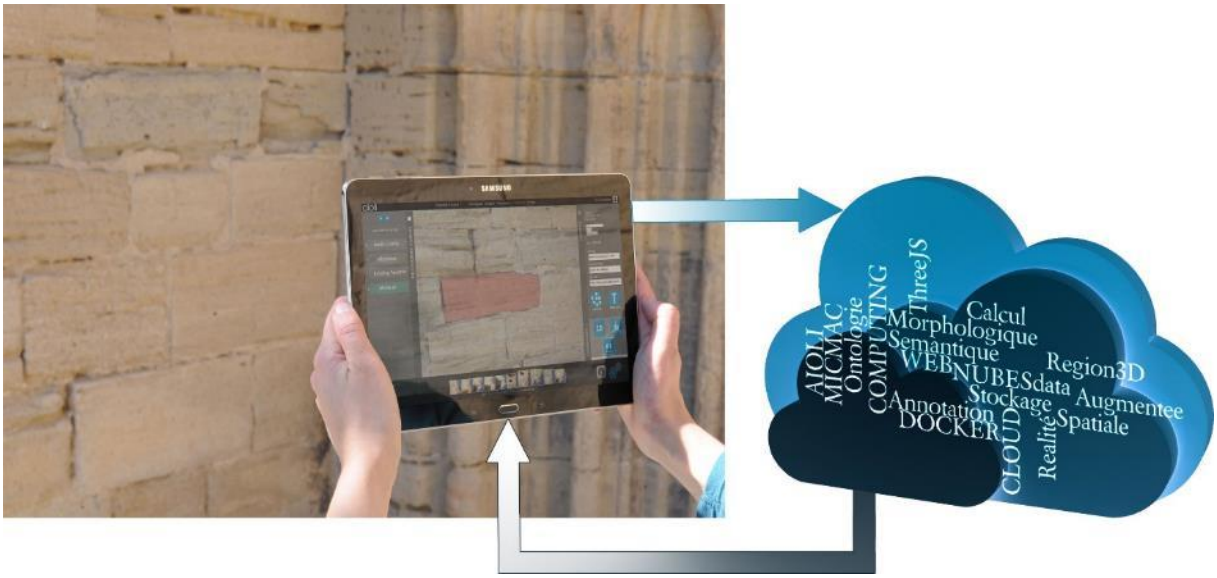


Figure 171 : Application mobile in situ pour l'étude de la conservation du patrimoine culturel bâti.

Un enjeu consisterait alors à être capable de ramener l'ensemble des analyses, des observations scientifiques, des interprétations et des synthèses que l'on conduit sur des représentations numériques, directement sur l'édifice réel. Il s'agirait donc de l'aboutissement d'un processus, qui démarre de la lecture du réel (acquisition), passant par l'analyse et l'interprétation de sa complexité (forme, surface et composition) et qui retourne vers le réel pour l'enrichir de toutes les informations produites. Cet enjeu, qui s'inscrit dans la continuité des apports de numérisation 3D du patrimoine architectural et de la constitution de bases de données spatialisées, ouvrirait la porte à l'identification de nouvelles modalités de documentation participative.

Bibliographie et Webographie

[123D Catch] www.123dapp.com/catch (disponible au 16/07/2016).

[Ackoff R. L., 1989] Ackoff, R. L.: **From data to wisdom**. Journal of applied systems analysis, 16(1), 3-9, 1989.

[Adrian J et al., 2014] Adrian J., Lo Buglio D., and De Luca L.: **Evaluating the Curvature Analysis as a Key Feature for the Semantic Description of Architectural Elements**, Eurographics Workshop on Graphics and Cultural Heritage - Short Papers / Posters, 2014.

[AFNOR, 1991] Norme Française, A. : A 09-400. **AFNOR, Thermographie infrarouge. Vocabulaire relatif à la caractérisation de l'appareillage**, AFNOR, 1991.

[Alahi A. et al, 2012] Alahi A., Ortiz R., Vandergheynst P.: **FREAK: Fast REtinA Keypoints, In Computer Vision and Pattern Recognition**, CVPR 2012, IEEE Internatinal Conference on pp. 510-517, 2012.

[Al-Jadir L. et al., 2010] Al-Jadir L., Parent C., and Spaccapietras S.: **Reasoning with large ontologies stored in relational databases: The OntoMind approach**. In: Data & Knowledge Engineering, Volume 69, Issue 11, Pages 1158-1180, November 2010.

[American Society of Photogrammetry, 1980] **American Society of Photogrammetry, Manual of Photogrammetry**, Fourth Édition, 1980.

[Andrews P. et al., 2012] Andrews P., Zaihrayeu I., and Pane J.: **A Classification of Semantic Annotation Systems**, Semantic Web, IOS Press Amsterdam, Vol.3, Issue 3, pp 223-248, August 2012.

[Arayici Y. et al., 2017] Arayici, Y., Counsell, J., Mahdjoubi, L., Nagy, G. A., Hawas, S., and Dweidar, K. (Eds.): **Heritage Building Information Modelling**. Routledge 2017.

[Arnold D., 2009] Arnold, D. **3D-COFORM: Tools and expertise for 3D collection formation**. In Proceedings of EVA (pp. 94-99), 2009.

[Artioli G., 2010] Artioli, G.: **Scientific methods and cultural heritage: an introduction to the application of materials science to archaeometry and conservation science**. Oxford University Press, 2010.

[Astrova I. et al., 2008] Astrova I., and Kalja A.: **Automatic transformation of SQL relational databases to OWL ontologies**. In: WEBIST, vol. 2, pp. 131–136 (2008).

[Bachimont B., 2000] Bachimont, B.: **Engagement sémantique et engagement ontologique: conception et réalisation d'ontologies en ingénierie des connaissances**. Ingénierie des connaissances: évolutions récentes et nouveaux défis, 305-323, 2000.

[Bagnéris M. et al., 2011] Bagnéris M., Dubois F., Martin A., and Mozul R.: **Potentialités des modèles numériques discrets pour le calcul des structures en pierre, Exemples d'application**, Séminaire invité, Atelier de la Pierre d'Angle, Brignoles, 14 juillet 2011.

[Bagnéris M. et al., 2014] Bagnéris M., Bromblet P., Cherblanc F., Cousin B., Dubois F., and Vallet J.-M. **Rapport de projet PNRCC « Rôle des contraintes hygro-mécaniques dans la dégradation des pierres calcaires, caractérisation expérimentale et modélisation**

numérique », Octobre 2012 – Octobre 2014.

[Bannour H. et al, 2011] Bannour H., and Hudelot C., **Towards Ontologies for Image Interpretation and Annotation**, IEEE, 2011.

[Bay H. et al, 2006] Bay H., Tuytelaars T., and Van Gool, L.: **SURF: Speeded Up Robust Feature**, In Computer Vision, ECCV 2006, pp. 404-417, Springer, 2006.

[Bayer B., 1976] US Patent, 3,971,065, https://www.google.com/patents/US3971065.

[Beck K., 2006] Beck K. : **Étude des propriétés hydriques et des mécanismes d'altération de pierres calcaires à forte porosité**. Minéralogie. Université d'Orléans, 2006. Français.

[Benard A., 2015] Benard A.: **Report Internship: Caromb church study, Documentary research and cartography analysis**, July 2015.

[Benavente D. et al., 2008] Benavente, D., Cultrone, G., and Gómez-Heras, M.: **The combined influence of mineralogical, hygric and thermal properties on the durability of porous building stones**. European Journal of Mineralogy, 20(4), 673-685, 2008.

[Berkmann J. et al., 1994] Berkmann J. and Caelli T.: **Computation of Surface Geometry and Segmentation Using Covariance Techniques**. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI), 16(11):1114–1116, November 1994.

[Bergmann R. et al., 2003] Bergmann R. and Schaaf M.,: **Structural Case-Based Reasoning and Ontology-Based Knowledge Management: A Perfect Match?** J. UCS, 9(7), 608-626, 2003.

[Berners-Lee T. et al, 2001] Berners-Lee T., Hendler J., and Lassila O.: **The semantic Web**, Scientific American, Vol. 284, No.5, pp34-43, 2001.

[Bernstein J. H., 2011] Bernstein, J. H.: **The data-information-knowledge-wisdom hierarchy and its antithesis**. NASKO, 2(1), 68-75, 2011.

[Berthonneau J. et al., 2012] Berthonneau J., Grauby O., Bromblet P., Vallet J. M., Dessandier D., and Baronnet A.: **Role of swelling clay minerals in the spalling decay mechanism of the « pierre du midi » limestone (South-East of France)**. 12th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone. New York, États-Unis, 22–26 October 2012.

[Berthonneau J., 2013] Berthonneau, J. : **Le rôle des minéraux argileux dans la dégradation de la pierre: application à la conservation de la" Pierre du Midi" en termes de durabilité et compatibilité des matériaux en œuvre** (Doctoral dissertation, Aix-Marseille Université), 2013.

[Berthonneau J. et al., 2016] Berthonneau J., Bromblet P., Cherblanc F., Ferrage E., Vallet J.M. and Grauby O.: **The spalling decay of building bioclastic limestones of Provence (South East of France): from clay minerals swelling to hydric dilation**, Journal of Cultural Heritage, 17, 53-60p, 2016.

[Bigas M. et al, 2006] Bigas M., Cabruja E., Forest J., and Salvi J.: **Review of CMOS image sensors, Microelectron**. J., 37(5), pp433-451, 2006.

[Blaise J. Y., 2003] Blaise J. Y. : **Le formalisme objet appliqué à l'étude de l'édifice patrimonial : Problèmes de modélisation et d'échanges de données sur le réseau Internet.** Thèse

de doctorat de l'Université d'Aix-Marseille III, Spécialité Automatique et Informatique, 2003.

[Blaško M. et al., 2012] Blaško M., Cacciotti P., Křemen P., and Kouba Z.: **Monument damage ontology**. In Progress in Cultural Heritage Preservation (pp. 221-230). Springer Berlin Heidelberg, 2012.

[Boehler W. et al., 2002a] Boehler W., and Marbs A.: **3D Scanning Instruments**. Proceedings of the CIPA WG 6 International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording. Corfou, 2002.

[Boehler W. et al., 2002b] Boehler W., Heinz G., Marbs A., and Siebold M.: **3D Scanning Softawre: an introduction**. Proceedings of hte CIPAWG 6 International CIPA WG Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording. Corfu, 2002.

[Boehler W. et al., 2003] Boehler W., Bordas V., and Marbs A.: **Investigating Laser Scanner Accuracy**. Proceedings of the International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIV, Part 5/C15, pp. 696-701, 2003.

[Bonn F. et al, 1992] Bonn F., and Rochon G.: **Précis de Télédétection, Volume 1 : Principes et méthodes**, AUPELF-UREF, coll. Presses Universitaires du Québec, Montréal, 1992.

[Boochs F. et al., 2011] Boochs, F., Marbs, A., Hmida, H. B., Truong, H., Karmachaiya, A., Cruz, C., and Voisin, Y.: **Integration of knowledge to support automatic object reconstruction from images and 3D data**. In Systems, Signals and Devices (SSD), 2011 8th International Multi-Conference on (pp. 1-13). IEEE, 2011.

[Boochs F. et al., 2014] Boochs, F., Trémeau, A., Murphy, O., Gerke, M., Lerma, J. L., Karmacharya, A., and Karaszewski, M.: **Towards a knowledge model bridging technologies and applications in cultural heritage documentation**. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2(5), 81, 2014.

[Boton C., 2013] Boton C.: **Conception de vues métiers dans les collecticiels orientés service. Vers des multi-vues adaptées pour la simulation collaborative 4D/nD de la construction** (Doctoral dissertation, Université de Lorraine), 2013.

[Bourigault D. et al., 2004] Bourigault, D., Aussenac-Gilles, N., and Charlet, J.: **Construction de ressources terminologiques ou ontologiques à partir de textes Un cadre unificateur pour trois études de cas**. Revue d'Intelligence Artificielle, 18(1), 87-110, 2004.

[Boust C. et al., 2007] Boust C., and Ezrati J.J.: **La mesure de la couleur appliquée à la restauration, à la présentation et à la diffusion des œuvres d'art**, Technè n°26, 2007.

[Brachman R. J. et al., 1992] Brachman, R. J., Levesque, H. J., and Reiter, R.: **Knowledge representation**. MIT press, 1992.

[Brague R., 1988] Brague, R.: **Aristote Et la Question du Monde Essai Sur le Contexte Cosmologique Et Anthropologique de L'Ontologie**, 1988.

[Bruder R. et al, 2007] Bruder R., Detalle V., and Coupry C.: **An example of the complementarity of laser-inducedbreakdown spectroscopy and Raman microscopy for wall painting pigments analysis**, Journal of raman spectroscopy, ISSN 0377-0486, vol. 38, p. 909-915, 2007.

[Busayarat C., 2010] Busayarat, C. : **La maquette numérique comme support pour la recherche visuelle d'informations patrimoniales: définition d'une approche pour la sémantisation de sources iconographiques par référencement spatial** (Doctoral dissertation, Arts et Métiers ParisTech), 2010.

[Bundler] http://www.cs.cornell.edu/~snavely/bundler/ (disponible au 16/07/2016).

[Cacciotti R. et al., 2013] Cacciotti R., Valach J., Kunes P., Cernansky M., Blasko M., and Kremen P.: **Monument damage information system (MONDIS): An ontological approach to cultural heritage documentation**. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume II-5/W1, 2013 XXIV International CIPA Symposium, Strasbourg, France, 2-6 September 2013.

[Cacciotti R. et al., 2014] Cacciotti, R., Valach, J., Kuneš, P., Čerňanský, M., Blaško, M., and Křemen, P.: **Introduction to an Ontology-Driven Documentation System of Damages to Cultural Heritage**. International Journal of Heritage in the Digital Era, 3(2), 255-270, 2014.

[Cacciotti R. et al., 2015a] Cacciotti R., Blaško M., and Valach J.: **A diagnostic ontological model for damages to historical constructions**. Journal of Cultural Heritage, 16(1), 40-48, 2015.

[Cacciotti R. et al., 2015b] Cacciotti R. and Valach J.: **The MONDIS project Semantic Web and the protection of historic buildings**. In 2015 Digital Heritage (Vol. 2, pp. 307-313). IEEE, September 2015.

[Calonder M. et al, 2010] Calonder M., Leptit V., Strecha C., and Fua P.: **BRIEF: Binary Robust Independent Elementary Features**, In Computer Vision, ECCV 2010, pp. 778-792, Springer, 2010.

[Camuffo D., 2013] Camuffo, D.: **Microclimate for cultural heritage: Conservation, restoration, and maintenance of indoor and outdoor monuments**. Elsevier, 2013.

[Cappellini V. et al., 2012] Cappellini V., Stefani C., Nony N., and De Luca L.: **Surveying masonry structures by semantically enriched 2.5 d textures: a new approach**. In Progress in Cultural Heritage Preservation (pp. 729-737). Springer Berlin Heidelberg, 2012.

[Carbonnel M., 1968] Carbonnell M.: **L'histoire et la situation présente des applications de la photogrammétrie a l'architecture. Etude sur la photogrammétrie appliquée aux monuments historiques**. Application of photogrammetry to historic monuments. ICOMOS, Saint-Mande, France, 4-6, VII, 1968.

[Charlet J., 2009] Charlet, J.: **L'ingénierie des connaissances, entre science de l'information et science de gestion**, HAL–CCSD, 2009.

[Charola A. E. et al., 2007] Charola, A. E., Pühringer, J., and Steiger, M.: **Gypsum: a review of its role in the deterioration of building materials**. Environmental geology, 52(2), 339-352, 2007.

[Cherblanc F. et al., 2016] Cherblanc, F., Berthonneau, J., Bromblet P., Hughes, J., and Howind, T.: **Role of hydro-mechanical coupling in damage process of limestones used in historical buildings**, (Eds.). Science and Art: A Future for Stone: Proceedings of the 13th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone, Volume 1.

Paisley: University of the West of Scotland. p.1271-1278, 2016.

[Ciblac T. et al., 2009] Ciblac T., Oikonomopoulou A., and Guéna F.: **Modeling Tools for the Mechanical Behavior of Historic Masonry Structures**, In Proceedings of the Third International Congress on Construction History, Cottbus, 05/2009.

[C2RMF, 2017] http://c2rmf.fr/analyser/un-laboratoire-de-haute-technologie/imagerie/imagerie-en-ultraviolet-et-infrarouge-detecter (disponible au 18/04/2017).

[CNTRL, 2016] http://www.cnrtl.fr/ (disponible au 27/07/2016).

[Codd E. F., 1982] Codd E. F.: **Relational database: a practical foundation for productivity**. Communications of the ACM, 25(2), 109-117, 1982.

[Courouble F., 2016] Courouble F. : **Vers une interaction et visualisation de données XML en Graphe : cas d'une ontologie de domaine** (Rapport de stage en entreprise), 2016.

[Cruz C. et al., 2007] Cruz C., Marzani F. and Boochs F.: **Ontology-driven 3D reconstruction of architectural objects.** Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP). Pages 47-54. 2007.

[Daston L., 2008] Daston, L.: **On scientific observation**. Isis, 99(1), 97-110, 2008.

[Debevec P. et al., 1996] Debevec P., Taylor C., and Malik J.: **Modeling and rendering architecture from photographs: a hybrid geometry and image-based approach**. Proc. of SIGGRAPH, New Orleans, LA, pp 11–20, August 1996.

[De Luca L., 2006] De Luca L.: **Relevé et multi-représentations du patrimoine architectural : Définition d'une approche hybride de reconstruction d'édifices**. Thèse de l'école doctorale Arts et Métiers ParisTech, Aix-en-Provence, Mars 2006.

[De Luca L. et al., 2007] De Luca L., Véron P. and Florenzano, M.: **A generic formalism for the semantic modeling and representation of architectural elements**. The Visual Computer, 23(3), 181-205, 2007.

[De Luca L., 2009] De Luca L.: **La photomodélisation architecturale. Relevé, modélisation et représentation d'édifices à partir de photographies**, Eyrolles, 2009.

[De Luca L. et al., 2011] De Luca L., Busayarat, C., Stefani, C., VéRon, P., and Florenzano, M.: **A semantic-based platform for the digital analysis of architectural heritage**. Computers & Graphics, 35(2), 227-241, 2011.

[De Luca L., 2014] De Luca L.: **Methods, formalisms and tools for the semantic-based surveying and representation of architectural heritage**. Applied Geomatics, 6(2), 115-139, 2014.

[De Luca L. et al., 2014] De Luca L., Bagneris M., Chevrier C., Ciblac T., Vallet J.-M., Bromblet P., Pierrot-Desseilligny M., Brunetaud X., Al Mukhtar M., Dubois F., Cherblanc F. and Jourdan R.: MONUMENTUM: **Digital modelling and data management for the conservation of masonry structures**. ICOMOS General Assembly, Florence, 10-15/11/2014.

[Del Pozo S. et al., 2016] Del Pozo, S., Herrero-Pascual, J., Felipe-García, B., Hernández-López, D., Rodríguez-Gonzálvez, P., and González-Aguilera, D.: **Multispectral Radiometric Analysis of Façades to Detect Pathologies from Active and Passive Remote Sensing**. Remote Sensing, 8(1), 80, 2016.

[Derpanis K. G., 2010] Derpanis, K. G.: **Overview of the RANSAC Algorithm**. Image Rochester NY, 4(1), 2-3, 2010.

[Docker, 2016] https://www.docker.com/ (disponible au 04/08/2016).

[Doerr M., 2003] Doerr, M.: **The CIDOC conceptual reference module: an ontological approach to semantic interoperability of metadata**. AI magazine, 24(3), 75, 2003.

[Doerr M., 2005] Doerr M.: **The CIDOC CRM, an Ontological Approach to Schema Heterogeneity**. In: Proceedings of Semantic Interoperability and Integration, 2005.

[Doerr M., 2009] Doerr M.: **Ontology for Cultural Heritage**. Handbook on Ontologies, pp. 463-486. Springer, Heidelberg, 2009.

[Doerr M. et al., 2010] Doerr, M., Tzompanaki, K., Theodoridou, M., Georgis, C., Axaridou, A., and Havemann, S.: **A Repository for 3D Model Production and Interpretation in Culture and Beyond**. In VAST (Vol. 2010, p. 11th) September 2010.

[Dubois F., 2011] Dubois, F.: **Numerical modeling of granular media made of polyhedral particles. Discrete-element modeling of granular materials**, 233-262, 2011.

[Dubois F. et al., 2011] Dubois, F., Jean, M., Renouf, M., Mozul, R., Martin, A., and Bagneris, M.: **LMGC90**. In 10e colloque national en calcul des structures, Mai 2011.

[Dudek.I et al., 2015] Dudek I., Blaise J.Y., De Luca L., Bergerot L., Renaudin N.: **How Was This Done? An Attempt at Formalising and Memorising a Digital Asset's Making-of**. Proceedings of 2nd International Congress on Digital Heritage 2015, Vol. 2, Short Papers, Assessment of Methodologies and Tools in DH, IEEE Computer Society, 2015, ISBN: 978-1-5090-0047-0, Paper ID 237, 2015.

[Duguet F. et al., 2004a] Duguet F. and Drettakis G.: **Flexible point-based rendering on mobile devices**. IEEE Computer Graphics and Applications, 24(4), July-August 2004.

[Duguet F. et al, 2004b] Duguet, F., and Girardeau-Montaut, D.: **Rendu en portion de ciel visible de gros nuages de points 3d**. In Actes des journees de l'AFIG (p. 11), November 2004.

[Dumez H., 2011] Dumez, H.: **Qu'est-ce qu'un concept ?**. AEGIS Le Libellio, 7(1, Printemps-Supplément), 67-79, 2011.

[Elias M. et al., 2008] Elias M., and Cotte P.: **Multispectral camera and radiative transfer equation used to depict Leonardo's sfumato in Mona Lisa**, Applied Optics, Optical Society of America, , 47 (12), pp.2146-2154, 2008.

[Eliseo M. A. et al., 2011] Eliseo M. A., Parente de Oliveira J. M. and Matiello Pellegrin S. R.: **Domain Ontology with Temporal Descriptions for Architectural Buildings as a Support for Learning History of Architecture**. IEEE Multidisciplinary Engineering Education Magazine. Volume 6. Numéro 2. Pages 24-31. 2011.

[Fitzner B., 2002] Fitzner, B. (2002, May). **Damage diagnosis on stone monuments-in situ investigation and laboratory studies**. In Proceedings of the International Symposium of the Conservation of the Bangudae Petroglyph (Vol. 7, pp. 29-71), May 2002.

[Fitzner B. et al., 2002] Fitzner, B., Heinrichs, K., and La Bouchardiere, D.: **Damage index for stone monuments**, 2002.

[Fitzner B., 2004] Fitzner, B.: **Documentation and evaluation of stone damage on monuments**. In Proceedings of the 10th international congress on deterioration and conservation of stone, Stockholm, Sweden (pp. 677-690), June 2004.

[Flusser J., 2002] Flusser J.: **On the Inverse Problem of Rotation Moment Invariants, Pattern Recognition**, 35(12), pp. 3015-3017, 2002.

[Fontaine M., 2013] Fontaine M.: **Argumentation et engagement ontologique de l'acte intentionnel: Pour une réflexion critique sur l'identité dans les logiques intentionnelles explicites** (Doctoral dissertation, Université Charles de Gaulle-Lille III), 2013.

[Förstner W., 1994] Förstner W.: **A Framework for Low Level Feature Extraction**, In Computer Vision, ECCV 1994, pp.383-394, Springer, 1994.

[Gaillard J. C. et al., 2013] Gaillard, J. C., and Mercer, J.: **From knowledge to action Bridging gaps in disaster risk reduction**. Progress in human geography, 37(1), 93-114, 2013.

[Gangemi A., 2009] Gangemi A., and Presutti V.: **Ontology design patterns**. In Handbook on ontologies (pp. 221-243). Springer Berlin Heidelberg, 2009.

[Gardoni M., 1999] Gardoni, M. : **Maîtrise de l'information non structurée et capitalisation de savoir et savoir-faire en Ingénierie Intégrée**. Cas d'étude Aérospatiale. European PHD thesis INP Grenoble, 1999.

[Gephi, 2016] https://gephi.org/ (Disponible au 04/05/2017).

[Ghrab A. et al.2016] Ghrab, A., Romero, O., Skhiri, S., Vaisman, A., and Zimányi, E.: **GRAD: On Graph Database Modeling**. arXiv preprint arXiv:1602.00503. ISO 690, 2016.

[Gómez-Pérez A., et al., 2002] Gómez-Pérez, A., and Corcho, O.: **Ontology languages for the semantic web**. IEEE Intelligent systems, 17(1), 54-60, 2002.

[GraphDB, 2016] http://graphdb.ontotext.com/ (disponible au 05/08/2016).

[Gruber T. R., 1993] Gruber T. R.: **Toward Principles for the Design of Ontologies Used for Knowledge Sharing**. International Journal Human-Computer Studies 43, p.907-928, 23 August 1993.

[Grussenmeyer P. et al, 2001] Grussenmeyer P., Hanke K., and Streilein A.: **Photogrammétrie architecturale**. Chapitre du livre, Photogrammétrie numérique. Éditions Lavoisier-Hermès, 2001.

[Guarino N., 1997] Guarino N.: **Understanding, building and using ontologies**. International Journal of Human-Computer Studies, 46(2-3):293–310, 1997.

[Guarino N., 1998] Guarino, N.: **Formal ontology and information systems**. In Proceedings of FOIS (Vol. 98, No. 1998, pp. 81-97) June 1998.

[Guarino N., 2002] Guarino N., and Welty C.: **Evaluating ontological decisions with OntoClean**. Communications of the ACM, 45(2), 61-65, 2002.

[Halaschek-Wiener C. et al., 2005] Halaschek-Wiener C., Jennifer G., Andrew S., Michael G., Bijan P., and Jim H.: **PhotoStuff -- An Image Annotation Tool for the Semantic** Web, 2005.

[Haralick R.M. et al, 1991] Haralick R.M., Shapiro L.G., **Computer and Robot Vision**, Addison-

Wesley Longman Publishing CO., Inc., 1991.

[Haugen B. D., 2016] Haugen, B. D.: **Qualitative and quantitative comparative analyses of 3D lidar landslide displacement field measurements** (Doctoral dissertation, Colorado School of Mines. Arthur Lakes Library) 2016.

[Hershey J. et al., 2008] Hershey, J., and Zhang, Z.: **Multispectral digital camera employing both visible light and non-visible light sensing on a single image sensor**, U.S. Patent No. 7,460,160. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office 2008.

[Hernandez N., 2005] Hernandez, N.: **Ontologies de domaine pour la modélisation du contexte en recherche d'information** (Doctoral dissertation, Université Paul Sabatier) 2005.

[Hmida H. B. et al., 2013] Hmida, H. B., Cruz, C., Boochs, F., and Nicolle, C.: **From 3D Point Clouds To Semantic Objects An Ontology-Based Detection Approach**. arXiv preprint arXiv:1301.4783, 2013.

[Hois J. et al., 2009] Hois J., Bhatt M. and Kutz O.: **Modular Ontologies for Architectural Design**. Proceedings of the 4th workshop Formal Ontologies Meet Industry (FOMI'2009) in association with the 10th European Conference on Knowledge. IOS Press - Frontiers in Artificial Intelligence and Applications. Volume 198. Pages 66-77. 2009.

[Holsapple C. W. et al., 2002] Holsapple C. W. and Joshi K. D.: **A collaborative approach to ontology design**. Communications of the ACM, 45(2), 42-47, 2002.

[Horridge M. et al., 2004] Horridge, M., Knublauch, H., Rector, A., Stevens, R., and Wroe, C.: **A Practical Guide To Building OWL Ontologies Using The Protégé-OWL Plugin and CO-ODE Tools**, Edition 1.0. University of Manchester, 2004.

[Hu M.K., 1962] Hu M.K.: **Visual Pattern Recognition by Moment Invariants**, Information Theory, IRE Transactions on, 8(2), pp. 179-187, 1962.

[Hu Y., 2011] Hu Y: **Algorithm for visualizing large networks**. Combinatorial Scientific Computing, 5(3), 180-186, 2011.

[Hyvönen E. et al., 2009] Hyvönen, E., Mäkelä, E., Alm, O., Kurki, J., Ruotsalo, T., Takala, J. and Palonen, T.: **Culturesampo–finnish cultural heritage collections on the semantic web 2.0**. In In Proceedings of the 1st International Symposium on Digital humanities for Japanese Arts and Cultures (DH-JAC-2009), Ritsumeikan, March 2009.

[Hyvönen E., 2012] Hyvönen E.: **Publishing and Using Cultural Heritage Linked Data on the Semantic Web**, Synthesis Lectures on the Semantic Web: Theory and Technology, Morgan & Claypool, pp.1-119, 2012.

[InfiniteGraph, 2016] http://www.objectivity.com/products/infinitegraph/ (disponible au 26/07/2016)

[Inkscape] https://inkscape.org/fr/ (disponible 16/07/2016).

[Janesick J.R., 2001] Janesick J.R.: **Scientific Charge-Coupled Devices**, SPIE Press,Bellingham, WA., Vol. PM83, pp1-920, 2001.

[Jacquot K. et al., 2015] Jacquot, K., Messaoudi, T., and De Luca L.: **Knowledge-based Approach for the 3D Modeling of Masonry Structures**. In Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage), 2015.

[Janvier-Badosa S., 2012] Janvier S.: Le carnet de santé d'un monument: **Application au château de Chambord** (Doctoral dissertation, Université d'Orléans) 2012.

[Janvier-Badosa S. et al., 2014] Janvier-Badosa, S., Beck, K., Brunetaud, X., and Al-Mukhtar, M.: **The occurrence of gypsum in the scaling of stones at the Castle of Chambord** (France). Environmental earth sciences, 71(11), 4751-4759, 2014.

[Janvier-Badosa S. et al., 2015] Janvier-Badosa S., Beck K., Brunetaud X., Guirimand-Dufour A. and Al-Mukhtar M.: **Gypsum and spalling decay mechanism of tuffeau limestone**. Environmental Earth Sciences, Volume 74, Issue 3, pp 2209-2221, August 2015.

[Janvier-Badosa S. et al., 2016] Janvier-Badosa, S., Beck, K., Brunetaud, X., and Al-Mukhtar, M. (). **The SACRE Project: A Diagnosis Tool of Built Heritage**. In Euro-Mediterranean Conference (pp. 681-690). Springer International Publishing, October 2016.

[Jones S. et al., 2013] Jones, S., and Yarrow, T.: **Crafting authenticity: An ethnography of conservation practice**. Journal of Material Culture, 18(1), 3-26, 2013.

[jOWL, 2016] http://ontologyonline.org/ (disponible au 05/08/2016).

[Kakali C. et al., 2007] Kakali C., Lourdi I., Stasinopoulou T., Bountouri L., Papatheodorou C., Doerr M., and Gergatsoulis M.: **Integrating dublin core metadata for cultural heritage collections using ontologies**, in International Conference on Dublin Core and Metadata Applications, pp. pp–128, 2007.

[Kasabov N., 2001] Kasabov, N.: **Evolving fuzzy neural networks for supervised/unsupervised online knowledge-based learning**. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics), 31(6), 902-918, 2001.

[Kazhdan M. et al, 2003] Kazhdan M., Funkhouser T., and Rusinkiewics S.: **Rotation Invariant Spherical Harmonic Representation of 3D Shape Descriptors**, In Symposium on Geometry Processing, Vol. 6, pp. 156-164, 2003.

[Klasing K. et al., 2009] Klasing K., Althoff D., Wollherr D., and Buss M.: **Comparison of Surface Normal Estimation Methods for Range Sensing Applications**. In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Kobe, Japan, May 12-17 2009.

[Knopp J. et al, 2010] Knopp J., Prasad M. Willems G., Timofte R., and Van Gool L.: **Hough Transform and 3D Robust Three Dimensional Classification**, In Computer Vision, ECCV 2010, pp. 589-602, Springer, 2010.

[Kolodner J., 2014] Kolodner J.: **Case-based reasoning**. Morgan Kaufmann, 2014.

[Köser K. et al., 2008] Köser, K., & Koch, R.: **Differential spatial resection-pose estimation using a single local image feature**. Computer Vision–ECCV 2008, 312-325, 2008.

[Koutsoudis A. et al., 2014] Koutsoudis, A., Vidmar, B., Ioannakis, G., Arnaoutoglou, F., Pavlidis, G., and Chamzas, C.: **Multi-image 3D reconstruction data evaluation**. Journal of Cultural Heritage, 15(1), 73-79, 2014.

[Kraus K. et al, 1997] Kraus K., and Waldhaul P.: **Manuel de photogrammétrie : principes et procédés fondamentaux**. Hermes, 1997.

[Lanh T.V. et al, 2007] Lanh T.V., Chong K.S., Emmanuel S., and Kankanhalli S.: **A Survey on Digital**

Camera Image Forensic Methods, Proc. IEEE, Int. Conf. Multimedia Expo, pp. 16-19, 2007.

[LAROUSSE, 2017] http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais (disponible au 03/05/2017).

[Lassila O. et al., 1999] Lassila O., and Swick R. R.: **Resource description framework (rdf) model and syntax specification w3c recommendation**. Recommendation 22. February 1999. http://www.w3.org/TR/1999/REC-rdf-syntax-19990222/, 1999.

[Leoni C. et al., 2013] Leoni C., Callieri M., Dellepiane M. Rosselli Del Turco R. and O'Donnell D.: **The Dream and the Cross: bringing 3D content in a digital edition**, Digital Heritage 2013 International Conference, page 281-288 - October 2013.

[Leutenegger S. et al, 2011] Leutenegger S., Chli M., and Siegwart R.Y.: **BRISK: Bianry Robust Invariant Scalable Keypoints**, In Computer Vision, ICCV 2011, 2011 IEEE International Conference on pp. 2548-2555, 2011.

[Li Y., 1992] Li Y.: **Reforming the Theory of Invariants Moments for Pattern Recognition**. Pattern Recognition, 25(7), pp. 723-730, 1992.

[Liu Y. et al., 2007] Liu Y., Zhang D., Lu G., and Ma W.-Y.: **A survey of contentbased image retrieval with high-level semantics**. Pattern Recognition, 40(1):262 – 282, 2007.

[Liew A., 2013] Liew A.: **DIKW: Data, information, knowledge, intelligence, wisdom and their interrelationships**. Business Management Dynamics, 2(10), 49-62, 2013.

[Lisin, D. A. et al., 2005] Lisin, D. A., Mattar, M. A., Blaschko, M. B., Learned-Miller, E. G., and Benfield, M. C.: **Combining local and global image features for object class recognition**. In Computer vision and pattern recognition, cvpr workshop. IEEE computer society conference on (p. 47), 2005.

[Lobovikov-Katz A. et al., 2016] Lobovikov-Katz, A., Benito, G. B., Sánchez, V. M., Martins, J., and Sojref, D.: **Training Schools for Conservation of Cultural Heritage: Between Expertise, Management and Education**. In Euro-Mediterranean Conference (pp. 880-890). Springer International Publishing, October 2016.

[Lohmann S. et al., 2014] Lohmann, S., Negru, S., Haag, F., and Ertl, T.: **VOWL 2: user-oriented visualization of ontologies**. In International Conference on Knowledge Engineering and Knowledge Management (pp. 266-281). Springer International Publishing, November 2014.

[Lowe D. G., 1999] Lowe D.G.: **Object recognition from local scale-invariant features**, Proceedings of the International Conference on Computer Vision, 1999.

[Luyen L. N., et al., 2016] Luyen, L. N., Tireau, A., Venkatesan, A., Neveu, P., and Larmande, P.: **Development of a knowledge system for Big Data: Case study to plant phenotyping data**. In WIMS (p. 27), 2016.

[Maître H., 1995] Maître, H.: **Image numérique, traitement numérique des images et œuvres d'art**. Techne, 2, 1995, 191-196, 1995.

[Manuel A., 2016] Manuel A.: **Annotation sémantique 2D/3D d'images spatialisées pour la documentation et l'analyse d'objets patrimoniaux** (Doctoral dissertation, Sciences des Métiers de l'ingénieur, ENSAM), 2016.

[Manuel A. et al., 2013a] Manuel, A., Gattet, E., De Luca, L., and Veron, P.: **An approach for precise 2D/3D semantic annotation of spatially-oriented images for in situ visualization applications**. In Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage), 2013 (Vol. 1, pp. 289-296). IEEE, October 2013.

[Manuel A. et al., 2013b] Manuel A., Stefani C., De Luca L., and Véron P.: **2D/3D Semantic Annotation Towards a Set of Spatially-Oriented Photographs**. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2013.

[Manuel A. et al., 2013c] Manuel, A., Stefani, C., DE LUCA, L., and Veron, P.: **Distribution of semantic annotations towards a set of spatially-oriented photographs**. Proceedings of the 3D-ARCH International Conference, 2013.

[Manuel A. et al., 2014] Manuel A., De Luca L., and Véron P.: **A Hybrid Approach for the Semantic Annotation of Spatially Oriented Images**. International Journal of Heritage in the Digital Era, 3(2), 305-320, 2014.

[Marchetti A. et al., 2008] Marchetti, A., Ronzano, F., Tesconi, M., and Minutoli, M.: **Formalizing Knowledge by Ontologies: OWL and KIF**. Relatório apresentado L'Istituto di Informatica e Telematica (IIT). Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR). Italia, 2008.

[Marbs A. et al., 2001] Marbs A., Heinz G., Boehler W.: **The potential of non-contact close range laser scanners for cultural heritage recording**. Proceedings of CIPA International Symposium. Potsdam, Germany, 2001.

[Martin-Beaumont N. et al, 2012] Martin-Beaumont N., Nony N., Deshayes B., Pierrot- Deseilligny M., and De Luca L.: **Photographer-Friendly Work- Flows for Image-Based Modelling of Heritage Artefacts**, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL- 5/W2, 2013 XXIV International CIPA Symposium, 2 – 6 September 2013, Strasbourg, France.

[MCC, 2015] http://www.culturecommunication.gouv.fr/ (disponible au 23/07/2016).

[Meneely J. et al., 2009] Meneely J., Smith B. J., Curran J., and Ruffell A.: **Developing a 'non-destructive scientific toolkit to monitor monuments and sites**, in ICOMOS Scientific Symposium, 2009.

[Messaoudi T. et al, 2014] Messaoudi T., Manuel A., Gattet E., and De Luca L.: **Laying the foundations for an information system dedicated to heritage building degradation monitoring based on the 2D/3D semantic annotation of photographs**. Eurographics, 2014.

[Minker J., 2014] Minker, J. (Ed.): **Foundations of deductive databases and logic programming**. Morgan Kaufmann, 2014.

[Mongin P., 2002] Mongin, P.: **Modèles d'Information et Théorie de la Connaissance**. Course Notes, Ecole Polytechnique, 2002.

[Moravec H.P., 1977] Moravec H.P.: **Towards Automatic Visual Obstacle Avoidance**, In Artificial Intelligence (IJCAI), 5th International Joint Conference on p. 584, 1977.

[Navigli R. et al., 2008] Navigli R., and Velardi P**.: From Glossaries to Ontologies: Extracting Semantic Structure from Textual Definitions**, Series information for Frontiers in Artificial Intelligence and Applications, IOS Press, pp. 71-87, 2008.

[Neo4j, 2016] https://neo4j.com/ (disponible au 26/07/2016).

[Nespeca R. et al., 2016] R. Nespeca, and L. De Luca: **Analysis, Thematic Maps and Data Mining From Point Cloud to Ontology for Software Development**, ISPRS, 2016.

[Niang, C. A. T., 2013] Niang, C. A. T.: **Vers plus d'automatisation dans la construction de systèmes médiateurs pour le web sémantique: une application des logiques de description** (Doctoral dissertation, Tours), 2013.

[Niang C. et al., 2015] Niang, C., Leboucher, E., Bouiller, L., Capderou, C., and Marinica, C.: **An Ontological Model for Conservation-restoration of Cultural Objects**, Digital Heritage International Congress (Digital Heritage), Sep 29-Oct 2, Granada, Spain, 2015.

[NIK, B., 2005] NIK, B.: Intensity Transformations and Spatial Filtering, 2005.

[NISO, 2005] National Information Standards Organization (US). Guidelines for the construction, format, and management of monolingual controlled vocabularies. NISO Press (2005).

[Nonaka I., 2002] Nonaka, I.: **A dynamic theory of organizational knowledge creation**. The strategic management of intellectual capital and organizational knowledge, 437-462, 2002.

[Nonaka I., 2008] Nonaka, I.: **The knowledge-creating company.** Harvard Business Review Press, 2008.

[NUBES, 2017] http://www.map.archi.fr/?portfolio_page=pavage-3-3-22-2-2 (disponible au 08/03/2017).

[Oikonomopoulou A., 2009] Oikonomopoulou A.: **Approches numériques pour l'étude du comportement des structures maçonnées anciennes**, Thèse de doctorat de l'université Paris Est et de l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Paris la Villette, Paris 12/2009.

[Osada R. et al., 2002] Osada, R., Funkhouser, T., Chazelle, B., and Dobkin, D.: **Shape distributions**. ACM Transactions on Graphics (TOG), 21(4), 807-832, 2002.

[Palaia L. et al., 2008] Palaia, L., Sánchez, R., López, V., Gil, L., Monfort, J., Tormo, S., and Álvarez, M. A.: **Procedure for NDT and traditional methods of ancient building diagnosis by using thermograph, digital images and other instruments data analysis**. In 17th World Conference on Nondestructive Testing, Shangai, China (pp. 25-28), October 2008.

[Pamart A. et al., 2015] Pamart A., Lo Bulgio D., and De Luca L.: **Morphological Analysis of Shape Semantics from Curvature-Based Signature**, Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage), Sep 29-Oct 2, Granada, Spain, 2015.

[Pamart A. et al., 2016] Pamart, A., Guillon, O., Vallet, J. M., and Luca, L. D.: **Toward a Multimodal Photogrammetric Acquisition and Processing Methodology for Monitoring Conservation and Restoration Studies**, 2016.

[ParaViewWeb, 2016] http://www.paraview.org/web/ (disponible au 14/10/2016).

[Perales, F. et al, 2005] Perales, F., Monerie, Y., Dubois, F., and Stainier, L.: **Simulation numérique de la rupture dynamique des matériaux hétérogenes**. In septieme colloque national en Calcul des structures, Vol. 2, pp. 463-8, 2005.

[Pérouse de Montclos J. M., 2004] Pérouse de Montclos J. M.: **Architecture : méthode et vocabulaire**,

Monum, éditions du patrimoine, 2004.

[Peteler F. et al., 2015] Peteler F., Gattet E., Bromblet P., Guillon O., Vallet J.M., and De Luca L.,: **Analyzing the Evolution of Deterioration Pattern : A First Step of an Image-Based Approach for Comparing Multitemporal Data Sets**, Digital Heritage International Congress (Digital Heritage), Sep 29-Oct 2, Granada, Spain, 2015.

[Petridis K. et al., 2006] Petridis K., Anastasopoulos D., Saathoff C., Timmermann N., Kompatsiaris I., and Staab S.: **M-OntoMat-Annotizer: Image annotation linking ontologies and multimedia low-level features**. In: KES 2006 10th Intnl. conf. on knowledge based, intelligent information and engineering systems, 2006.

[PhotoScan] http://www.agisoft.com/ (disponible au 16/07/2016).

[Pierra G. et al., 2005] Pierra G., Dehainsala H., Ait-Ameur Y., Bellatreche L., Chochon J., and Mimoune M. : **Bases de données à base ontologique. Principe et mise en œuvre**. Ingénierie des Systémes d'Information (ISI'05), 10(2):91–115, 2005.

[Pierrot-Deseilligny M. et al., 2011a] Pierrot-Deseilligny M., De Luca L., and Remondino F.: **Automated image-based procedures for accurate artifacts 3D modeling and orthopictures generation**, Geoinformatics FCE CTU Journal, Vol.6, pp. 291-299, Prague, Czech Republic, 2011.

[Pierrot-Desseiligny M. et al., 2011b] Pierrot-Deseilligny M., Clery I.: **APERO, an open source bundle adjustment software for automatic calibration and orientation of set of images**, 2011.

[Pinna D et al., 2009] Pinna, D., Galeotti, M., and Mazzeo, R.: **Scientific examination for the investigation of paintings: a handbook for conservator-restorers**. Centro Di, 2009.

[Pollyea R. M. et al., 2011] Pollyea, R. M., and Fairley, J. P.: **Estimating surface roughness of terrestrial laser scan data using orthogonal distance regression**. Geology, 39(7), 623-626, 2011.

[Přikryl R. et al., 2007] Přikryl, R., and Smith, B. J.: **Building stone decay: from diagnosis to conservation**. Geological Society of London, 2007.

[Protégé, 2017] http://protege.stanford.edu/ (Disponible au 04/05/2017).

[Ramakrishnan R. et al., 2000] Ramakrishnan, R., and Gehrke, J.: **Database management systems**. McGraw-Hill, 2000.

[Ramanath R. et al, 2005] Ramanath R., Snyder W.E., Yoo Y., and Drew M.S.: **Color Image Processing Pipeline**, IEEE Singal Processing Magazine, 22(1),v pp34-43, 2005.

[Remondino F. et al, 2006] Remondino F., and El-Hakim S.: **Image-based 3D Modelling: a Review, The Photogrammetric Record**, 21(115), pp269-291, 2006.

[Remondino F. et al., 2012] Remondino, F., Del Pizzo, S., Kersten, T.P., and Troisi, S.: **Low-cost and open-source solutions for automated image orientation – A critical overview**. Proc. EuroMed 2012 Conference, M. Ioannides et al. (Eds.), LNCS 7616, Springer, Heidelberg, pp. 40-54, 2012.

[Richards R. J. et al., 2016] Richards, R. J., and Daston, L.: **Kuhn's Structure of Scientific Revolutions at Fifty: Reflections on a Science Classic**. University of Chicago Press, 2016.

[Rodriguez-Muro M. et al., 2013] Rodriguez-Muro M., Kontchakov R., and Zakharyaschev M.: **Ontology-based data access: Ontop of databases**. In The Semantic Web–ISWC 2013 (pp. 558-573). Springer Berlin Heidelberg, 2013.

[Rosten E. et al, 2006] Rosten E., and Drummond T.: **Machine Learning for High-Speed Corner Detection**, In Computer Vision, ECCV 2006, pp. 430-443, Springer, 2006.

[Rusu R.B., 2009] Rusu R.B.: **Semantic 3D Object Map for Everyday Manipulation in Human Living Environments**, Technische University at Munchen, PhD Thesis, 2009.

[SACRE, 2017] http://www.map.archi.fr/?portfolio_page=pavage-3-3-21-2-2 (disponible au 08/03.2017)

[Saheb M.et al., 2015] Saheb M., Mertz J. D., Colas E., Rozenbaum O., Chabas A., Michelin A., and Sizun J. P.: **Multiscale characterization of limestone used on monuments of cultural heritage**. In MRS Proceedings (Vol. 1656, pp. mrsf13-1656). Cambridge University Press, 2015.

[Salonia P. et al., 2003] Salonia P. and Negri A.: **Historical buildings and their decay: data recording, analysing and transferring in an ITC environment**, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. 34, 2003.

[Samuel K. T., 1972] Samuel, K. T. : **La structure des révolutions scientifiques**. Traduction. Française, Paris: Flammarion, 1972.

[Saupe D. et al, 2001] Saupe D., and Vranic D.V.: **3D Model Retrieval with Spherical Harmonics and Moments**, Springer, 2001.

[Schmid C. et al, 2000] Schmid C., Mohr R., and Bauckhage C.: **Evaluation of Interest Point Detectors**, International Journal of Computer Vision, 37(2), pp. 151- 172, 2000.

[Schumaker R. P., 2014] Schumaker R. P.: **From Data to Wisdom: The Progression of Computational Learning in Text Mining**. Communications of the IIMA, 11(1), 2014.

[Shakarji C., 1998] Shakarji C.: **Least-Squares Fitting Algorithms of the NIST Algorithm Testing System**. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 103(6):633–641, November-December 1998.

[Sicilia M.A., 2006] Sicilia M.A.: **Metadata, semantics and ontology: providing meaning to information resources**, International Journal of Metadata, Semantics and Ontologies, Vol.1, No1, 2006.

[Sielski K. et al., 2013] Sielski, K., Walkowska, J., and Werla, M.: **Methodology for Dynamic Extraction of Highly Relevant Information Describing Particular Object from Semantic Web Knowledge Base**. In International Conference on Theory and Practice of Digital Libraries (pp. 260-271). Springer Berlin Heidelberg, September 2013.

[Slimani T., 2013] Slimani T.: **Semantic Annotation: The Mainstream of Semantic Web**, International Journal of Computer Applications Technology and Research, Vol.2, Issue 6, pp 763-770, 2013.

[Smith S.M. et al, 1997] Smith S.M., and Brady J.M.: **SUSAN: a New Approach to Low Level Image Processing**, International Journal of Computer Vision, 23(1), pp. 45-78, 1997.

[Snavely N. et al., 2006] Snavely N., Seitz S., and Szeliski R.: **Photo Tourism: Exploring PhotoCollections in 3D**, 2006.

[Sowa J.F., 1984] Sowa, J. F.: **Conceptual structures: information processing in mind and machine**, 1984.

[Srivastava V., 2011] Srivastava V.: **Methods to visualize ontology,** to obtain the degree Bachelor of Science in Information Management Koblenz, 14th July 2011.

[Staab S. et al., 2013] Staab, S., and Studer, R. (Eds.): **Handbook on ontologies**. Springer Science & Business Media, 2013.

[Stefani C., 2010] Stefani, C.: **Maquettes numériques spatio-temporelles d'édifices patrimoniaux. Modélisation de la dimension temporelle et multi-restitutions d'édifices** (Doctoral dissertation, Arts et Métiers ParisTech), 2010.

[Stefani C. et al., 2012] Stefani, C., Brunetaud, X., Janvier-Badosa, S., Beck, K., De Luca, L., and Al-Mukhtar, M.: **3D information system for the digital documentation and the monitoring of stone alteration.** In Euro-Mediterranean Conference (pp. 330-339). Springer Berlin Heidelberg, October 2012.

[Stefani C. et al., 2014] Stefani, C., Brunetaud, X., Janvier-Badosa, S., Beck, K., De Luca, L., and Al-Mukhtar, M.: **Developing a toolkit for mapping and displaying stone alteration on a web-based documentation platform**. Journal of Cultural Heritage, 15(1), 1-9, 2014.

[Studer R. et al., 1998] Studer R., Benjamins R., and Fensel D.: **Knowledge Engineering: Principles and Methods**, Data & Knowledge Engineering, 25(1-2), pp 161-198, 1998.

[Sturm P. et al, 2011] Sturm P., Ramalingam S., Tardif J.P., Gasparini S., and Barreto J.: **Camera Models and Fundamental Concepts Used in Geometric Computer Vision**. Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision, 6(1-2), pp.1-183, 2011.

[Teague M.R., 1980] Teague M.R.: **Image Analysis vie the General Theory of Moments**, JOSA, 70(8), pp. 920-930, 1980.

[TemaTres, 2016] http://www.vocabularyserver.com/ (disponible au 05/08/2016)

[Tola E. et al, 2010] Tola E. Lepetit V., and Fua P.: **DAISY: An Efficient Dense Descriptor Applied to Wide-Baseline Stereo, Pattern Analysis and Machine Intelligence**, IEEE Transactions on 32(5), pp. 815-830, 2010.

[Trzcinski T. et al, 2012] Trzcinski T., and Lepetit V.: **Efficient Discriminative Projections for Compact Binary Descriptors**, In Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2012, 2012 IEEE Conference on pp. 228-242, 2012.

[Trzcinski T. et al, 2013] Trzcinski T., Christoudias M., Fua P., and Lepetit V.: **Boosting Binary Keypoints Descriptors**, In Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2013, 2013 IEEE Conference on pp. 2874-2881, 2013.

[Tuytelaars T. et al., 2008] Tuytelaars, T., and Mikolajczyk, K.: **Local invariant feature detectors: a survey**. Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision, 3(3), 177-280, 2008.

[Uren V.S. et al., 2006] Uren V.S., Cimiano P. Iria J., Handschuh S., Vargas-Vera M., Mota E., and Ciravegna F.: **Semantic Annotation for Knowledge Management: Requirements and a Survey of the State of the Art**, J. Web Sem., 4(1), pp 14-28, 2006.

[UwAmp, 2017] http://www.uwamp.com/fr/ (Disponible au 04/05/2017).

[Vallet, J. M. et al., 2012] Vallet, J. M., De Luca, L., Feillou, M., Guillon, O., and Pierrot-Deseilligny, M.: **An interactive 3-dimensional database applied to the conservation of a painted chapel**. International Journal of Heritage in the Digital Era, 1(2), 233-250, 2012.

[Van Gool L. et al, 1996] Van Gool L., Moons T. and Ungureanu D.: **Affine/Photometric Invariants for Planar Intensity Patterns**, In Computer Vision, ECCV'96, pp. 642-651, Springer, 1996.

[Van Heijst G. et al., 1997] Van Heijst, G., Schreiber, A. T., and Wielinga, B. J.: **Using explicit ontologies in KBS development**. International journal of human-computer studies, 46(2), 183-292, 1997.

[Vásárhelyi B. et al., 2006] Vásárhelyi, B., and Ván, P.: **Influence of water content on the strength of rock**. Engineering Geology, 84(1), 70-74, 2006.

[Vassilakaki E. et al., 2014] Vassilakaki E., Kyriaki-Manessi D., Zervos S., and Giannakopoulos G.: **CIDOCCRM extensions for conservation processes: a methodological approach**. In 4th international Conference on Integrated Information, Madrid, Spain, September 2014.

[Verdie Y. et al, 2014] Verdie Y., Yi K., Fua P., and Lepetit V.: **TILDE: A Temporally Invariant Learned DEtector**, arXiv preprint arXiv:1411.4568, 2014.

[Verges-Belmin V., 2008] Verges-Belmin, V.: **Illustrated glossary on stone deterioration patterns**, Collectif, ICOMOS-ISCS, coordonné par Vergès-Belmin V., Traduction en Français par Bromblet P., Vallet J.M. et Vergès-Belmin V. ISO 690, 2008.

[Viola P. et al, 2001] Viola P., and Jones M.: **Rapid Object Detection Using a Boosted Cascade of Simple Feature**, In Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2001, 2001IEEE Conference on Vol.1, pp. 511-518, 2001.

[VOWL, 2016] http://vowl.visualdataweb.org/ (disponible au 05/08/2016].

[Vrabie V. et al, 2012] Vrabie, V., Perrin, E., Bodnar, J. L., Mouhoubi, K., and Detalle, V.: **Active ir thermography processing based on higher order statistics for nondestructive evaluation**. In Signal Processing Conference (EUSIPCO), Proceedings of the 20th European (pp. 894-898). IEEE , August 2012.

[Vranic D.V. et al., 2001] Vranic D.V. and Saupe D.: **3D shape descriptor based on 3D Fourier transform**. Proceedings of the EURASIP Conference on Digital Signal Processing for Multimedia Communications and Services (ECMCS 2001). pp. 271-274, 2001.

[W3C, 2016] https://www.w3.org/standards/semanticweb/ontology (disponible au 27/07/2016).

[Wallin A. et al, 1995] Wallin A., and Kübler O.: **Complete Sets of Complex Zernike Moment Invariants and the Role of the PSeudoinvariants**, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 17(11), pp. 1106-1110, 1995.

[Weyer, A., 2015] Weyer, A. (Ed.): **EwaGlos: European illustrated glossary of conservation terms for wall paintings and architectural surfaces**. Michael Imhof Verlag, 2015.

[Zhao Y. et al., 2016] Zhao, Y., and Han, Q.: **Spatial crowdsourcing: current state and future directions**. IEEE Communications Magazine, 54(7), 102-107, 2016.

[Zins C., 2006] Zins, C.: **Redefining information science: From information science to knowledge science**. Journal of Documentation, 62(4), 447–461, 2006.

[Zins C., 2007] Zins, C.: **Conceptual approaches for defining data, information, and knowledge**. Journal of the American society for information science and technology, 58(4), 479-493, 2007.

[Zogg H.M., 2008] Zogg H.M.: **Investigations of High Precision Terrestrial Laser Scanning with Emphasis on the Development of a Robust Close-Range 3D-Laser Scanning System**, Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, 2008.

Liste des publications

Publication dans une revue avec comité de lecture

T. Messaoudi, P. Véron & L. De Luca. An ontological model for the reality-based 3D annotation of heritage building conservation state, JCH (Journal of Cultural Heritage) (Submitted).

Publications dans des actes de congrès avec comité de lecture

T. Messaoudi, A. Manuel, E. Gattet, L. De Luca, & P. Véron. Laying the foundation for an Information System Dedicated to Heritage Building Degradation Monitoring Based on the 2D/3D Semantic Annotation of Photographs, Eurographics Workshop on Graphics and Cultural Heritage - Short Papers Posters, Darmstadt, Germany, 6-8 October 2014.

Jacquot, K., Messaoudi, T., & de Luca, L. (2015, September). Knowledge-based approach for the 3D modeling of masonry structures. In 2015 Digital Heritage (Vol. 2, pp. 189-190). IEEE.

Messaoudi, T., De Luca, L., & Véron, P. (2015, September). Towards an ontology for annotating degradation phenomena. In 2015 Digital Heritage (Vol. 2, pp. 379-382). IEEE.

Table des illustrations

Figure 1 : Schéma générale de la structure du projet ANR MONUMENTUM. 17
Figure 2 : 1ème site d'expérimentation, l'église Saint Maurice de Caromb. 19
Figure 3 : 2ème site d'expérimentation, la chapelle Notre dame des Fontaines (La Brigue) : intérieur à gauche et extérieur à droite. 20
Figure 4 : Exemple de donnée. 25
Figure 5 : Exemple d'information par la donnée contextualisée. 26
Figure 6 : Exemple de connaissance acquise à travers l'information. 28
Figure 7 : Pyramide Donnée, Information, Connaissance et Sagesse (DIKW pyramid) [Liew A., 2013] 29
Figure 8 : Trois composantes d'études pour l'étude de la conservation du patrimoine culturel bâti. 30
Figure 9 : Filtre couleur de Bayer. 31
Figure 10 : Spectre électromagnétique et classe de rayonnement. 32
Figure 11: Tailles de capteurs photographiques actuelles. 32
Figure 12: Influence de la focale sur le champ de vision pour un capteur unique. 33
Figure 13 : Acquisition photographique pour une couverture complète avec un exemple d'instance à droite : Église Saint Maurice. 34
Figure 14 : Exemple de détail sur le mur Est de l'église de Caromb, sous plusieurs angles de prise de vue. 35
Figure 15 : Photographies en lumière directe, peinture Est du chœur de la Chapelle Notre-Dame des Fontaines (CICRP.Photo Odile Guillon). 36
Figure 16 : Photographie en Lumière Semi-Rasante (éclairage par le bas), peinture Est du chœur de la Chapelle Notre-Dame des Fontaines (CICRP.Photo Odile Guillon). 36
Figure 17 : Photographies de fluorescence sous Ultraviolet, peinture Est du chœur de la Chapelle Notre-Dame des Fontaines (CICRP.Photo Odile Guillon). 37
Figure 18 : Photographies dans l'Infrarouge, peinture Est du chœur de la Chapelle Notre-Dame des Fontaines (CICRP.Photo Odile Guillon). 38
Figure 19 : Contextualisation de l'utilisation de la thermographie IR (passive), résultat en haut à droite d'un point de vue sur une altération : façade Est de l'église Saint Maurice (CICRP.données Vallet J. M.). 39
Figure 20 : Exemple de cartographie 2D sur papier calque in situ. 40
Figure 21 : Schéma du fonctionnement des scanners longue portée [Marbs et al, 2001]. 41
Figure 22 : Exemple de scanner à décalage de phase : FARO Focus 3D. 42
Figure 23 : Schéma de fonctionnement des scanners lasers par triangulation [Marbs A. et al., 2001] 43
Figure 24 : Image panoramique visualisable in situ : station scanner mis en place dans l'église Notre-Dame des Fontaines. 44
Figure 25 : Présentation de la mise en place du LIBS (à gauche), et cratère d'ablation du laser (à droite) vu par une caméra microscope (40x) (appareillage LRMH/C2RMF). 45

Figure 26 : Exemple de résultats affichés par le software dédié de la technologie : un spectre LIBS. 46
Figure 27 : Exemple d'échantillonnage pour l'analyse de la desquamation en plaque, montrant la position des échantillons et les trois états du processus d'avancement de la dégradation (à droite) [Janvier-Badosa S. et al., 2014]. 47
Figure 28 : Thermobouton pour l'acquisition climatique (thermique, hygrométrique) et ses caractéristiques techniques. 48
Figure 29 : Échantillon de tableau de valeurs, acquises par un thermo bouton positionné dans la chapelle Notre-Dame des Fontaines. 48
Figure 30 : Schéma d'acquisition multi-station utilisant des sphères de référence pour le recalage a posteriori. 49
Figure 31 : Nuage de points obtenu après recalage des stations, intensité en niveaux de gris : Église Saint-Maurice. 50
Figure 32 : Paramètres de calibration interne et externe. 51
Figure 33 : Schéma représentant les trois techniques de restitution photogrammétrique. De gauche à droite : la restitution à partir d'une seule image, d'un couple d'images et d'un bloc multi-image. 51
Figure 34 : Faisceaux des points SIFT en deux images d'un même 53
Figure 35 : Orientation des images autour du nuage du point SIFT: Église Saint-Maurice (à gauche), Chapelle Notre-Dame des Fontaines (à droite). 53
Figure 36 : Nuage de points final par photogrammétrie : église Saint Maurice (à gauche), Chapelle Notre-Dame des Fontaines (à droite). 54
Figure 37 : Ligne de commande tout-en-un pour la génération d'un nuage de points dense (MIC MAC). 54
Figure 38 : Processus photogrammétrique appliqué à sur un détail morphologique : mur Est de l'église Saint Maurice. 54
Figure 39 : Nuage de points scanner/Apericloud dans un même référentiel de coordonnées : chapelle Notre-Dame des Fontaines. 55
Figure 40 : Du nuage à l'orthophotographie. 56
Figure 41 : Rendus générés sur la base des orthoimages : altération du mur Est, église Saint-Maurice. 57
Figure 42 : Exemple de cartographies manuelles thématiques sur les matériaux et altérations : Mur Est de l'église Saint Maurice (CICRP.cartographies par Bromblet P.). 58
Figure 43 : Exemple de cartographies thématique d'altérations assistées par ordinateur : mur Est de l'église de Caromb (CICRP.cartographies Benard A.) [Benard A., 2015]. 60
Figure 44 : Technique de création d'une image composite infrarouge fausse couleur : peinture Est du chœur de la Chapelle Notre-Dame des Fontaines (CICRP.Photo Odile Guillon). 61
Figure 45 : Plan du protocole d'expérimentation pour la simulation de vieillissement du matériau 63
Figure 46 : exemple de diffractogramme rayon X réalisé sur la poudre des trois situations après le premier cycle d'imbibition [Janvier-Badosa S. et al., 2015]. 63

Figure 47 : Représentation schématique de la concentration en gypse (en poids) dans les échantillons sujets au protocole impliquant la solution de gypse saturé, influence de l'isolation et des fissures [Janvier-Badosa S. et al., 2015]. 64
Figure 48 : Dispositifs pour la résistance à la rupture et la rigidité. 65
Figure 49 : Coefficient du modèle décrivant la résistance en traction pour quatre types de pierre [Bagnéris M. et al., 2014]. 66
Figure 50 : Résistance en traction de la pierre jaune de Caromb (CA) en fonction de la teneur 66
Figure 51 : Coefficients du modèle décrivant la résistance en compression pour quatre types de pierre [Bagnéris M. et al., 2014]. 66
Figure 52 : Résistance en compression de la pierre jaune de Caromb (CA) en fonction de la teneur en eau [Bagnéris M. et al., 2014]. 67
Figure 53 : Exemple de modèle géométrique maillé d'un bloc de pierre paramétré. 68
Figure 54 : Histogramme d'une image en niveau de gris. 69
Figure 55 : Représentation du gradient d'image. 72
Figure 56 : Exemple de descripteurs locaux d'images. 72
Figure 57 : Distribution de forme et comparaison [Osada R. et al., 2002]. 73
Figure 58 : Composantes de représentation de surface Image Spin. 74
Figure 59 : Exemple d'un rapport pour une analyse d'échantillon sur 6 tirs avec caractérisations des matériaux (LRMH.données D. Martos-levif et V. Detalle) 76
Figure 60 : Modèle numérique calculé à gauche et profile de la contrainte transversale à droite (LMGC.données F. Cherblanc). 77
Figure 61 : Description hypothétique du mécanisme expliquant comment une plaque se développe dans la pierre tuffeau sujet à la desquamation en plaque [Janvier-Badosa S. et al., 2015] 78
Figure 62 : Analyse RANSAC, apparentée à la perte de matière : Mur Est de l'église Saint Maurice [Nespeca R. et al., 2016]. 81
Figure 63 : Structuration des termes en famille du glossaire ICOMOS 83
Figure 64 : Croisement des Données-Informations-Connaissances des trois composantes d'étude du domaine de la conservation. 86
Figure 65 : Tableau, bilan des données, informations et connaissances pour l'étude des surfaces, des formes et la physico-chimie du bâti patrimonial. 87
Figure 66 : Différences de représentation et de comportements en réponse à une requête pour des bases de données relationnelles et les bases de données graphe. 92
Figure 67 : Diagramme montrant les prises en considération dans le processus de relevé-modélisation-représentation [De Luca L., 2014] 96
Figure 68 : Méthode de génération de graphe pour la description architecturale d'une vue dédiée. 98
Figure 69 : Méthode d'annotation sémantique 2D/3D avec affichage du calque sémantique superposé aux images où est présent l'élément architectural [Busayarat C., 2010]. 100

Figure 70 : Méthode et système de visualisation des transformations temporelles d'édifices patrimoniaux [Stefani C., 2010]. 101
Figure 71 : Cas d'étude utilisant la plateforme pour le suivi de la conservation du patrimoine. 104
Figure 72 : Méthode d'annotation sémantique au sein du système NUBES et extraction d'informations statistiques et spatiales. 105
Figure 73 : Arbre de Porphyre. 111
Figure 74 : Le triangle sémantique de la notion de concept. 111
Figure 75 : Les différentes couches du web sémantique. 115
Figure 76 : Échantillon d'ontologie de domaine. 116
Figure 77 : Exemple de représentation en graphe, RDF. 118
Figure 78 : Sérialisation de graphe RDF par RDF/XML de l'exemple 1 (en haut) et l'exemple 2 (en bas). 118
Figure 79 : Structure du langage OWL avec un exemple. 121
Figure 80 : Cycle de vie d'une ontologie. 122
Figure 81 : Illustration de l'interface de Photostuff [Halaschek-Wiener C. et al., 2005]. 124
Figure 82 : Exemple d'image d'un bâtiment avec ses propriétés dans Kultturisampo. 127
Figure 83 : Exemple de superposition de cartes anciennes avec cartographie dynamique actuelle grâce aux données ontologiques : Kultturisampo. 127
Figure 84 : Graphe représentant des relations entre entités (portail Kulturisampo). 128
Figure 85 : Cœur structurel du modèle ontologique PARCOURS [Niang C. et al., 2015]. 130
Figure 86 : Cas d'étude applicable sur une portion du modèle PARCOURS [Niang C. et al., 2015]. 131
Figure 87 : Représentation conceptuelle de l'ontologie de domaine du système MONDIS. 133
Figure 88 : Cas d'étude réel insérable dans MONDIS sous forme de modèle conceptuel [Cacciotti R. et al., 2015a]. 135
Figure 89 : Illustrations de l'application mobile de MONDIS avec localisation du monument (partie haute) puis la documentation d'une altération annotée (partie basse) [Cacciotti R. et al., 2014]. 136
Figure 90 : Grille d'évaluation : système NUBES SACRE. 137
Figure 91 : Grille d'évaluation : système PARCOURS. 137
Figure 92 : Grille d'évaluation : système MONDIS. 138
Figure 93 : Trois catégories d'études d'un point de vue de l'expert pour la prise en compte de toutes les composantes de la conservation. 141
Figure 94 : Approche par corrélation multidimensionnelle pour le suivi de la conservation du patrimoine culturel bâti. 142
Figure 95 : Approche générale multidimensionnelle. 144
Figure 96 : Schéma représentant la méthode de Lassila [Hernandez N., 2005]. 146
Figure 97 : Vocabulaire contrôlé sur les formes d'altérations de la pierre. 147
Figure 98 : Exemples de Gloses du glossaire « pierre » issu d'un accord consensuel de définition de termes en français (FR) [Verges-Belmin V., 2008]. 148

Figure 99 : Exemple d'échantillon de Taxonomie structuré après la définition des termes du glossaire « pierre ». 149
Figure 100 : Deux instances d' « Annotation » lié au concept « DesquamationEnPlaque » : « RegionA1 » et « RegionA2 ». 150
Figure 101 : Exemple de propriété fonctionnelle. 151
Figure 102 : Exemple de propriété transitive. 151
Figure 103 : Ontologie de domaine décrivant la un état de conservation patrimoine (en anglais). 152
Figure 104 : Cycle d'une méthode scientifique intégrant l'observation d'après [Samuel K. T., 1972] 154
Figure 105 : Processus d'observation scientifique porté par l'annotation : identification et désignation. 154
Figure 106 : Schéma conceptuel issu de la définition consensuelle des descripteurs du domaine de la conservation. 155
Figure 107 : Échantillon des propriétés de données des concepts "Material" et "BuildingTechnic" (en anglais). 156
Figure 108 : Cœur structurel de notre ontologie de domaine basé sur l'observation scientifique. 157
Figure 109 : Classes de haut niveau de description du CIDOC-CRM. 159
Figure 110 : Structuration du modèle de référence du CIDOC : CRMcore et ses extensions. 160
Figure 111 : Convention de nommage pour CIDOC-CRM et ses extensions. 161
Figure 112 : Correspondance des classes CIDOC-CRM avec notre ontologie de domaine : exemple des composants architecturaux et les altérations. 162
Figure 113 : Intégration du CIDOC-CRM et ses extensions pour la description de la conservation du patrimoine architectural. 163
Figure 114 : Du point de départ vers la contribution scientifique pour la définition de la dimension sémantique. 165
Figure 115 : Formalisme de représentation de l'ontologie et ses constituants. 166
Figure 116 : Maquette numérique et référencement spatial des images [Busayarat C., 2010]. 168
Figure 117 : Projection de la segmentation sur les images [Busayarat C., 2010]. 169
Figure 118 : Modélisation 3D basée sur les images, avec des exemples de rendus générés. 170
Figure 119 : table de la base de données stockant les index et leurs composantes 3D. 171
Figure 120 : Méthode de transfert d'annotations en utilisant les relations 2D/3D. 171
Figure 121 : Types d'imageries scientifiques multi-spectrales : peinture Est du chœur de la chapelle Notre-Dame des Fontaines (CICRP.Photos Odile Guillon). 173
Figure 122 : Référencement d'une image en IR dans l'espace 3D pour une orientation indirect. 173

Figure 123 : Orientation d'un détail dans le même référentiel que le nuage de points préalablement produit. 174
Figure 124 : Principe d'orientation et référencement (modèle de Sténopé) d'images orientées de deux états temporels différents : T0 et T1. 175
Figure 125 : Orientation de deux états de conservation différents et projection d'une annotation d'un état T0 (Violet) sur une annotation d'un état T1 pour une analyse morphologique. 176
Figure 126 : Relation entre la dimension conceptuelle et spatiale pour une altération représentée par deux états temporels différents (T0 et T1). 177
Figure 127 : Descripteurs disponibles grâce à la dimension spatiale. 178
Figure 128 : Informations 2D enrichies d'informations 3D par la présente relation bijective. 178
Figure 129 : Cartographies manuelles de gauche à droite : composants architecturaux, matériau bloc à bloc, perte de matière, et colonisation biologique, partie de la façade Est de l'église Saint Maurice. [Benard A., 2015]. 179
Figure 130 : Carte C2C entre nuage de points issu du scanner et celui issu de la reconstruction photogrammétrique ; partie de la façade Est de l'église Saint Maurice [Nespeca R. et al., 2016]. 180
Figure 131 : Analyse RANSAC C2M : nuage de points et plan RANSAC (en verte) à gauche et carte C2M à droite ; partie de la façade Est de l'église Saint Maurice [Nespeca R. et al., 2016]. 181
Figure 132 : Analyse du nuage de point en Occlusion ambiante : partie de la façade Est de l'église Saint Maurice 181
Figure 133 : Carte des normales : partie de la façade Est de l'église Saint Maurice 182
Figure 134 : Cartes des courbures avec les trois méthodes dont la dernière par "Normal Change Rate" (à droite) montre des résultats significatifs : partie de la façade Est de l'église Saint Maurice [Nespeca R. et al., 2016]. 183
Figure 135: Différentes cartes de rugosité avec différentes valeurs de Kernel : partie de la façade Est de l'église Saint Maurice [Nespeca R. et al., 2016]. 184
Figure 136 : Possibilité d'extraction d'information morphologique pour un index 3D donné par analyse géométrico-visuelle : partie de la façade Est de l'église Saint Maurice [Nespeca R. et al., 2016]. 185
Figure 137: Annotations traditionnelles (à gauche), et l'analyse géométrico-visuelle automatique du nuage de point (à droite) pour l'altération "Détachement". 185
Figure 138 : Du point de départ sur l'analyse morphologique vers une contribution dans la conception de l'ontologie. 187
Figure 139 : Méthode de modélisation et de texturage pour la création du support d'annotation. 189
Figure 140 : Prise en considération des données d'acquisition pour la description et l'observation scientifique de la conservation du patrimoine architectural : cas du Château de Chambord [Stefani C. et al., 2014]. 192

Figure 141 : Approche générale du système avec exemples. 194
Figure 142 : Exemple de description d'une acquisition par le CRMdig pour la provenance des données : modèle général conceptuel (à droite) et son instanciation (à gauche). 195
Figure 143 : Précision sur les propriétés spatiales et morphologiques associées à la région et aux indexes 3D contenus dans cette région. 196
Figure 144 : Observation scientifique d'une altération: modèle conceptuel général (en haut à gauche), première observation (en haut à droite) et enrichissement de l'argumentation (en bas). 197
Figure 145 : Moteur de corrélation sémantique multidimensionnel pour le suivi de la conservation du patrimoine culturel architectural. 199
Figure 146 : Tableau récapitulatif sur l'exploitation de l'état de l'art dédié à chaque dimension pour notre contribution scientifique. 203
Figure 147 : Architecture de l'implémentation générale pour l'outil d'analyse et d'aide à la décision pour le suivi de la conservation du patrimoine bâti. 205
Figure 148 : Principe de fonctionnement d'Ontop. 207
Figure 149 : Interface jOWL et VOWL, connectés, interactifs. 208
Figure 150 : Interface TemaTres [TemaTres, 2016]. 210
Figure 151 : Schéma entité/association de la base de données pour le suivi de la conservation du patrimoine. 213
Figure 152 : Quatre thésaurus thématiques : Altération, Matériau, Technique de Construction, et Composant Architectural : capture d'écran de Protégé. 214
Figure 153 : Exemple de propriétés d'objet reliant les quatre 214
Figure 154 : Exemple de propriétés de données caractérisant 215
Figure 155 : Portion de l'ontologie de domaine générée après intégration du CIDOC-CRM. 217
Figure 156 : Exemple de Mapping entre notre base de données (source) et notre ontologie de domaine (cible) : capture d'écran Protégé. 218
Figure 157 : Instanciation de la classe E21_Person par le mapping MAP_Person. 219
Figure 158 : Fenêtre du mapping manager de Protégé pour l'exemple MAP_Person. 219
Figure 159 : Correspondances permettant d'extraire les index 3D de chaque annotation : capture d'écran de Protégé. 220
Figure 160 : Exemples de mapping de la phase de désignation par un expert sur une annotation : capture d'écran de Protégé. 220
Figure 161 : Calque de description avec leurs annotations sur les images orientées. 221
Figure 162 : Résultat de la requête SPARQL et de son graphe en haut), et de son visuel en 2D puis en 3D (en bas). 222
Figure 163 : Requête d'extraction de l'ensemble des processus d'observations dédiés à cet édifice : résultats (en haut) et graphe (en bas). 223
Figure 164 : Requête d'extraction des annotations et de leurs index 3D communs : résultats en graphe et sa visualisation 3D. 224
Figure 165 : Requêtes d'extraction des altérations qui agissent sur des matériaux : résultat des triplets et visualisation 2D (en haut), le graphe (au milieu), et la visualisation 3D (en bas). 225

Figure 166 : requête d'extraction du degré de superposition entre une région de type "Altération" et des régions de type "Matériau" : résultat des triplets (en haut), graphe et image spatialisant les annotations (en bas). 228
Figure 167 : Graphe de visualisation par l'algorithme de spatialisation de Yifan Hu. 229
Figure 168 : L'information interfaçant deux entités essentielles pour la description : la représentation tridimensionnelle (donnée) et l'ontologie de domaine (connaissance). 232
Figure 169 : Interface entre le modèle ontologique, l'outil LMCG90 et l'outil de visualisation de données et d'analyse ParaViewerWeb. 237
Figure 170 : Exemple de règle d'inférences. 238
Figure 171 : Application mobile in situ pour l'étude de la conservation du patrimoine culturel bâti. 240
Figure 172 : Illustration 1 de l'ontologie de domaine représentant les premières classes à partir de "Thing". 269
Figure 173 : Illustration 2 de l'ontologie de domaine. 270
Figure 174 : Illustration 3 de l'ontologie de domaine 270
Figure 175 : Illustration 4 de l'ontologie de domaine. 271
Figure 176 : Illustration 5 de l'ontologie de domaine. 272
Figure 177 : Illustration 6 de l'ontologie de domaine. 272
Figure 178 : Illustration 7 de l'ontologie de domaine. 273
Figure 179 : Illustration 8 de l'ontologie de domaine. 273

ANNEXE A

A.1 Illustration de l'ontologie de domaine pour l'observation scientifique spatialisée de l'état de conservation du patrimoine architectural

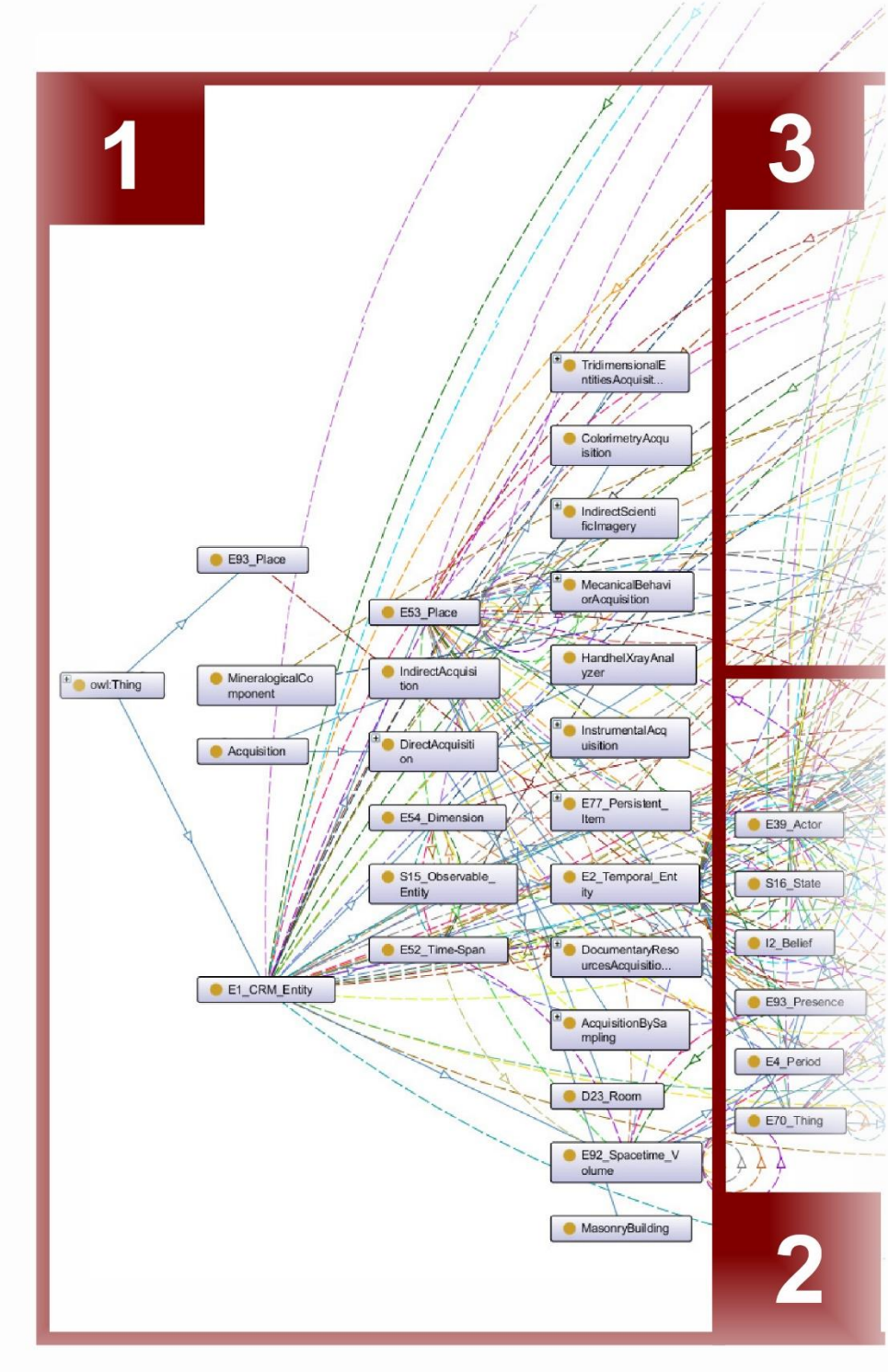


Figure 172 : Illustration 1 de l'ontologie de domaine représentant les premières classes à partir de "Thing".

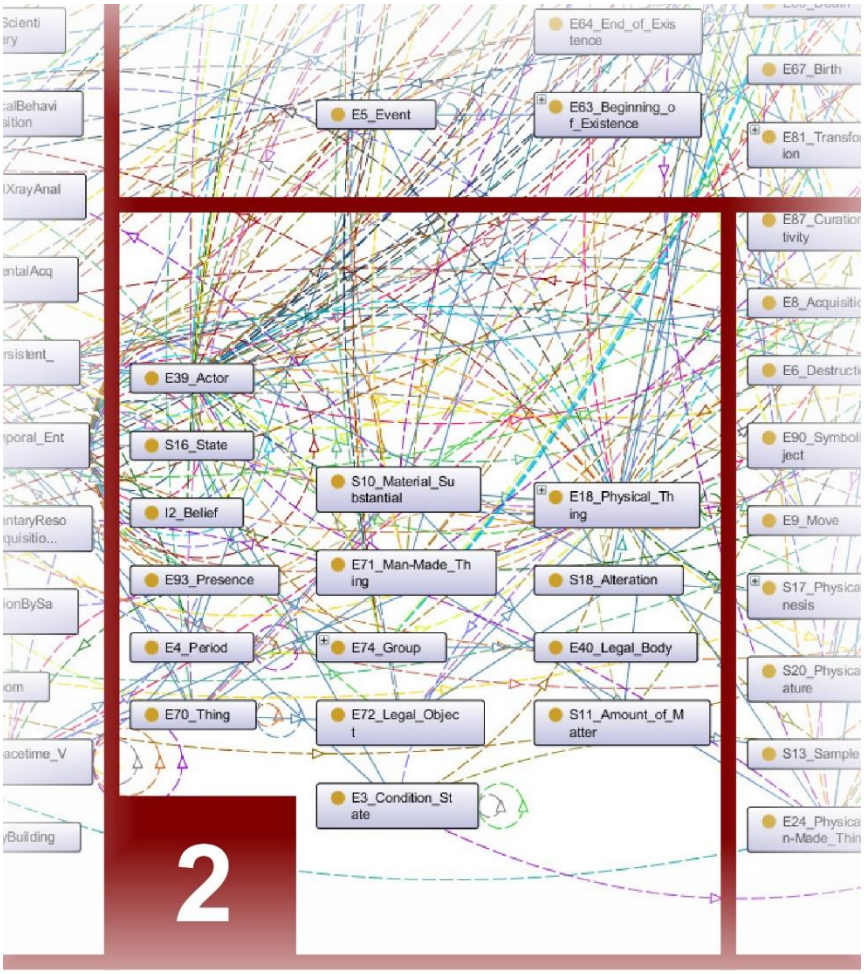


Figure 173 : Illustration 2 de l'ontologie de domaine.

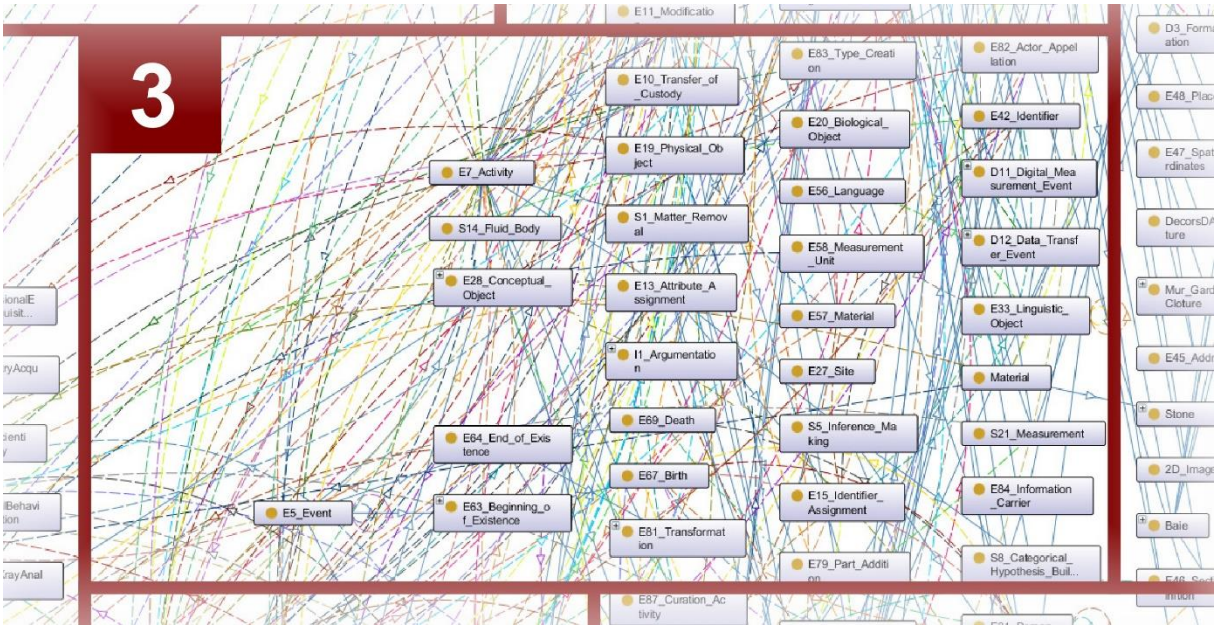


Figure 174 : Illustration 3 de l'ontologie de domaine

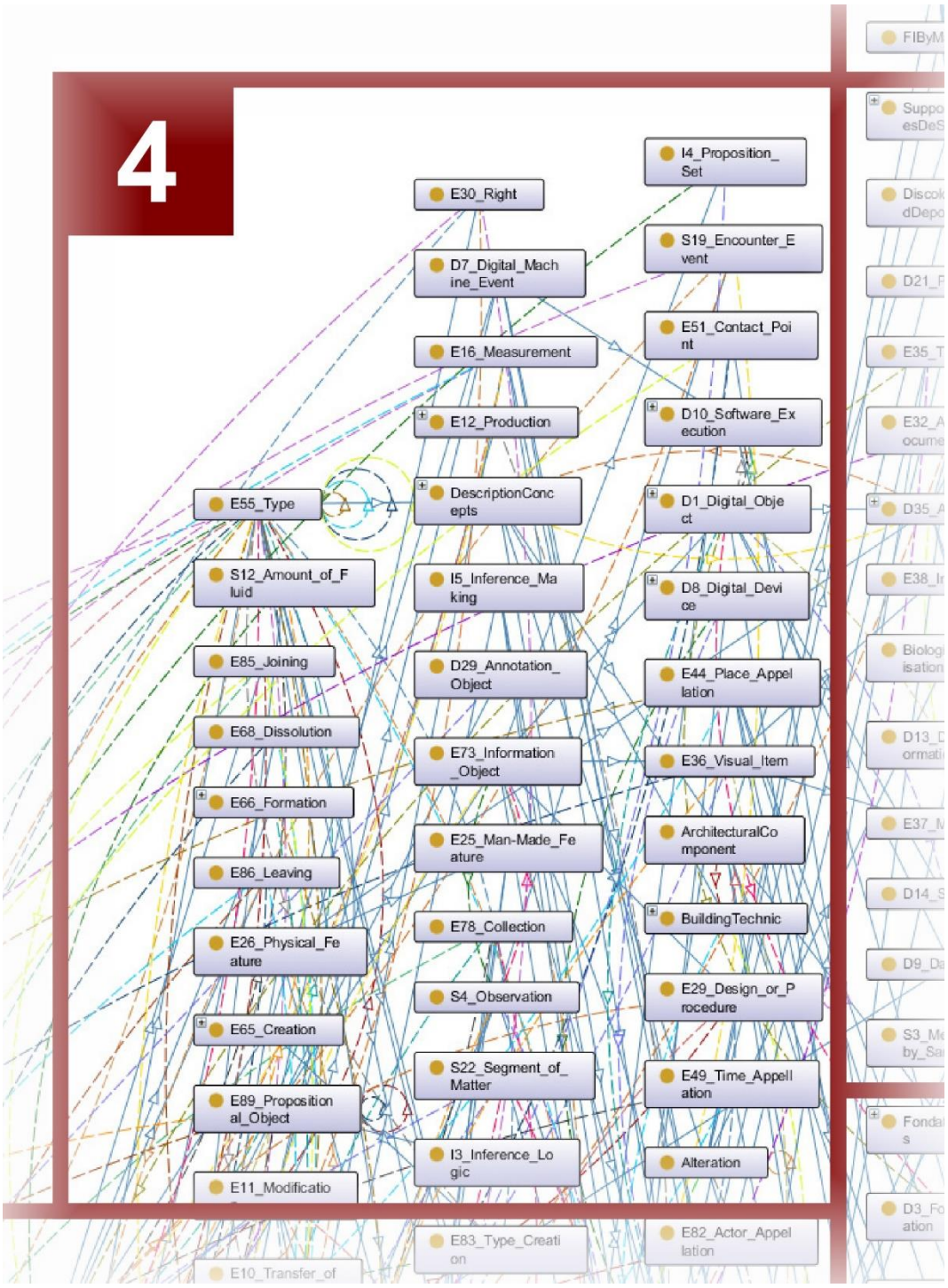


Figure 175 : Illustration 4 de l'ontologie de domaine.

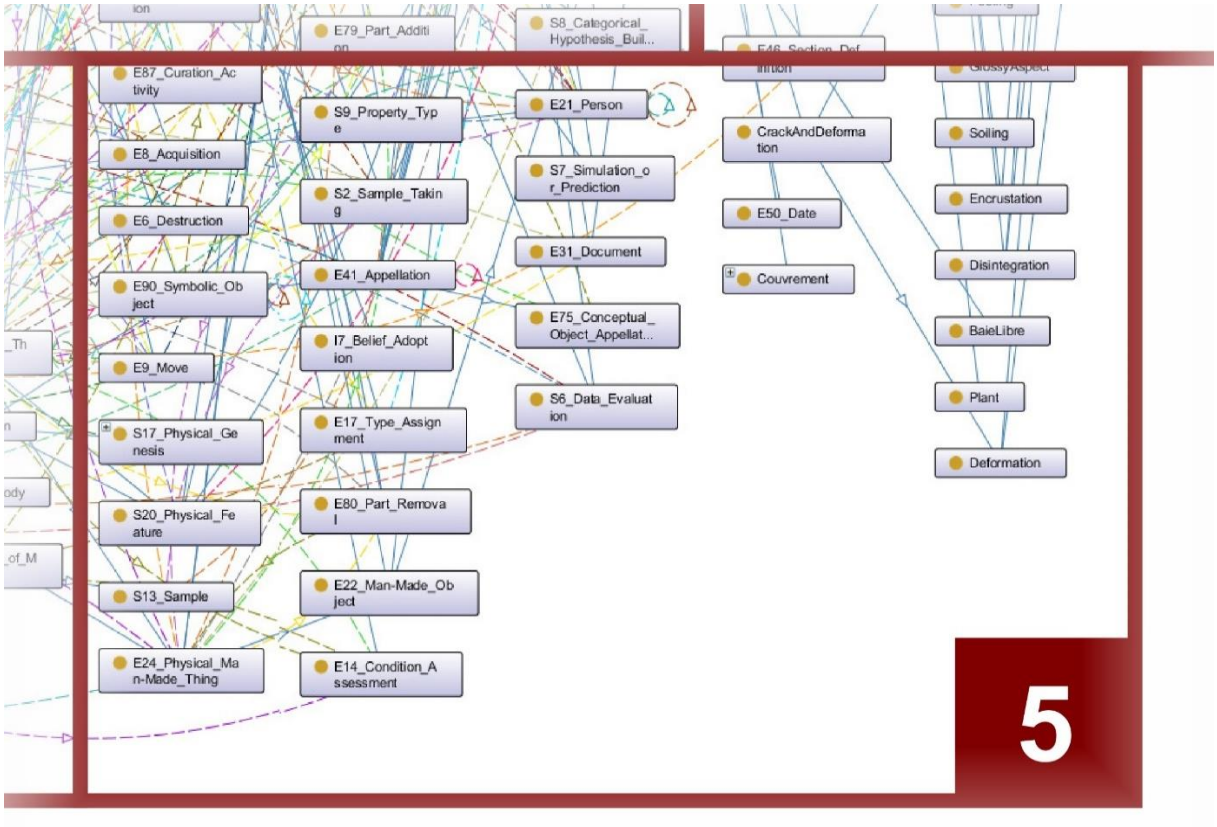


Figure 176 : Illustration 5 de l'ontologie de domaine.

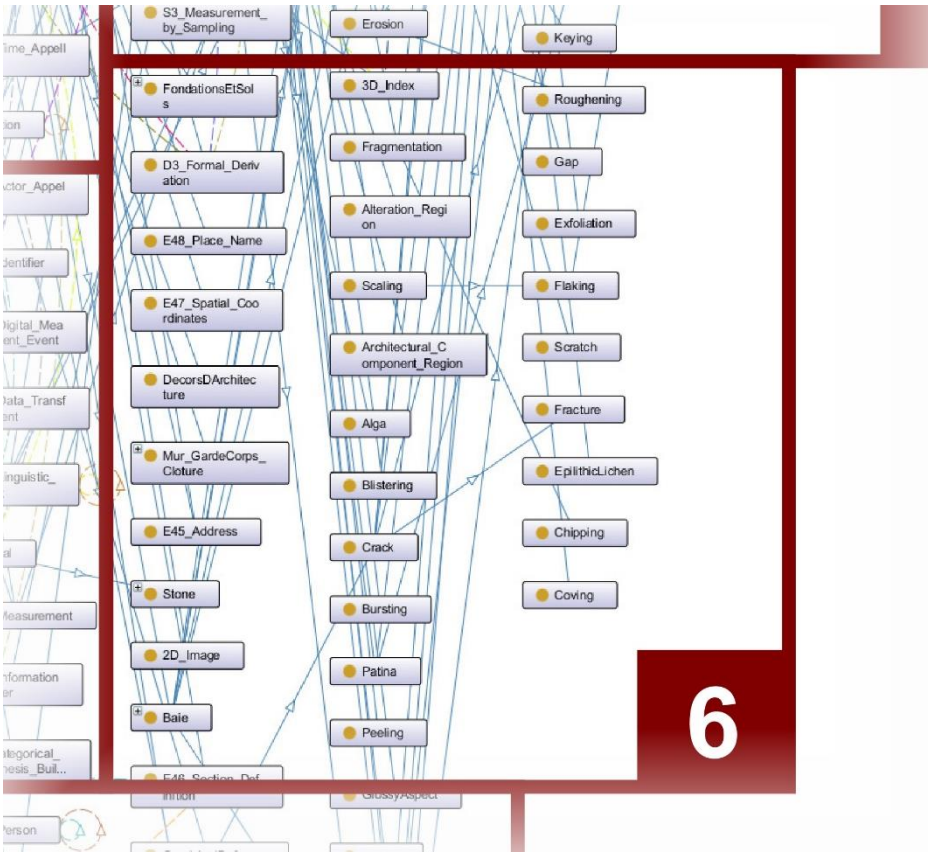


Figure 177 : Illustration 6 de l'ontologie de domaine.

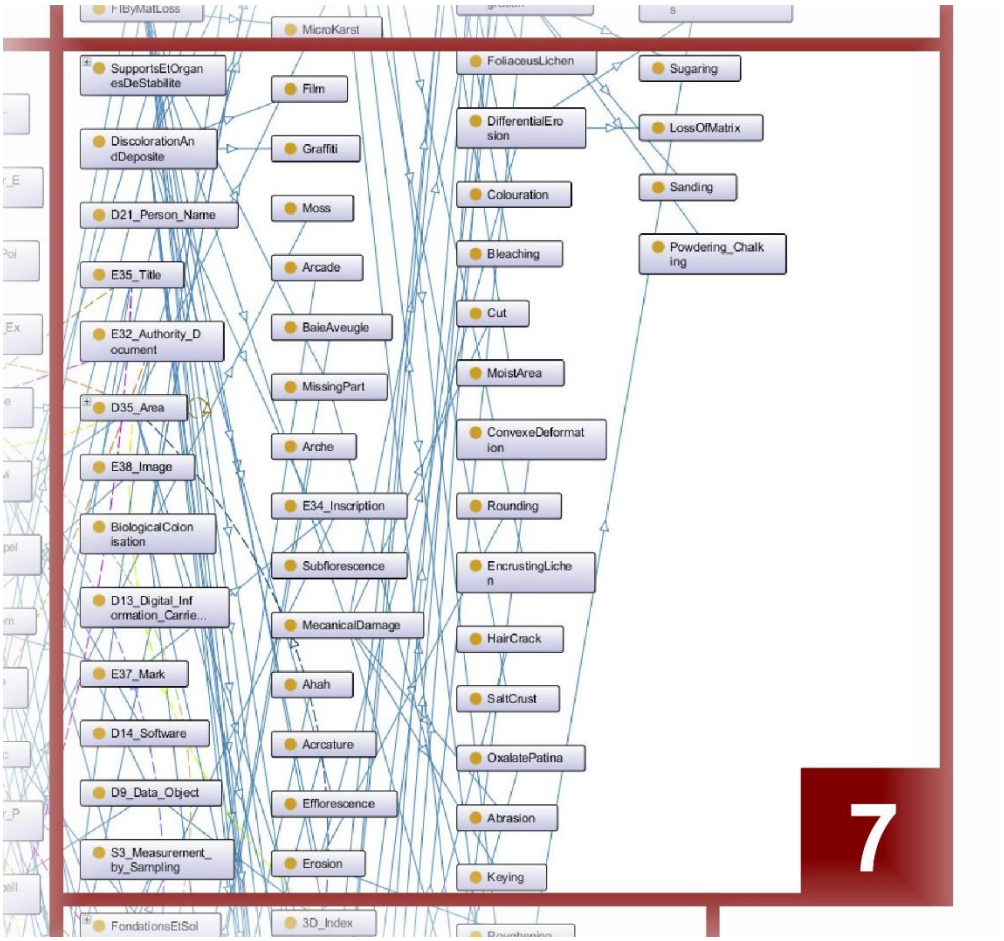


Figure 178 : Illustration 7 de l'ontologie de domaine.

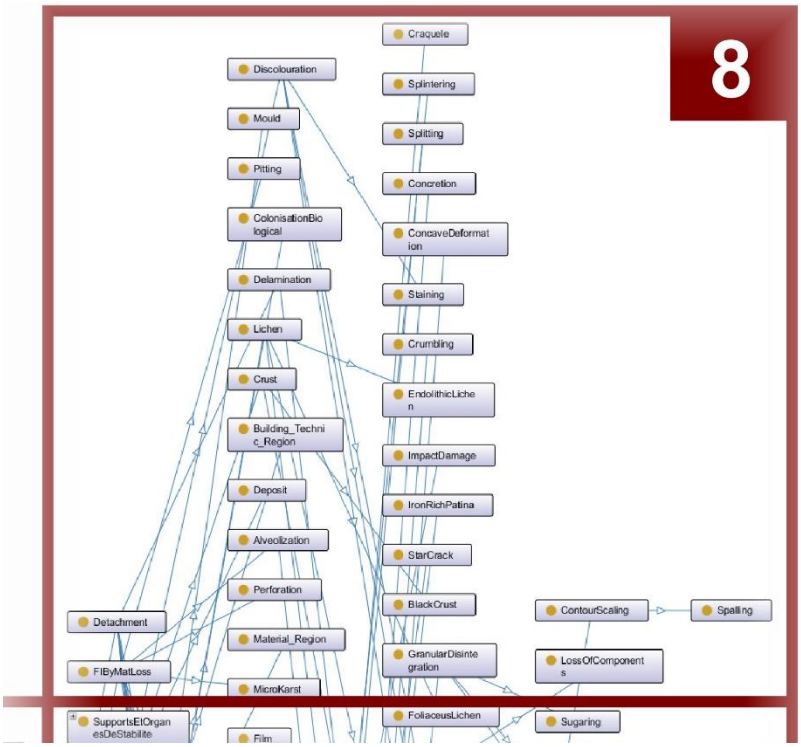
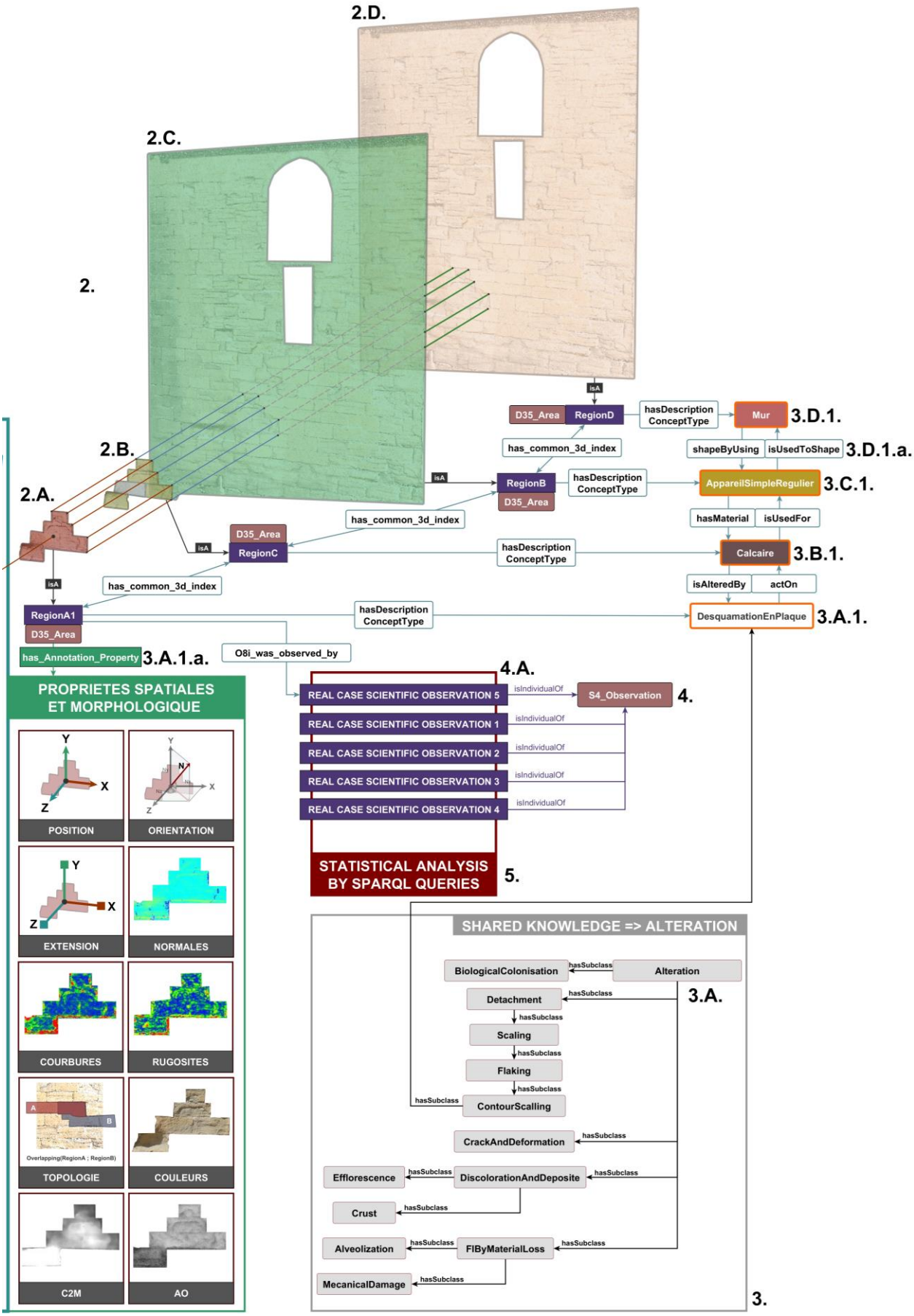


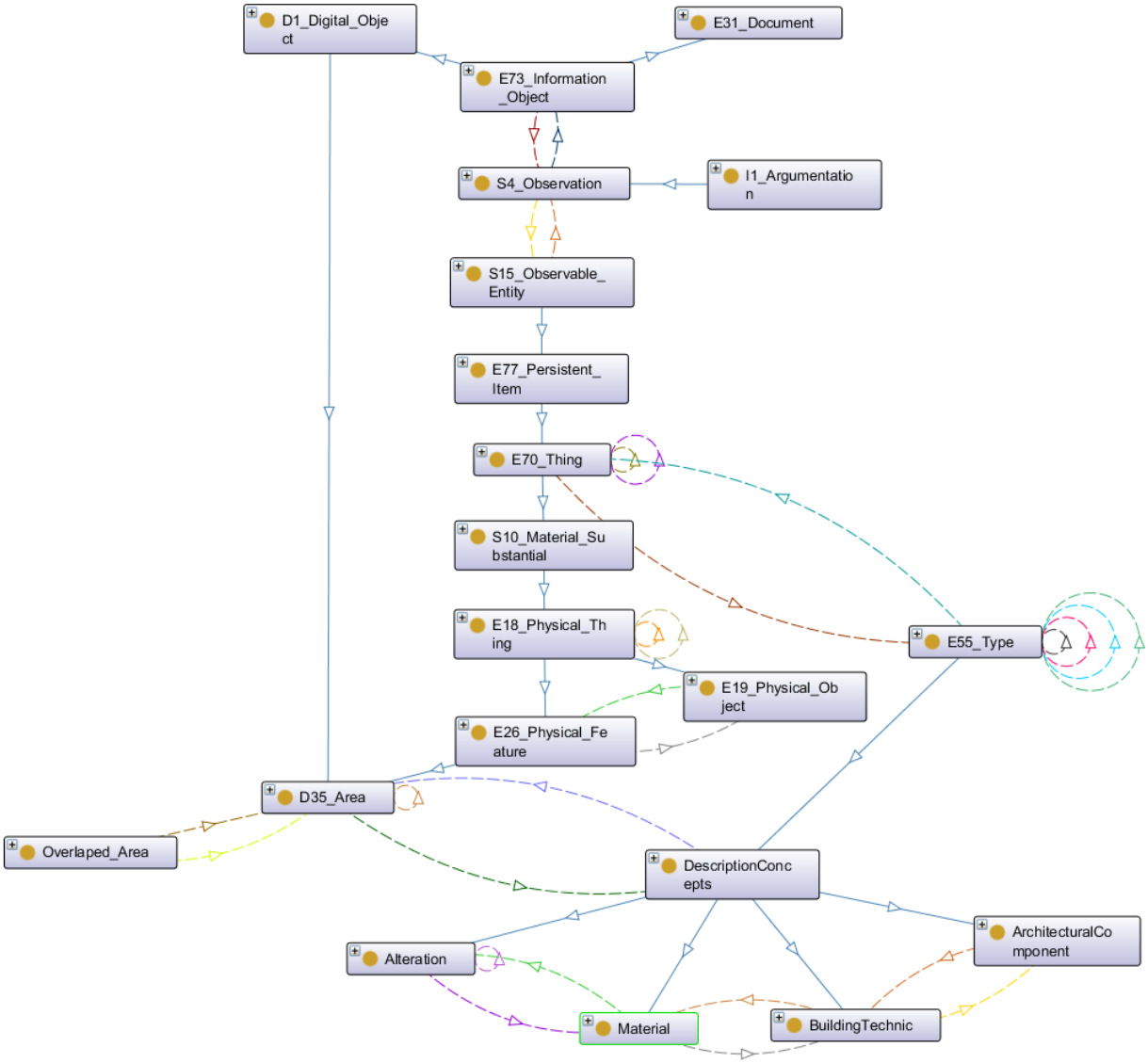
Figure 179 : Illustration 8 de l'ontologie de domaine.

A.2. Agrandissement de la figure sur le moteur de corrélation multidimensionnel



A.3. Illustrations focalisées sur les classes principales de l'ontologie de domaine et leurs relations

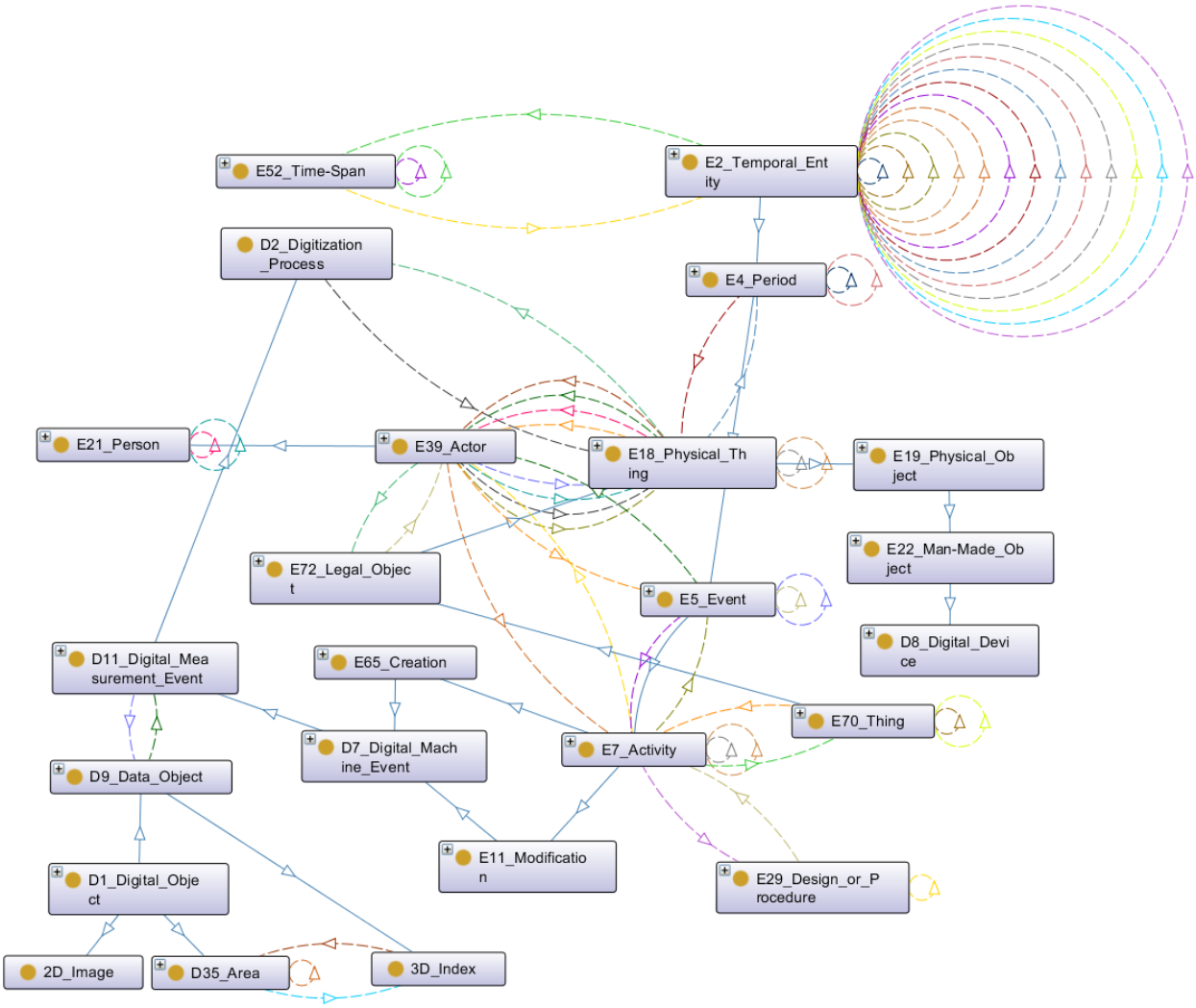
A.3.a Modèle sur le processus d'observation scientifique



Propriétés objets présents :

Domain	Range	Object Property	Inverse Object Property
S4_Observation	E73_Information_Object	supported_by	is_the_support_of
S4_Observation	S15_Observable_Entity	O8_Observed	O8i_was_observed_by
D35_Area	D35_Area	has_common_3d_index	has_common_3d_index
D35_Area	DescriptionConcepts	has_description_concept_type	is_descroption_concept_type_of
Overlaped_Area	D35_Area	implies_first_area	is_the_first_area_implied_in
Overlaped_Area	D35_Area	implies_second_area	is_the_second_area_implied_in
Alteration	Material	act_on	is_altered_by
Material	BuildingTechnic	is_used_for	has_material
BuildingTechnic	ArchitecturalComponent	is_used_to_shape	shaped_by_using
Alteration	Alteration	is_not_the_same_as	is_not_the_same_as

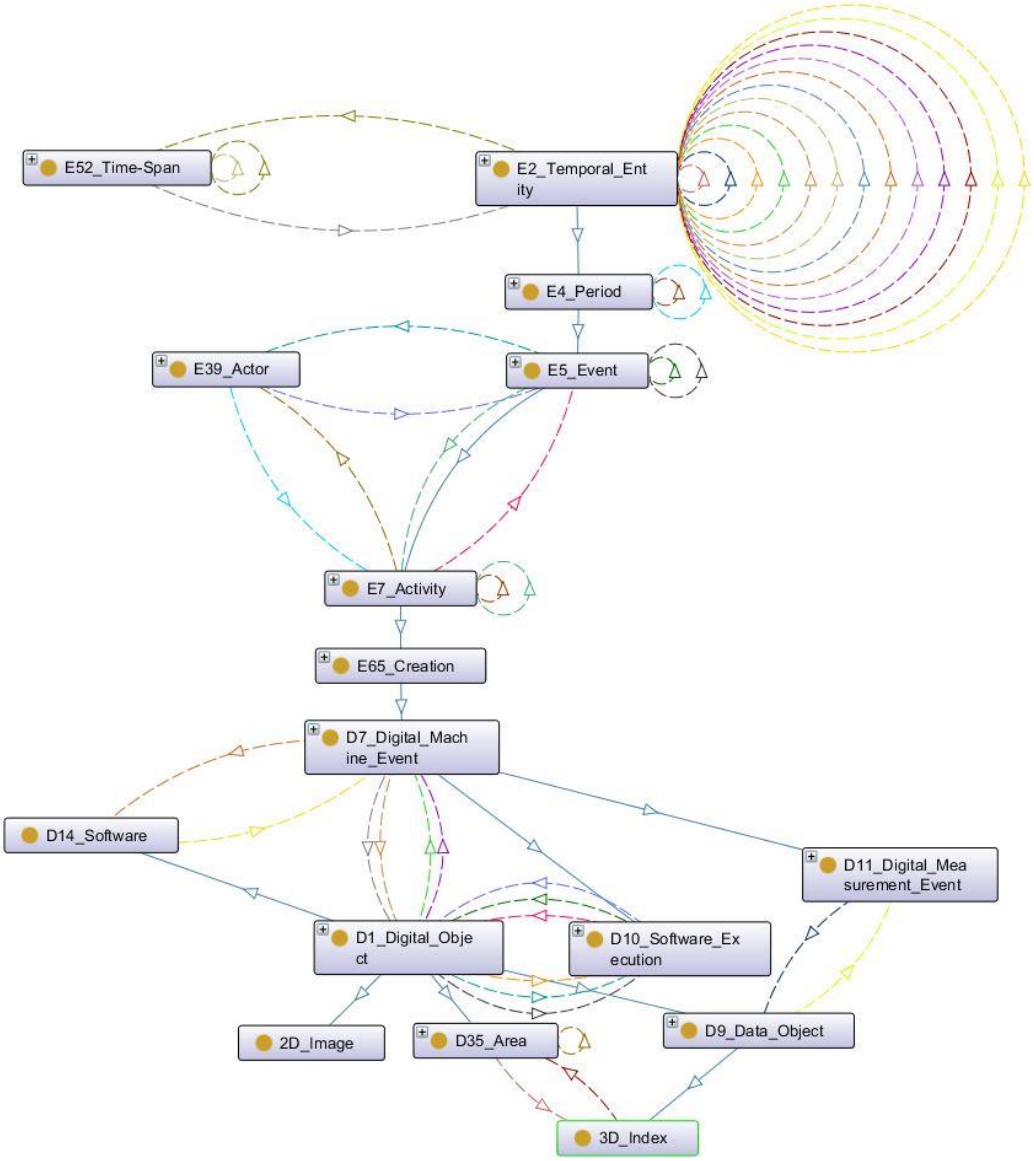
A.3.b Modèle sur le processus d'acquisition de données numériques directe



Propriétés objets présents :

Domain	Range	Object Property	Inverse Object Property
E2_Temporal_Entity	E52_Time-Span	P4_has_time-span	P4i_is_time-span_of
D2_Digitization_Process	E18_Physical_Thing	L1_digitized	L1i_was_digitized_by
E7_Activity	E39_Actor	P14_carried_out_by	P14i_performed
D11_Digital_Measurement_Event	D9_Data_Object	L20_has_created	L20i_was_created_by
E5_Event	E39_Actor	P11_had_participant	P11i_participated_in
E7_Activity	E29_Design_or_Procedure	P33_used_specific_technique	P33i_was_used_by
E7_Activity	E70_Thing	P16_used_specific_object	P16i_was_used_for

A.3.c Modèle sur le processus d'acquisition indirecte de données numériques



Propriétés objets présents :

Domain	Range	Object Property	Inverse Object Property
E2_Temporal_Entity	E52_Time-Span	P4_has_time-span	P4i_is_time-span_of
D7_Digital_Machine_Eveny	D14_Software	L23_used_software_or_firmware	L23i_was_software_or_firmware_used_by
D7_Digital_Machine_Eveny	D1_Digital_Object	L10_had_input	L10i_was_input_of
D7_Digital_Machine_Eveny	D1_Digital_Object	L11_hap_output	L10i_was_output_of
D7_Digital_Machine_Eveny	D1_Digital_Object	L13_used_parameters	L13i_parameters_for
D7_Digital_Machine_Eveny	D1_Digital_Object	L2_used_as_source	L2i_was_source_for
D10_Software_Execution	D1_Digital_Object	L24_created_logfile	L24i_was_logfile_created_by

E7_Activity	E39_Actor	P14_carried_out_by	P14i_performed
D11_Digital_Measurement_Event	D9_Data_Object	L20_has_created	L20i_was_created_by
E5_Event	E39_Actor	P11_had_participant	P11i_participated_in

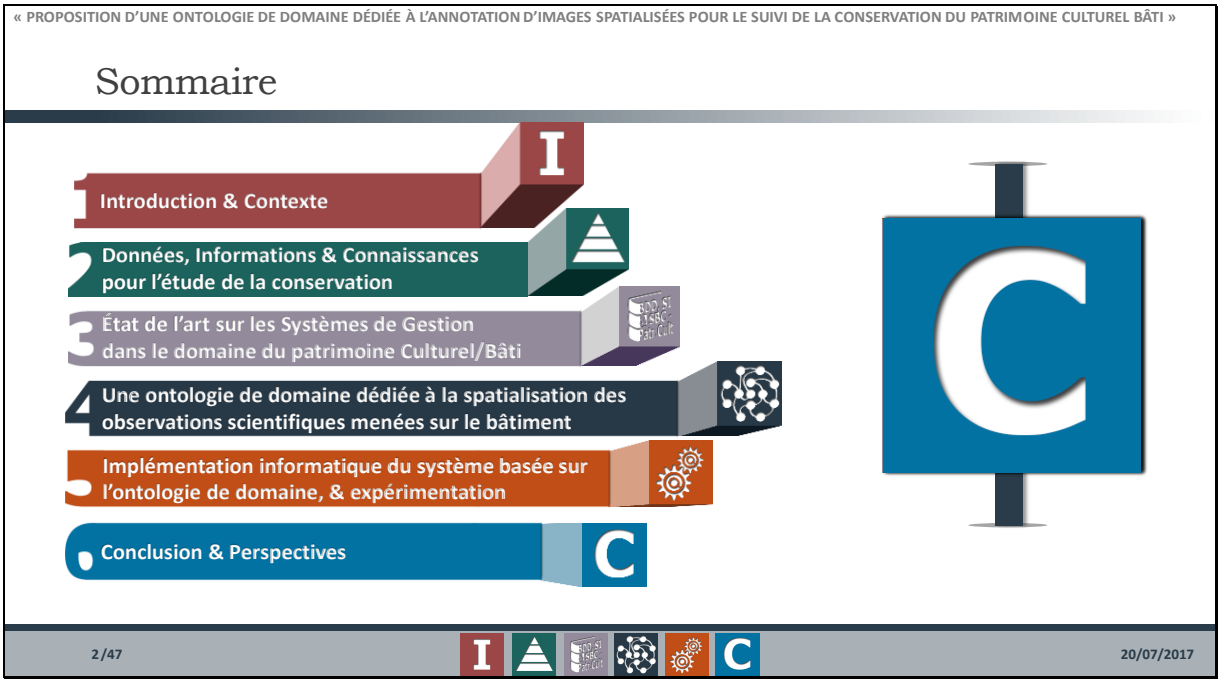
A.3.d Propriété de données des classes principales de l'ontologie de domaine

Domain	Data Property	Datatype
D35_Area	has_annotation_property	xsd:int
	- has_3d_index_count	xsd:int
	- has_annotation_orientation	xsd:int
	-- has_annotation_nx_value	xsd:float
	-- has_annotation_ny_value	xsd:float
	-- has_annotation_nz_value	xsd:float
	- has_barycenter_coordinates	xsd:int
	-- has_bx_value	xsd:float
	-- has_by_value	xsd:float
	-- has_bz_value	xsd:float
	- has_bounding_box_coordinates	xsd:int
	-- has_bbx_value	xsd:float
	-- has_bby_value	xsd:float
	-- has_bbz_value	xsd:float
2D_image	P90_has_value	xsd:int
	L56_has_pixel_width	xsd:int
	L56_has_pixel_height	xsd:int
E21_Person	has_identity	xsd:int
	- has_firstname	xsd:String
	- has_lastname	xsd:String
	- has_job_appellation	xsd:String

BuildingTechnic	has_building_technic_property	xsd:int
	- has_mechanical_behavior	xsd:float
	-- 'valeur_rigidité'	xsd:float
	-- 'valeur_déplacement'	xsd:int
	-- 'valeur_vitesse'	xsd:float
	-- 'valeur_déformation'	xsd:float
	-- 'valeur_contrainte_principale'	xsd:float
	-- 'valeur_dommage_moyen'	xsd:float
HeritageMasonryBuilding	has_herit_masonry_building	xsd:int
	- has_appellation_name	xsd:Name
	- has_location	xsd:int
	-- has_latitude_value	xsd:float
	-- has_longitude_value	xsd:float
3D_Index	has_3d_index_property	xsd:int
	- has_3d_index_coordinates	xsd:int
	-- has_3d_index_x_value	xsd:float
	-- has_3d_index_y_value	xsd:float
	-- has_3d_index_z_value	xsd:float
	- has_3d_index_orientation	xsd:int
	-- has_3d_index_nx_value	xsd:float
	-- has_3d_index_ny_value	xsd:float
	-- has_3d_index_nz_value	xsd:float
	- has_3d_index_color	xsd:int
	-- has_3d_index_red_value	xsd:int
	-- has_3d_index_green_value	xsd:int
	-- has_3d_index_blue_value	xsd:int
	- has_3d_index_amb_occ_value	xsd:int
	- has_3d_index_curvature_value	xsd:int
	- has_3d_index_roughness_value	xsd:int

Overlaped_Area	has_common_3d_index_count	xsd:int
Material	has_material_property	xsd:int
	- has_density	xsd:int
	- has_datation	xsd:date
	- has_provenance	xsd:Name
	- has_porosity	xsd:int
	- has_composition	xsd:int
	-- has_solide_part	xsd:date
	--- has_petrography_value	xsd:Name
	--- has_type	xsd:Name
	--- has_granularity_value	xsd:float
	- has_mecanical_property	xsd:int
	-- 'valeur_coeff_de_poisson'	xsd:float
	-- 'valeur_contrainte_rupture'	xsd:float
	-- 'valeur_déformation_rupture'	xsd:float
	-- 'valeur_module_elastic'	xsd:float
	-- 'valeur_coeff_biot'	xsd:float
	- has_dilatometry_value	xsd:float
	-- has_hydric_property	xsd:int
	--- 'valeur_rétention'	xsd:float
	--- 'valeur_capillarité'	xsd:float
	--- 'valeur_pérméabilité'	xsd:float
	--- 'valeur_cinetique_évaporation'	xsd:float
	--- 'valeur_diffusivité'	xsd:float
	-- has_thermic_property	xsd:int
	--- has_conductivity_value	xsd:float
	--- has_calorific_capacity_value	xsd:float
	-- has_acoustic_property	xsd:int
	--- 'module_dynamique'	xsd:float
	--- 'amortissement_acoustique'	xsd:float

A.4. Diapositives de la soutenance de doctorat

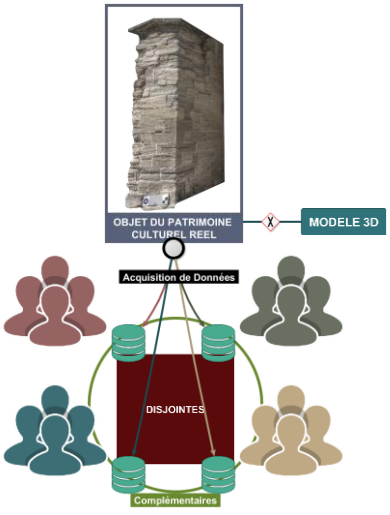


Sommaire

1 Introduction & Contexte
2 Données, Informations & Connaissances pour l'étude de la conservation
3 État de l'art sur les Systèmes de Gestion dans le domaine du patrimoine Culturel/Bâti
4 Une ontologie de domaine dédiée à la spatialisation des observations scientifiques menées sur le bâtiment
5 Implémentation informatique du système basée sur l'ontologie de domaine, & expérimentation
6 Conclusion & Perspectives

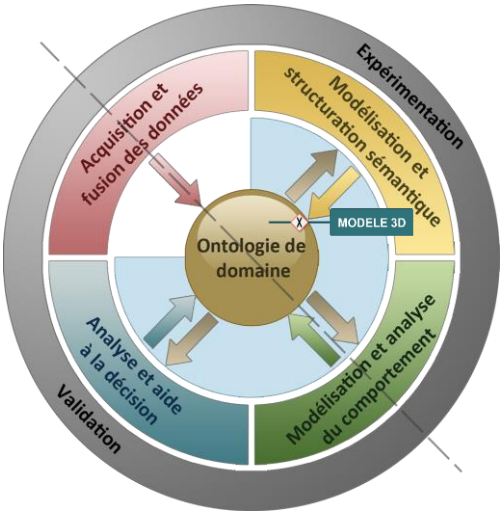
Contexte

- Constats :
  - Description et suivi de l'état de conservation d'un édifice
  - Nombre élevé et très hétérogène de sources documentaires et analytiques => disjointes
  - Diverses pratiques d'observations
  - Modèle 3D seul => insuffisant pour décrire la complexité de l'édifice
  - Divers experts
- Objectif :
  - Fédérer et archiver l'ensemble de ces ressources hétérogènes



Contexte

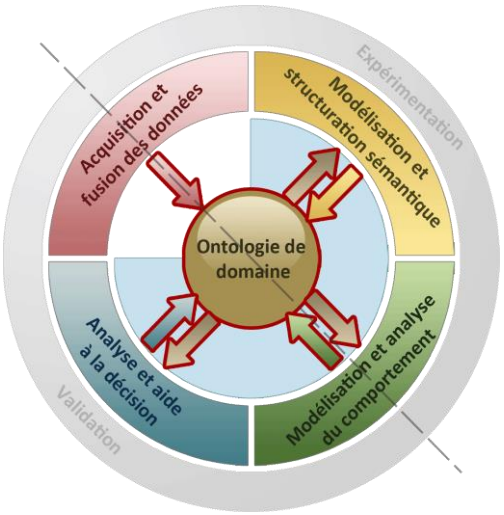
- Constats :
  - Description et suivi de l'état de conservation d'un édifice
  - Nombre élevé et très hétérogène de sources documentaires et analytiques => disjointes
  - Diverses pratiques d'observations
  - Modèle 3D seul => insuffisant pour décrire la complexité de l'édifice
  - Divers experts
- Objectif :
  - Fédérer et archiver l'ensemble de ces ressources hétérogènes
- Projet MONUMENTUM
  - MOdélisation NUMérique et gEstion de doNnées pour la coNservation des strucTUres Maçonnées
  - Financé par l'ANR



Le projet MONUMENTUM

Contribution scientifique

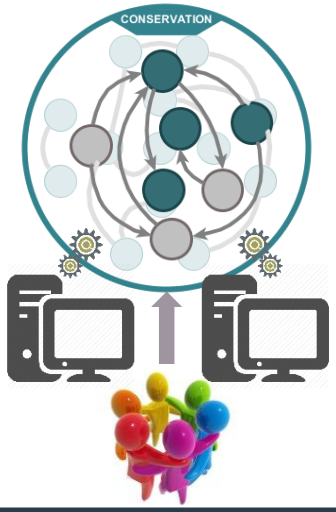
- Articulations possibles et réalisables grâce à une **Ontologie de domaine**
  - Formalisée, intégrée directement dans un système d'information.



Définition : **ontologie de domaine**

- « Une ontologie est définie comme une spécification explicite et formelle d'une conceptualisation partagée » [Grüber, 1998] (Informatique)
  - Conceptualisation : modèle abstrait de phénomène dans le monde
  - Spécification explicite : le type de concept utilisé et les contraintes de leurs utilisations => explicitement définis
  - Formelle : compréhensible par la machine
  - Partagée : centralisation des connaissances consensuelles acceptées par un groupe d'expert

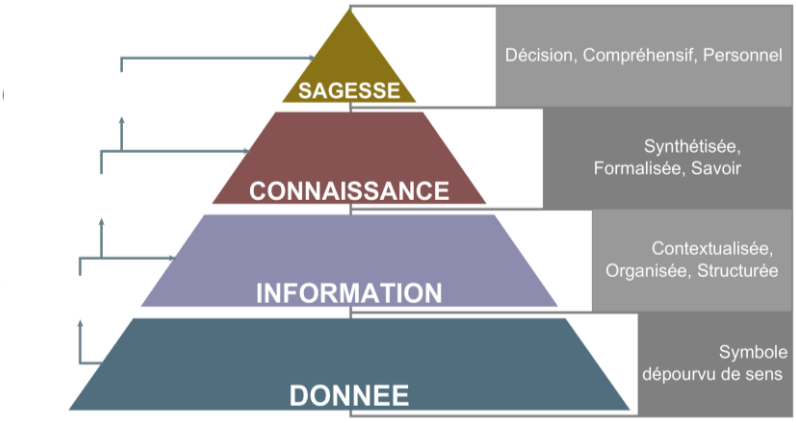
- C'est la formalisation des **connaissances** partagées relatives à un domaine.
  - Pour nous : la conservation du bâti maçonné



Sommaire

I
1 Introduction & Contexte
2 Données, Informations & Connaissances pour l'étude de la conservation
3 État de l'art sur les Systèmes de Gestion dans le domaine du patrimoine Culturel/Bâti
4 Une ontologie de domaine dédiée à la spatialisation des observations scientifiques menées sur le bâtiment
5 Implémentation informatique du système basée sur l'ontologie de domaine, & expérimentation
C
Conclusion & Perspectives

Définition : Donnée – Information – Connaissance

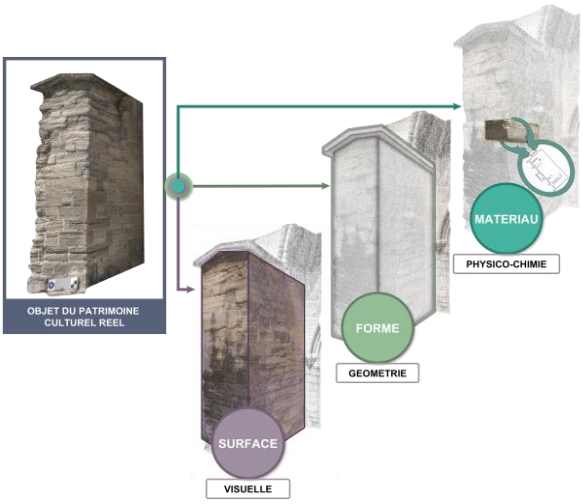


DIKW Pyramid [Liew A., 2013]

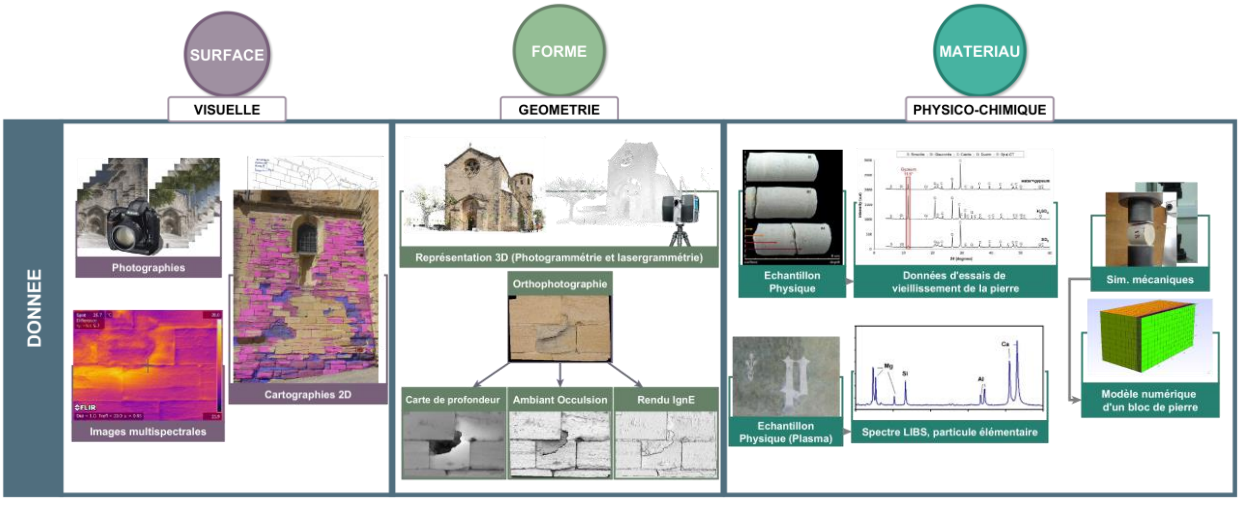
5 cm de diamètre, 24 cavités sur un bloc de pierre, est une altération de type Alvéolisation

Une démarche diagnostic identifiée

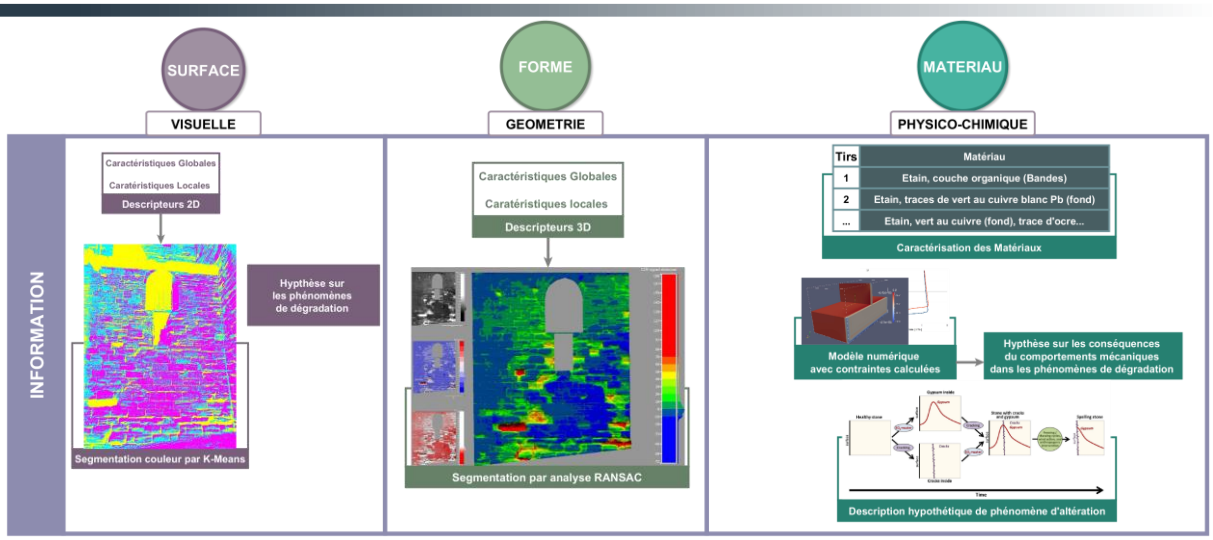
- Implication de cette pyramide dans le processus d'observation scientifique de 3 composantes spécifiques :
  - L'apparence visuel de la surface
  - La forme géométrique
  - Le comportement physico-chimique des matériaux



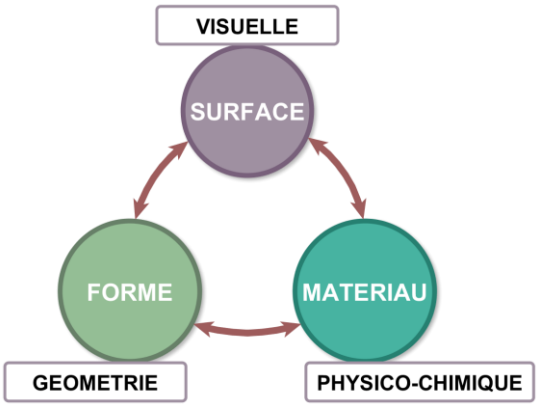
Données pour l'étude de la conservation du patrimoine



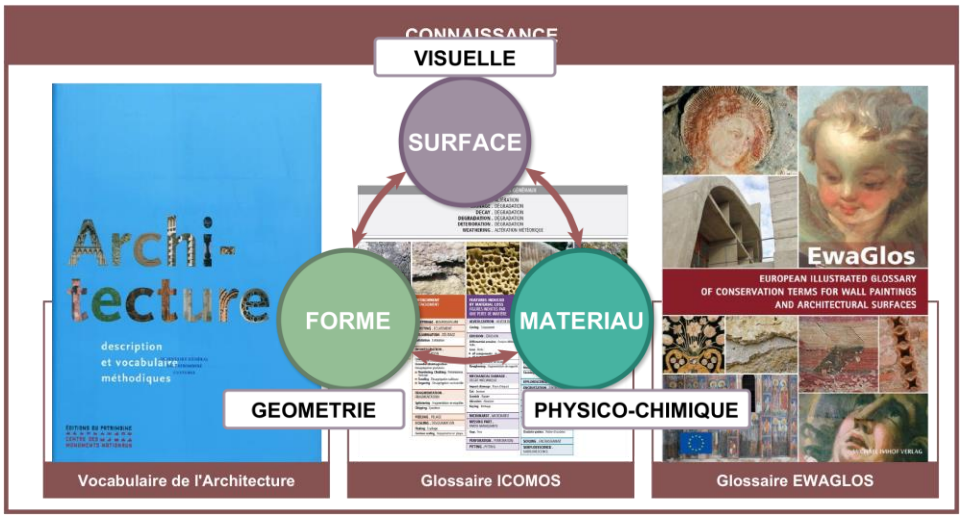
Informations pour la conservation du patrimoine



Connaissances pour la conservation du patrimoine



Connaissances pour la conservation du patrimoine



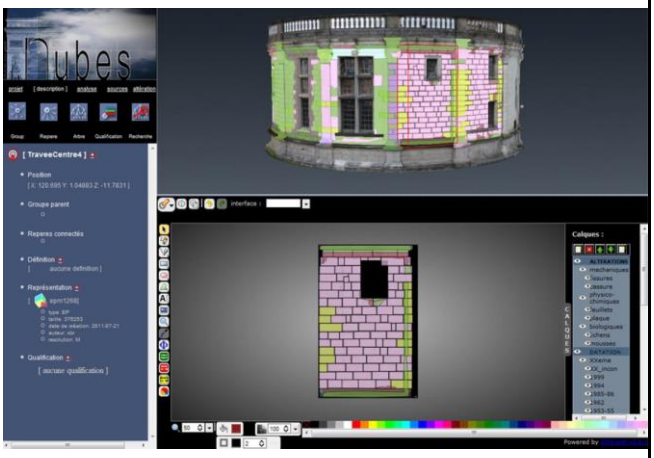
Sommaire

I
1 Introduction & Contexte
2 Données, Informations & Connaissances pour l'étude de la conservation
3 État de l'art sur les Systèmes de Gestion dans le domaine du patrimoine Culturel/Bâti
4 Une ontologie de domaine dédiée à la spatialisation des observations scientifiques menées sur le bâtiment
5 Implémentation informatique du système basée sur l'ontologie de domaine, & expérimentation
C
6 Conclusion & Perspectives

SI spatial pour la documentation et le suivi d'altération

- Projet SACRE : [Stefani C. et al., 2014]
  - Système d'Information pour la documentation numérique et le suivi des altérations de la pierre 3D Information
  - Capacités système :
    - Annotations (régions 2D) sur les textures du modèles
    - Analyses statistiques,
    - Calcul de distribution spatial de cartographie
    - Calcul d'intersection

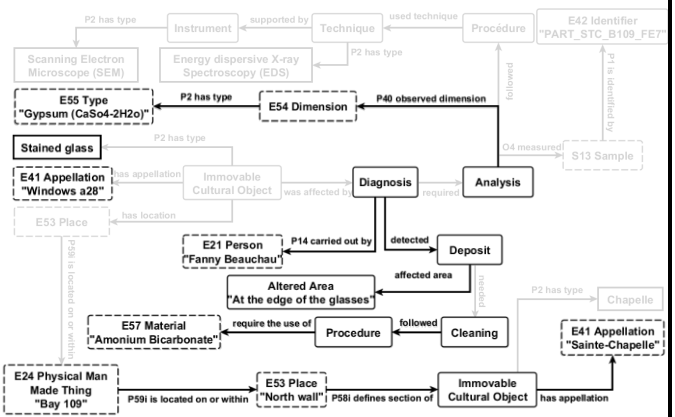
	Analyse Sémantique	Analyse Spatiale	Analyse Morphologique
SURFACE	★☆☆	★★☆	☆☆☆
FORME	☆☆☆	★★☆	☆☆☆
MATERIAU	★☆☆	★★☆	☆☆☆



Ontologie de domaine orientée patrimoine

- Modèle PARCOURS : **PA**trimoine culturel et **R**estauration-**C**onservation : **O**ntologie pour l'**U**sage d'un **R**éférentiel commun aux différentes **S**ources de données [Niang C. et al., 2015]
  - Modèle de référence : CIDOC-CRM
  - Harmonisation des données hétérogènes de sources distinctes :
  - Bases de données : **CASTOR & IMAGE** (imageries scientifiques, données d'analyses instrumentales)

	Analyse Sémantique	Analyse Spatiale	Analyse Morphologique
SURFACE	★★★	☆☆☆	☆☆☆
FORME	☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆
MATERIAU	★★★	☆☆☆	☆☆☆

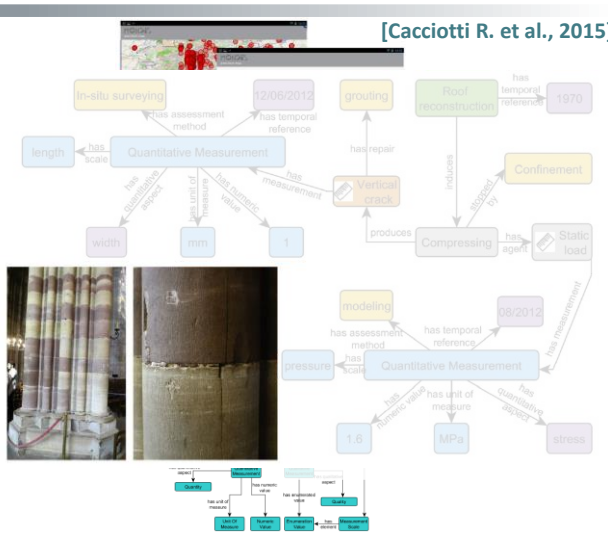


Ontologie de domaine orientée patrimoine

- MONDIS : MONument Damage Information System
  - Coordination automatique croisant :
    - Documentation sur les altérations du patrimoine culturel
    - Son diagnostic
    - Interventions des opérations de restaurations
  - Mise en relations de plusieurs composants
    - Description des composants et de la construction
    - Événements liés à l'objet du patrimoine
    - Diagnostics des altérations et interventions
    - Évaluation des risques et des mesures

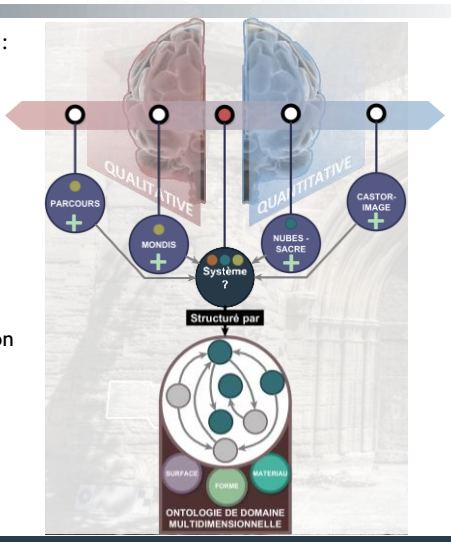
	Analyse Sémantique	Analyse Spatiale	Analyse Morphologique
SURFACE	★★★	★☆☆	☆☆☆
FORME	★★★	☆☆☆	☆☆☆
MATERIAU	★★★	☆☆☆	☆☆☆

[Cacciotti R. et al., 2015]



Bilan et hypothèse :

- Deux orientations principales pour l'analyse de la conservation :
  - Quantitative : données analytiques
  - Qualitative : connaissances du domaine
- Problèmes : exploitation +/- forte de ces deux orientations.
- Hypothèse : un SI structuré par une ontologie multidimensionnelle permet de relier les aspects quantitatifs et qualitatifs dans l'analyse des aspects diagnostics de la conservation du patrimoine culturel bâti.



Sommaire

1 Introduction & Contexte

2 Données, Informations & Connaissances pour l'étude de la conservation

3 État de l'art sur les Systèmes de Gestion dans le domaine du patrimoine Culturel/Bâti

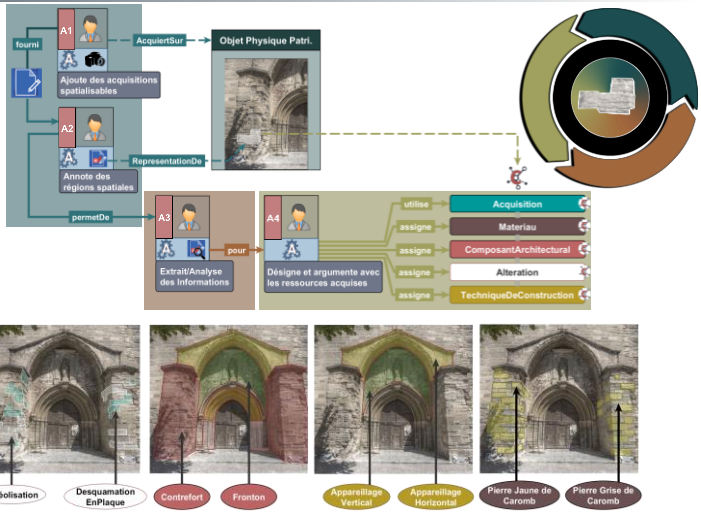
4 Une ontologie de domaine dédiée à la spatialisation des observations scientifiques menées sur le bâtiment

5 Implémentation informatique du système basée sur l'ontologie de domaine, & expérimentation

6 Conclusion & Perspectives

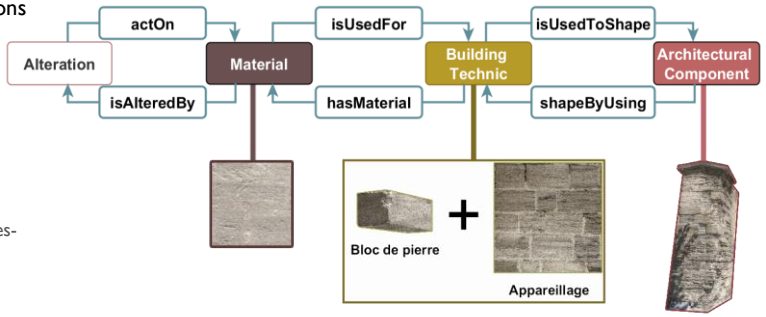
Activités du moteur de corrélation multidimensionnelle

- 4 activités : par un ou plusieurs experts
  - **A1** : Ajout d'acquisitions spatialisables
    - Mise à disposition d'un support d'analyse
  - **A2** : Processus d'annotation
    - Annotation réalisée et propagée => région blanche
    - **Analyse spatiale**
  - **A3** : Extraction d'informations géométrico-visuelles
    - **Analyse Morphologique**
  - **A4** : Étape d'appellation
    - **Analyse Sémantique**
    - Relier l'annotation avec un terme des 4 classes de description nécessaires et suffisantes
    - Argumenter en exploitant les acquisitions disponibles et/ou les connaissances propres
- Intégration des 3 dimensions pour décrire l'état de conservation du bâti

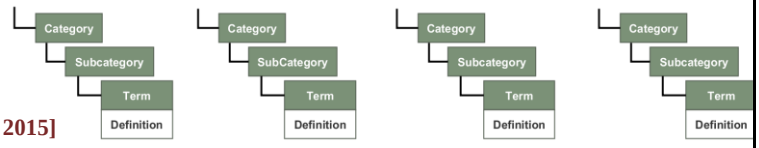


Ontologie de domaine dédiée à la conservation

- Structuration interne de l'ontologie de domaine dédiée au suivi des dégradations du bâti maçonné
  - Classes
  - Propriétés d'objet



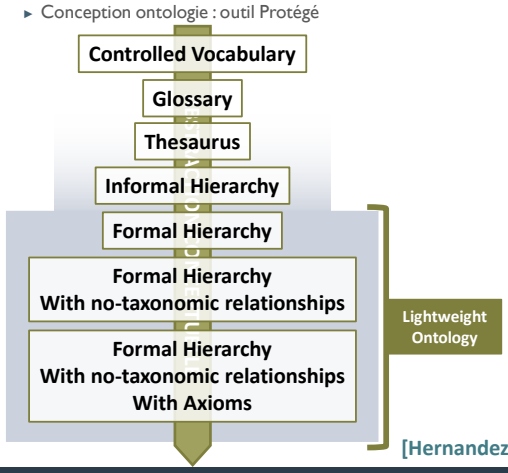
- Références :
  - Glossaire Pierre : glossaire illustré sur les formes de dégradations de la pierre [Verges-Belmin V., 2008]
  - Architecture : Description et Vocabulaire Méthodique [Pérouse de Montclos, 2004]



[Messaoudi T. et al, 2015]

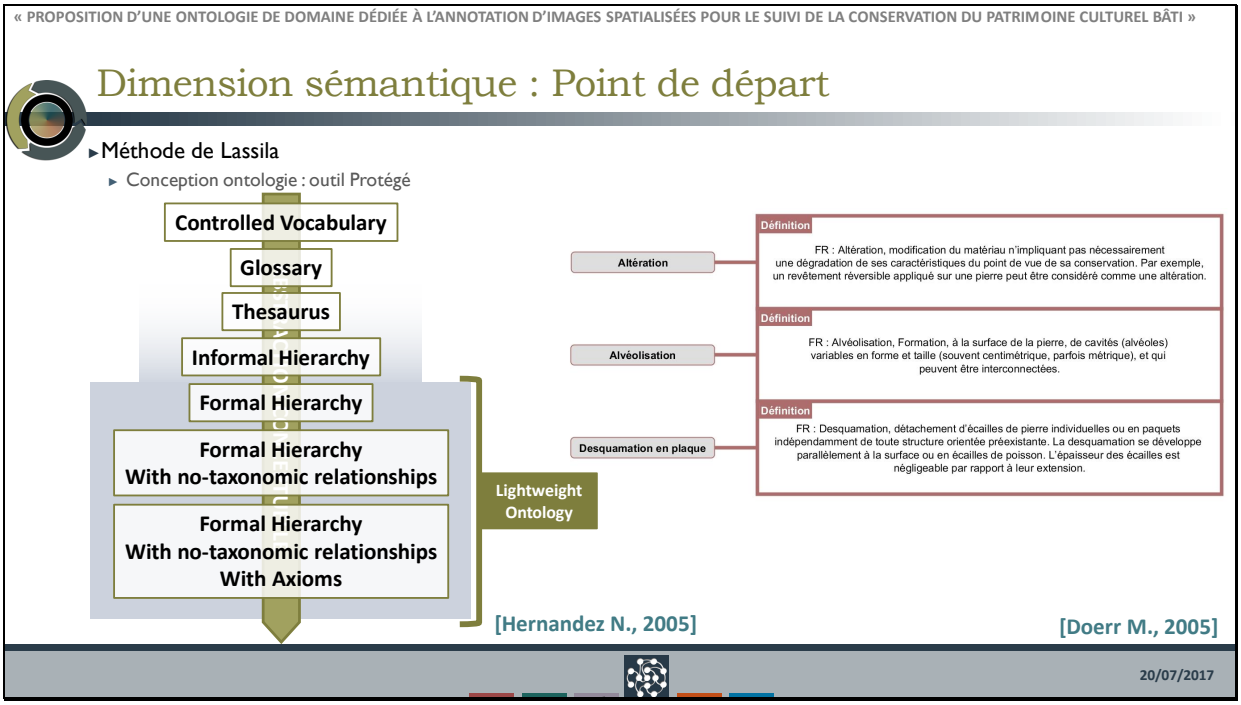
Dimension sémantique : Point de départ

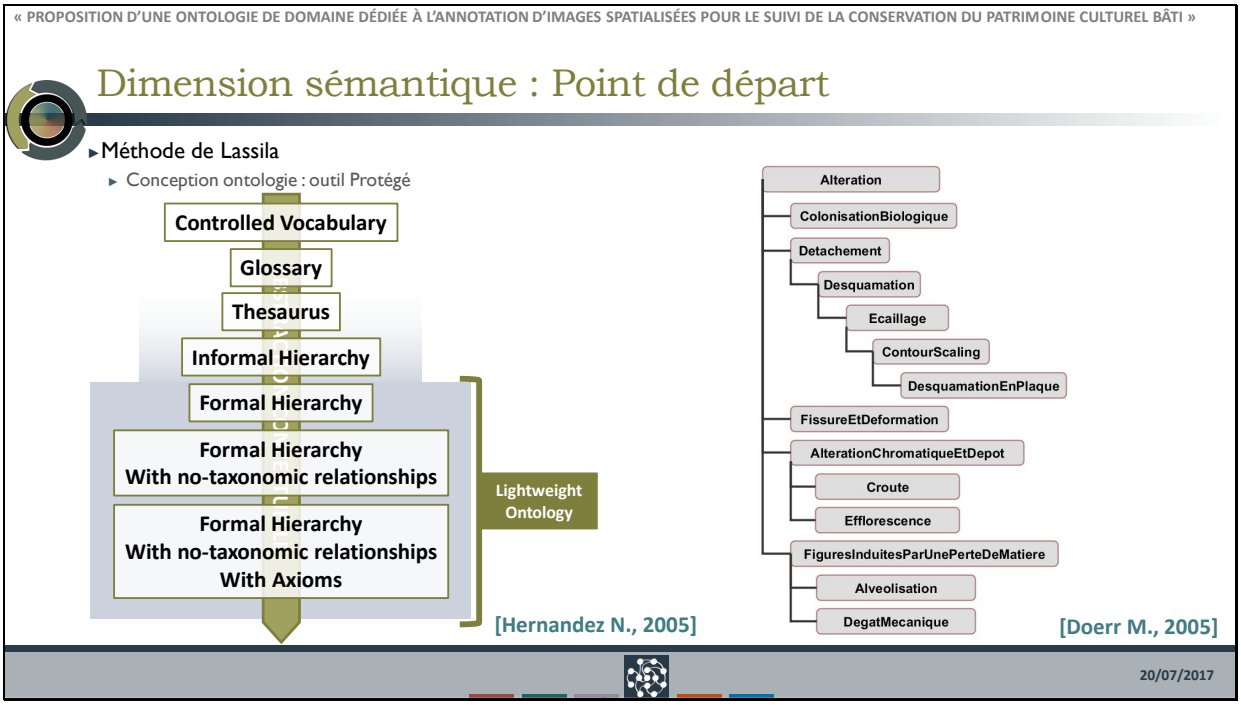
- Méthode de Lassila
  - Conception ontologie : outil Protégé



[Hernandez N., 2005]

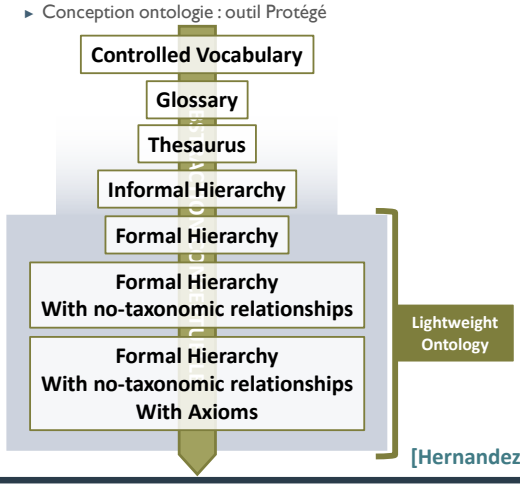
[Doerr M., 2005]


« PROPOSITION D'UNE ONTOLOGIE DE DOMAINE DÉDIÉE À L'ANNOTATION D'IMAGES SPATIALISÉES POUR LE SUIVI DE LA CONSERVATION DU PATRIMOINE CULTUREL BÂTI »
Dimension sémantique : Point de départ
Méthode de Lassila
Conception ontologie : outil Protégé
Controlled Vocabulary
Glossary
Thesaurus
Informal Hierarchy
Formal Hierarchy
Formal Hierarchy With no-taxonomic relationships
Formal Hierarchy With no-taxonomic relationships With Axioms
Lightweight Ontology
Altération
Définition
FR : Altération, modification du matériau n'impliquant pas nécessairement une dégradation de ses caractéristiques du point de vue de sa conservation. Par exemple, un revêtement réversible appliqué sur une pierre peut être considéré comme une altération.
Alvéolisation
Définition
FR : Alvéolisation, Formation, à la surface de la pierre, de cavités (alvéoles) variables en forme et taille (souvent centimétrique, parfois métrique), et qui peuvent être interconnectées.
Desquamation en plaque
Définition
FR : Desquamation, détachement d'écailles de pierre individuelles ou en paquets indépendamment de toute structure orientée préexistante. La desquamation se développe parallèlement à la surface ou en écailles de poisson. L'épaisseur des écailles est négligeable par rapport à leur extension.
[Hernandez N., 2005]
[Doerr M., 2005]
20/07/2017


« PROPOSITION D'UNE ONTOLOGIE DE DOMAINE DÉDIÉE À L'ANNOTATION D'IMAGES SPATIALISÉES POUR LE SUIVI DE LA CONSERVATION DU PATRIMOINE CULTUREL BÂTI »
Dimension sémantique : Point de départ
Méthode de Lassila
Conception ontologie : outil Protégé
Controlled Vocabulary
Glossary
Thesaurus
Informal Hierarchy
Formal Hierarchy
Formal Hierarchy With no-taxonomic relationships
Formal Hierarchy With no-taxonomic relationships With Axioms
Lightweight Ontology
Alteration
ColonisationBiologique
Detachement
Desquamation
Ecaillage
ContourScaling
DesquamationEnPlaque
FissureEtDeformation
AlterationChromatiqueEtDepot
Croute
Efflorescence
FiguresInduitesParUnePerteDeMatiere
Alveolisation
DegatMecanique
[Hernandez N., 2005]
[Doerr M., 2005]
20/07/2017

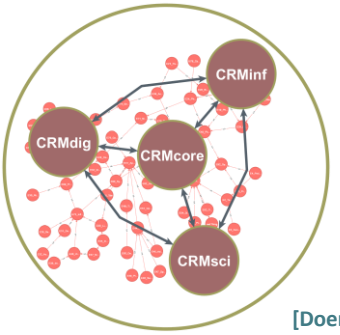
Dimension sémantique : Point de départ

- Méthode de Lassila
  - Conception ontologie : outil Protégé



[Hernandez N., 2005]

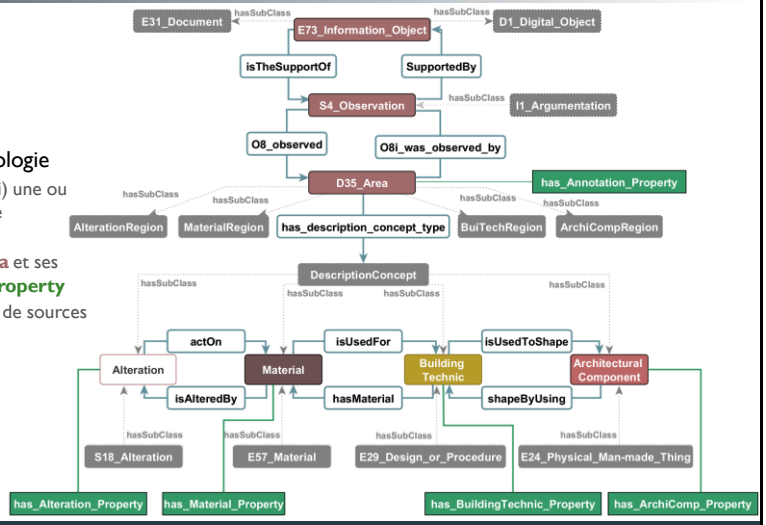
- CRM : Modèle de référence Conceptuel
  - Structure formelle de description et de documentation du patrimoine culturel
  - Initié après un long effort pour créer une base de données unifiée et cohérente => impossible
  - Standard ISO



[Doerr M., 2005]

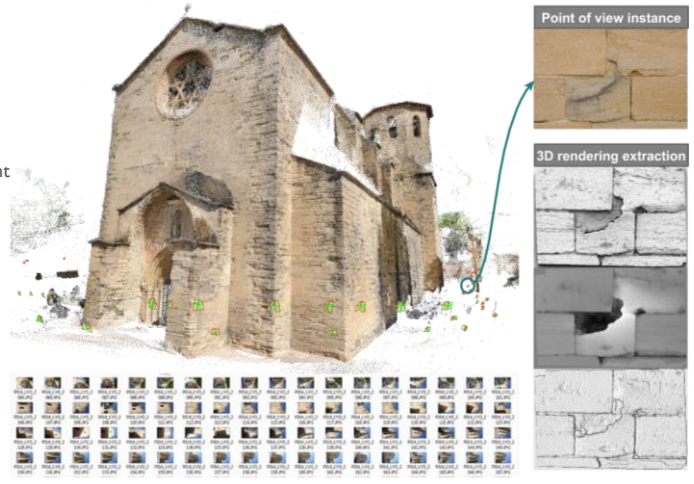
Dimension sémantique : contribution

- Mapping du CIDOC-CRM & notre ontologie
  - Observation scientifique (S4) : **observe** (O8i) une ou plusieurs régions décrites par les 4 classes de description
  - Annotation = individu de la classe **D35_Area** et ses propriétés de données **has_Annotation_Property**
  - Propriétés de données = données provenant de sources comme des SGBDs

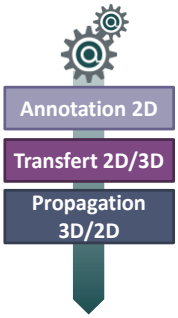


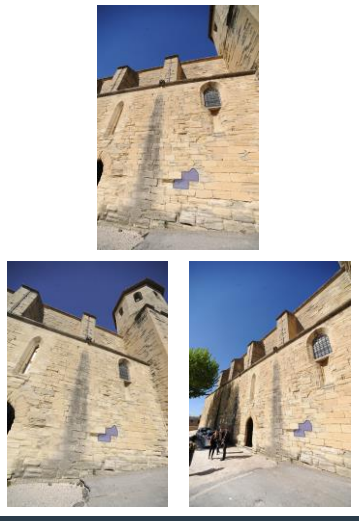
La dimension spatiale : point de départ

- Une ontologie de domaine dédiée à un outil d'annotation sémantique [Manuel, 2016]
  - Méthode d'orientation automatique d'images générant une relation bijective 2D/3D
    - Reconstruction photogrammétrique 3D
  - Images
    - haut niveau d'information
    - Supports efficaces pour des analyses cartographiques

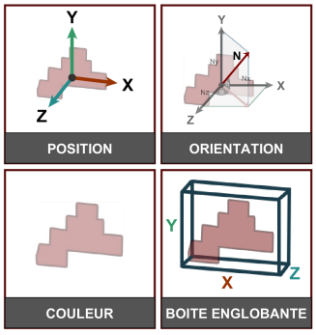


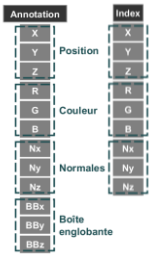
La dimension spatiale : point de départ

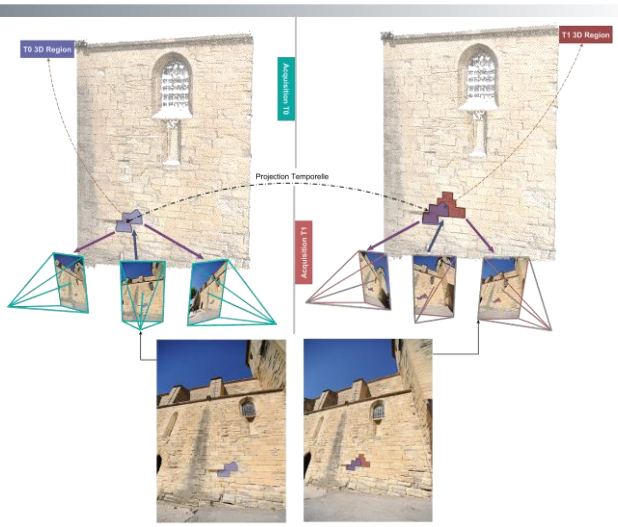




La dimension spatiale : contribution



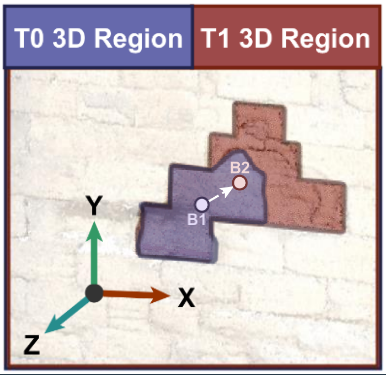


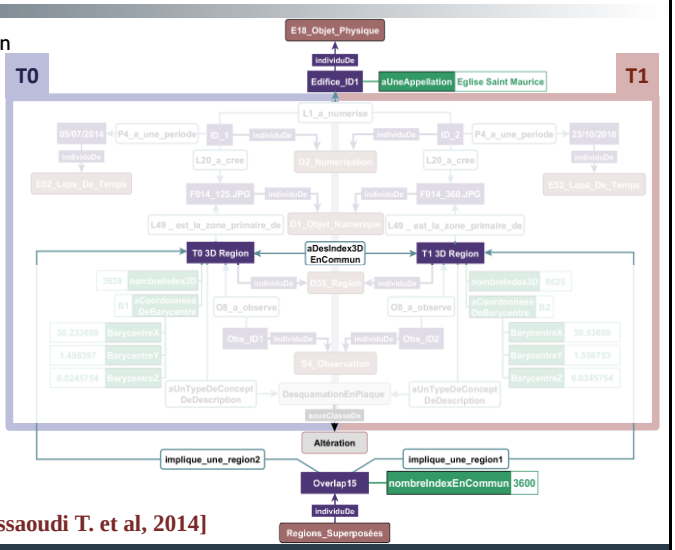


- Ajout d'images de détails
- Ajout d'images multi spectrales
- Ajout d'images multi temporelles

La dimension spatiale : contribution

- Potentiel conceptuel : description et quantification de deux annotations T0 => T1
  - Déplacement de B1 vers B2 : **0,313 m**
  - Rapport d'extension spatiale : T1 / T0 = **2,37**





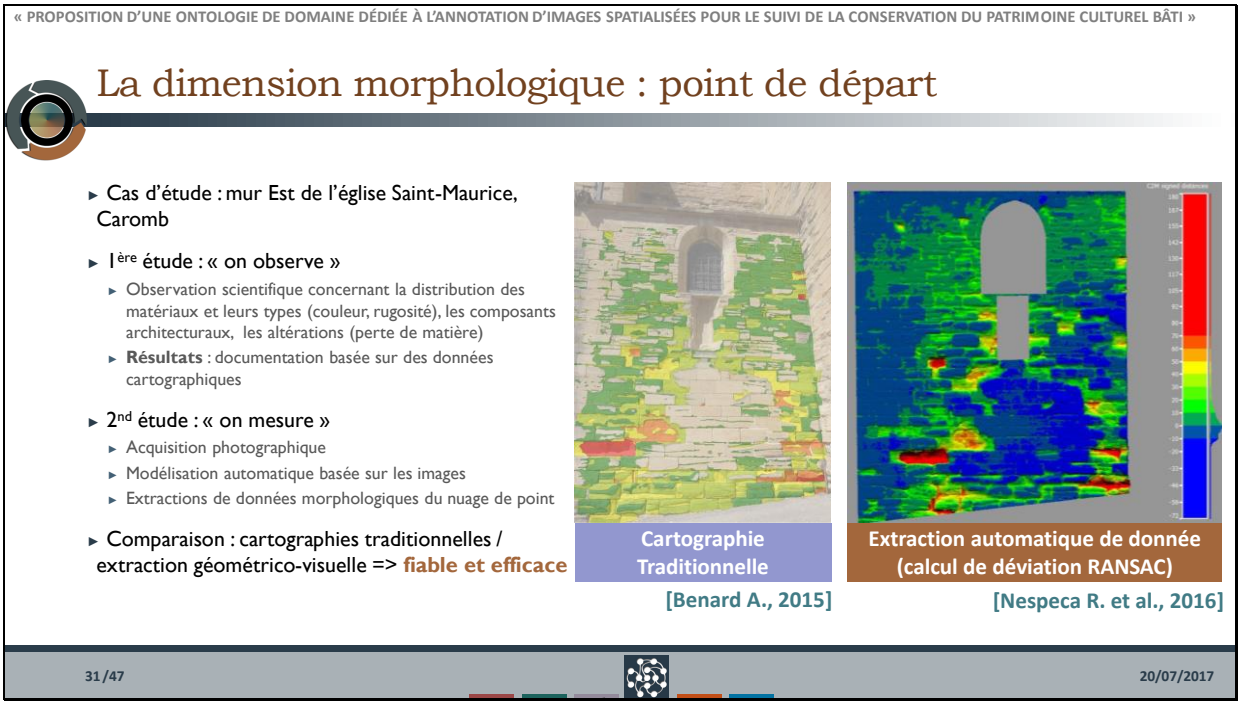
[Messaoudi T. et al, 2014]

Grâce à notre modèle développé dans la dimension sémantique, nous pourront donc quantifier et qualifier cette évolution. Pour une instance d'objet physique donné, nommé « Edifice_ID1 », appelé « Eglise Saint Maurice », plusieurs activités ont été réalisées. Une acquisition photographique « ID_1 » réalisée le « 07 juillet 2006 » a produit entre autres, l'image « F014_125 ». Cette image a été utilisée dans le processus de reconstruction du nuage de point T0. Ensuite, lors d'une observation nommée **«** Obs_ID1 », un expert a réalisé une région nommée « T0_3D_Region », sur cette image, et la désignée en tant qu'Altération de type « Desquamation en plaque ». Cette région possède des descripteurs tels que : le nombre d'index, puis les coordonnées de son barycentre « B1 ».

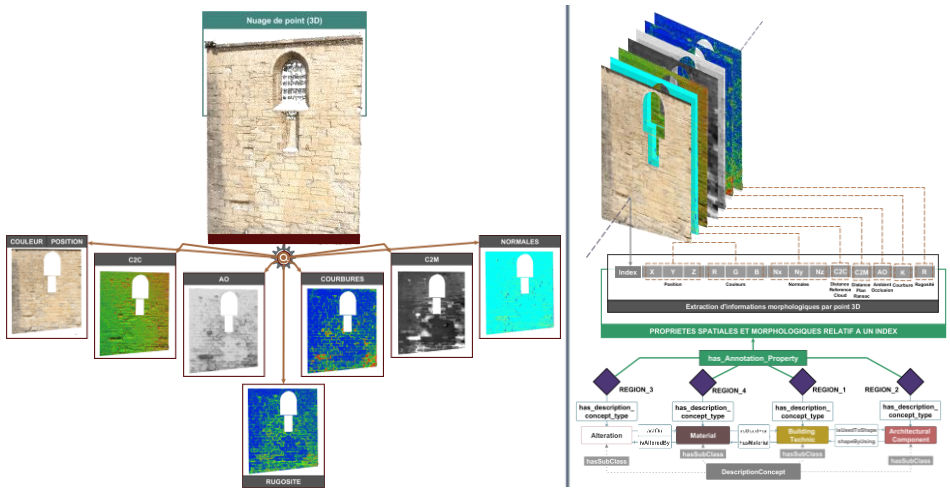
2 ans plus tard, à T1 une seconde acquisition « ID_2 » a lieu, produisant des images comme « F014_360 » sur laquelle une observation « Obs_ID2 » a été réalisée. Une région « T0_3D_Region » a été identifiée et désignée en tant que « DesquamationEnPlaque ». Les mêmes types de descripteurs sont disponibles.

En projetant l'annotation en T0 sur T1 nous pouvons voir qu'elles possèdent des index en commun donc se superposent spatialement. Un événement numérique nommé « Overlap15 » impliquant ces deux annotations a montré qu'ils partagent 3600 index. Ce qui nous permet de calculer (1) le déplacement 3D de B1 vers B2 qui est égal à 31,3 cm, et (2) et le rapport d'extension spatiale entre les deux annotations qui est de 2,37.

La relation sémantico-spatiale permet donc de fournir des informations cruciales à l'expert quant à l'évolution spatio-temporel d'une altération en l'occurrence la « desquamation en plaque ».

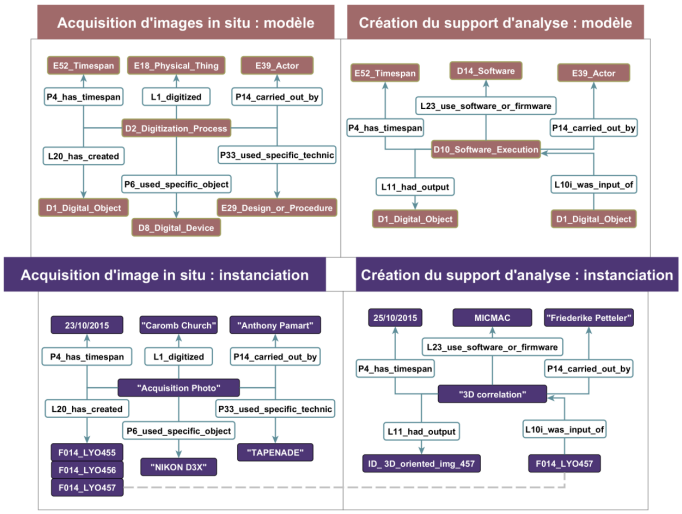


La dimension morphologique : contribution



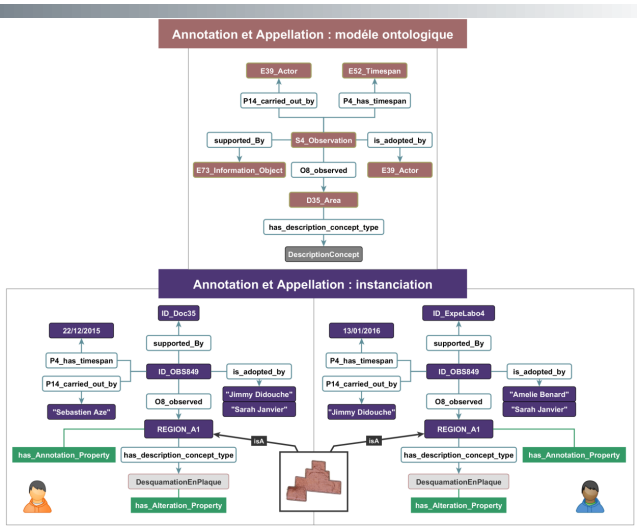
Activités du moteur de corrélation multidimensionnelle

- 4 activités décrites :
  - **AI** : Ajout d'acquisitions spatialisables
    - **Support d'analyse**



Activités du moteur de corrélation multidimensionnelle

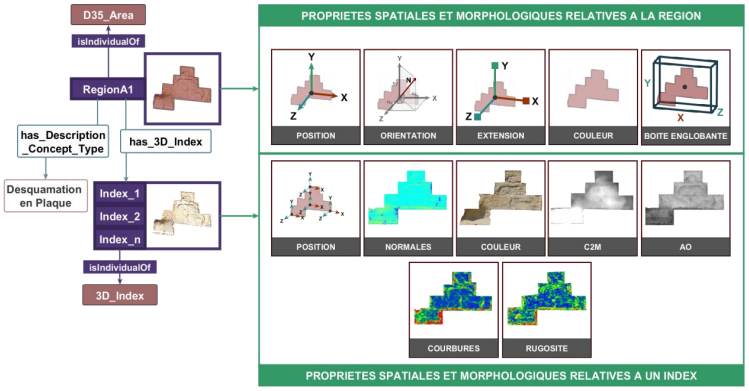
- 4 activités décrites :
  - **A1** : Ajout d'acquisitions spatialisables
    - **Support d'analyse**
  - **A2** : Processus d'annotation
    - **Analyse spatiale**
  - **A3** : Extraction d'informations géométrico-visuelles
    - **Analyse Morphologique**
  - **A4** : Étape d'appellation
    - **Analyse Sémantique**



« PROPOSITION D'UNE ONTOLOGIE DE DOMAINE DÉDIÉE À L'ANNOTATION D'IMAGES SPATIALISÉES POUR LE SUIVI DE LA CONSERVATION DU PATRIMOINE CULTUREL BÂTI »

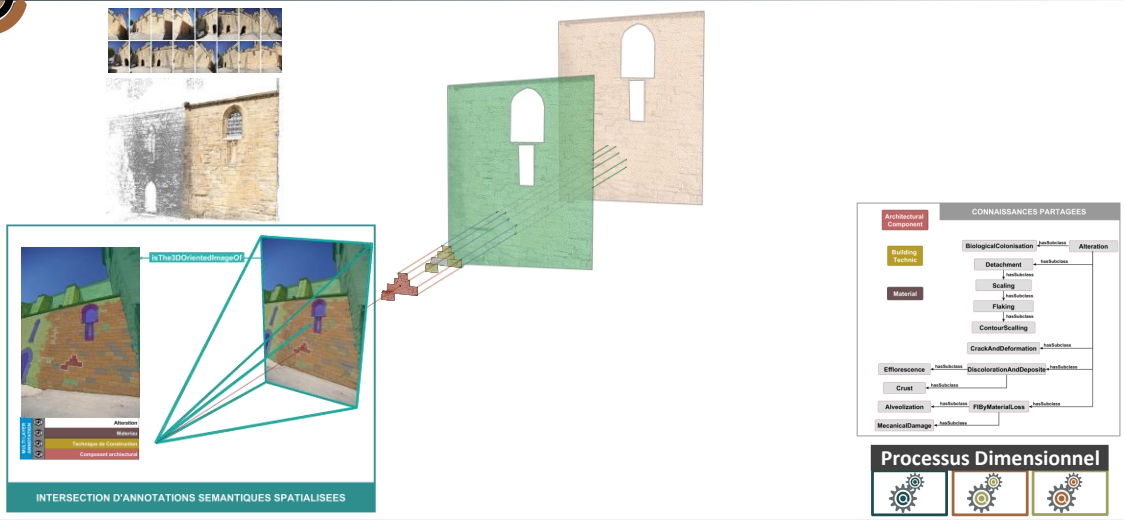
Activités du moteur de corrélation multidimensionnelle

- 4 activités décrites :
  - **A1** : Ajout d'acquisitions spatialisables
    - **Support d'analyse**
  - **A2** : Processus d'annotation
    - **Analyse spatiale**
  - **A3** : Extraction d'informations géométrico-visuelles
    - **Analyse Morphologique**
  - **A4** : Étape d'appellation
    - **Analyse Sémantique**



Moteur de corrélation multidimensionnel

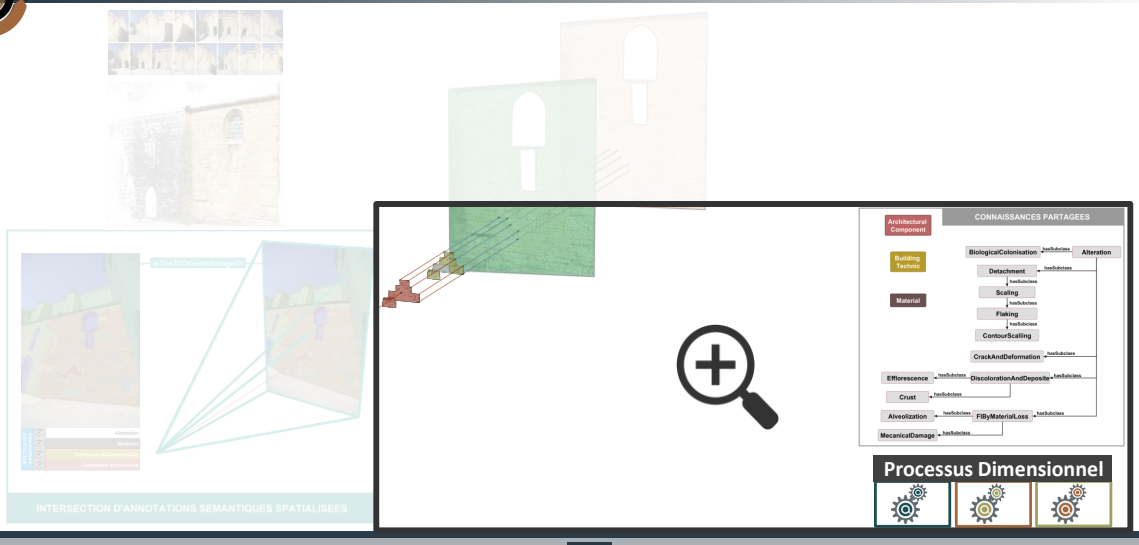
[Messaoudi T. et al, 2017]



« PROPOSITION D'UNE ONTOLOGIE DE DOMAINE DÉDIÉE À L'ANNOTATION D'IMAGES SPATIALISÉES POUR LE SUIVI DE LA CONSERVATION DU PATRIMOINE CULTUREL BÂTI »

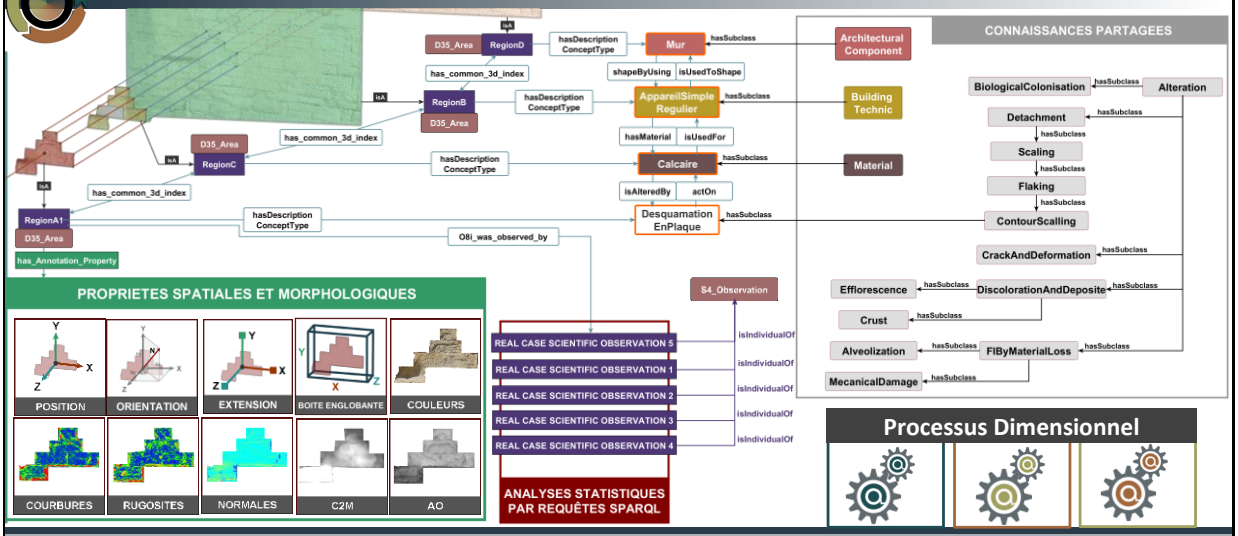
Moteur de corrélation multidimensionnel

[Messaoudi T. et al, 2017]



Moteur de corrélation multidimensionnel

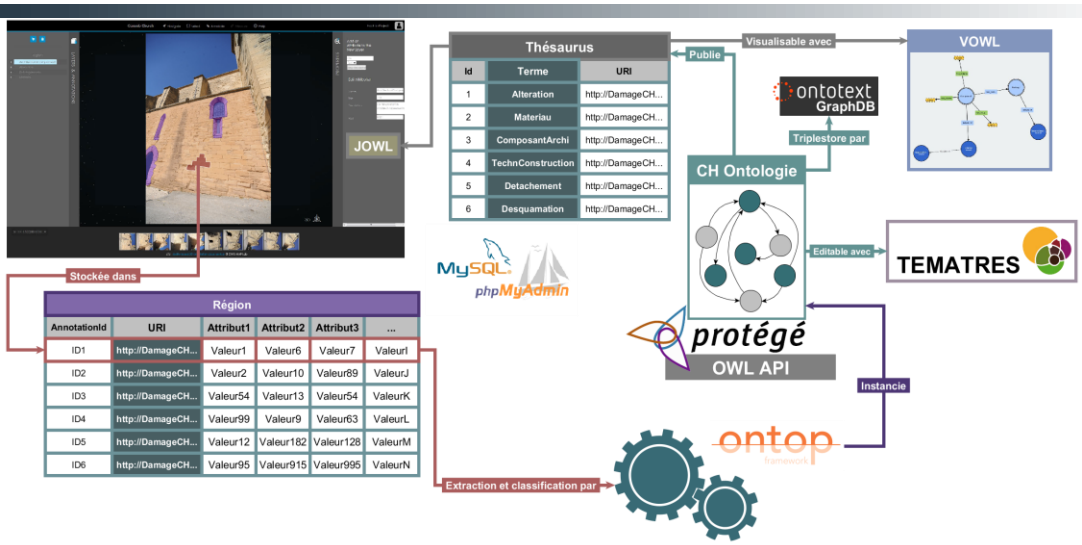
[Messaoudi T. et al, 2017]



Sommaire

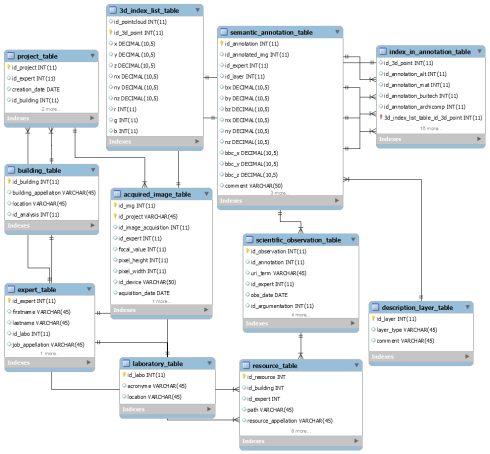
1 Introduction & Contexte
2 Données, Informations & Connaissances pour l'étude de la conservation
3 État de l'art sur les Systèmes de Gestion dans le domaine du patrimoine Culturel/Bâti
4 Une ontologie de domaine dédiée à la spatialisation des observations scientifiques menées sur le bâtiment
5 Implémentation informatique du système basée sur l'ontologie de domaine, & expérimentation
6 Conclusion & Perspectives

Plan d'implémentation informatique



Expérimentation : environnement de développement

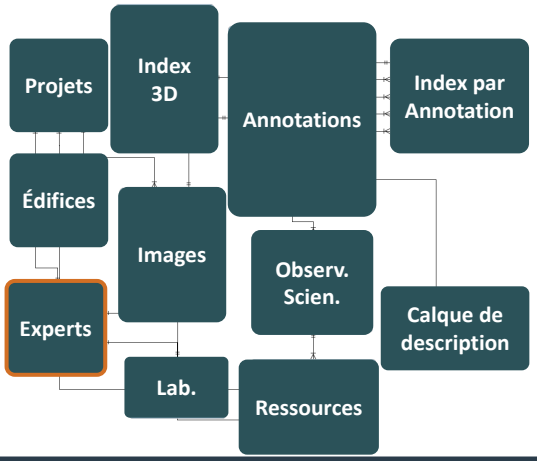
- Constitution de la Base de Données Relationnelle : MySQL



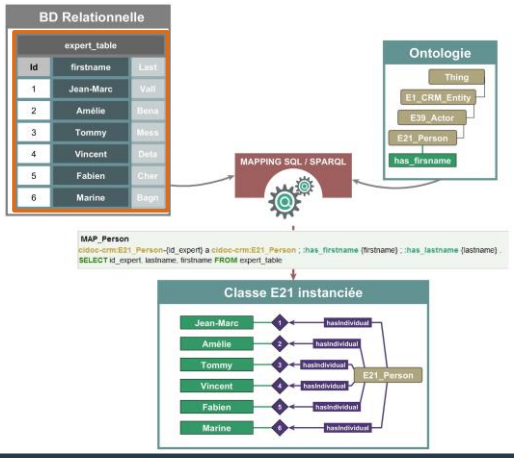
- Fusion de l'ontologie de domaine et de la base de donnée : Mapping SQL/SPARQL par ONTOP

Expérimentation : environnement de développement

- Constitution de la Base de Données Relationnelle : MySQL



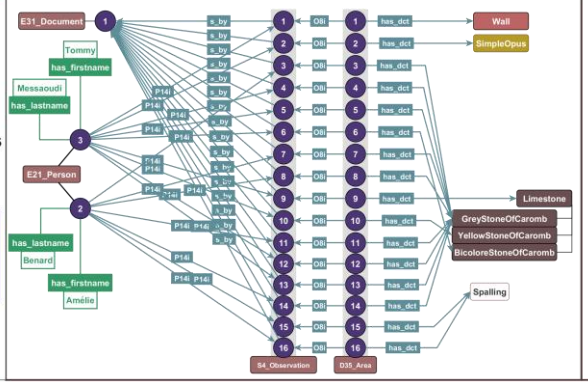
- Fusion de l'ontologie de domaine et de la base de donnée : Mapping SQL/SPARQL par ONTOP



Expérimentation : requêtes possibles et résultats

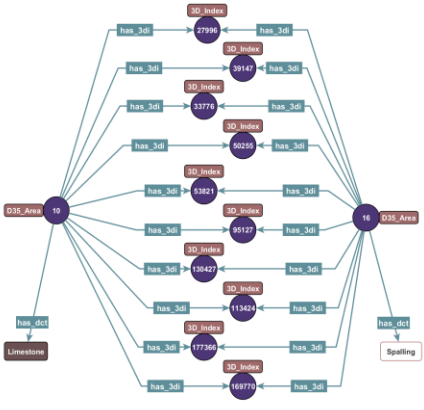
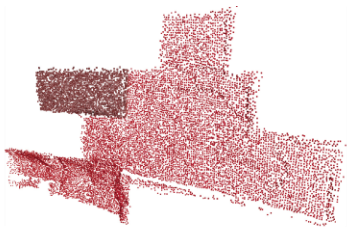
- Église Saint Maurice de Caromb , Mur Est : 16 Observations scientifiques sur les 4 calques de description

Expérimentation : requêtes possibles et résultats

Requête	Graphe	Visualisation
• Paramètres : Class Edifice => Appellation Eglise Saint Maurice • Requête : Observations scientifiques • Résultat : Observation 6, Personne 3, Région 6, Type Pierre Bicolore de Caromb, Document 1		

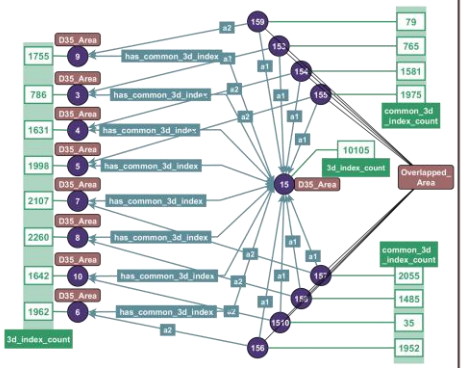
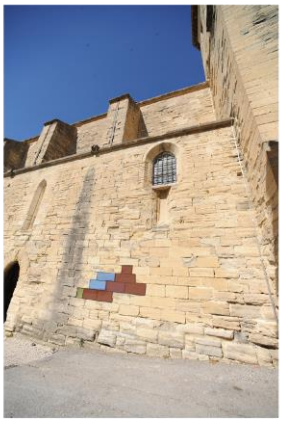
« PROPOSITION D'UNE ONTOLOGIE DE DOMAINE DÉDIÉE À L'ANNOTATION D'IMAGES SPATIALISÉES POUR LE SUIVI DE LA CONSERVATION DU PATRIMOINE CULTUREL BÂTI »

Expérimentation : requêtes possibles et résultats

Requête	Graphe	Visualisation
• Paramètres : - région classe Matériau => Calcaire ; - région classe Altération => Desquamation en plaque; • Requête : Superpopsition spatial => index en commun • Résultat: Région 10 type Calcaire <=> Région 15 type Desquamation en plaque		

20/07/2017

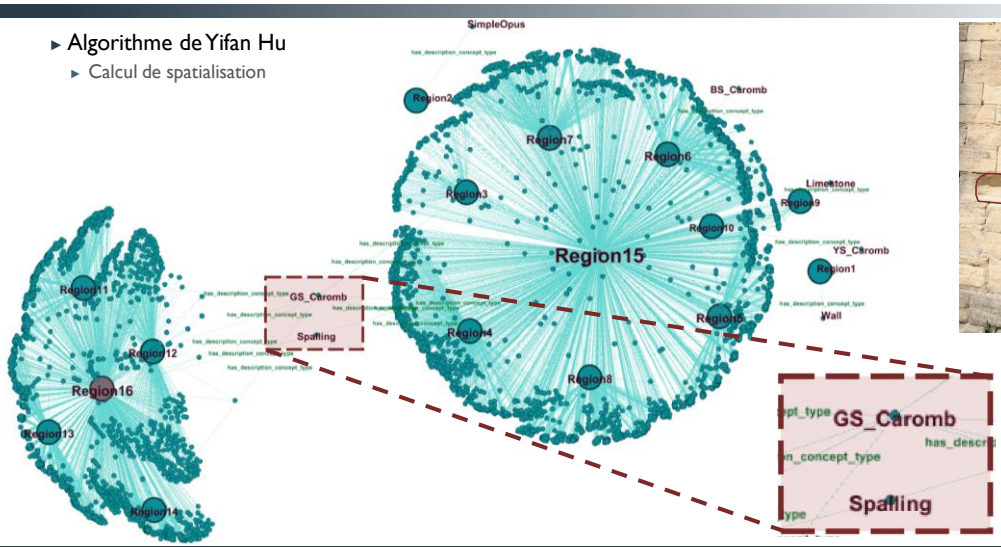
Expérimentation : requêtes possibles et résultats

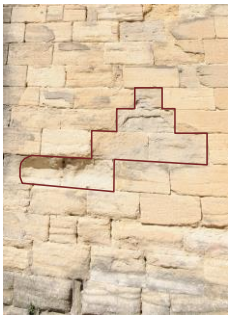
Requête	Graphe	Visualisation
• Paramètres : - région classe Matériau => Calcaire ; - rel:agitSur - région classe Altération => Desquamation en plaque ; • Requête : % Superpopsition spatial • Résultat : Région 6 type Calcaire / Région 15 type Desquamation en plaque => 99.4 % Région 5 type Calcaire / Région 15 type Desquamation en plaque => 98.8 %		

20/07/2017

Expérimentation : requêtes possibles et résultats

- Algorithme de Yifan Hu
  - Calcul de spatialisation





20/07/2017

Sommaire

1 Introduction & Contexte
2 Données, Informations & Connaissances pour l'étude de la conservation
3 État de l'art sur les Systèmes de Gestion dans le domaine du patrimoine Culturel/Bâti
4 Une ontologie de domaine dédiée à la spatialisation des observations scientifiques menées sur le bâtiment
5 Implémentation informatique du système basée sur l'ontologie de domaine, & expérimentation
6 Conclusion & Perspectives

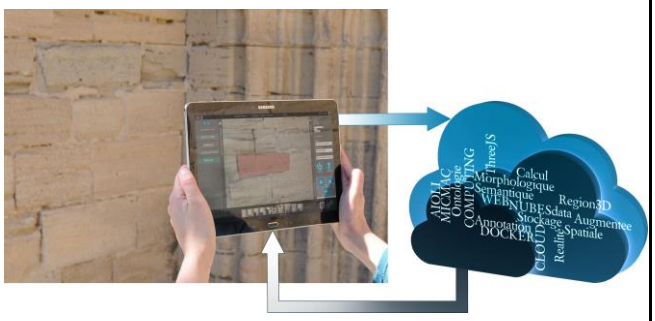
Conclusion

- Moteur de corrélation sémantique multidimensionnel
  - Une manière de spatialiser et de décrire des observations scientifiques par les experts d'un domaine à travers 3 dimensions
  - Une manière de générer des informations pour les intégrer dans les connaissances partagées
  - Notion de « Continuum information » comme clé pour l'interconnexion des ressources

- Limites
  - Des données à saisir manuellement => chronophage
  - Peu d'annotation pour explorer les potentialités
  - Gestion des états temporels

Perspectives

- À long terme :
  - Système combinant : Raisonnement basé sur les cas (RBC) + Machine Learning => guider l'expert
  - Production participative d'observation : le crowdsourcing
  - Observation scientifique in situ en exploitant les technologies et techniques de Réalité Augmentée (Thèse V. Abergel 2017-(2020))
- Contributions futures :
  - Intégration de l'aspect mécanique des structures
  - Approche de reconstruction 3D d'objets du patrimoine basée sur les ontologies => Projet PASLE IMPULSION



Publications

- **Publications dans des actes de congrès avec comité de lecture**
  - T. Messaoudi, A. Manuel, E. Gattet, L. De Luca, & P. Véron. Laying the foundation for an Information System Dedicated to Heritage Building Degradation Monitoring Based on the 2D/3D Semantic Annotation of Photographs, Eurographics Workshop on Graphics and Cultural Heritage - Short Papers Posters, Darmstadt, Germany, 6-8 October 2014.
  - Jacquot, K., Messaoudi, T., & de Luca, L. (2015, September). Knowledge-based approach for the 3D modeling of masonry structures. In 2015 Digital Heritage (Vol. 2, pp. 189-190). IEEE.
  - Messaoudi, T., De Luca, L., & Véron, P. (2015, September). Towards an ontology for annotating degradation phenomena. In 2015 Digital Heritage (Vol. 2, pp. 379-382). IEEE.
- **Publication dans une revue avec comité de lecture**
  - Messaoudi T. , Véron P. & De Luca L.. An ontological model for the reality-based 3D annotation of heritage building conservation state, JCH (Journal of Cultural Heritage) (Accepted, in edition).