



HAL
open science

Optimisation de la gestion du patrimoine culturel et historique à l'aide des méthodologies avancées d'inspection

Clémence Cauvin-Hardy

► **To cite this version:**

Clémence Cauvin-Hardy. Optimisation de la gestion du patrimoine culturel et historique à l'aide des méthodologies avancées d'inspection. Génie civil. Université Clermont Auvergne [2017-2020], 2020. Français. NNT : 2020CLFAC057 . tel-03190094

HAL Id: tel-03190094

<https://theses.hal.science/tel-03190094>

Submitted on 6 Apr 2021

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

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

UNIVERSITÉ CLERMONT AUVERGNE

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES POUR L'INGÉNIEUR DE CLERMONT-FERRAND

THÈSE

Présentée par

Clémence Cauvin-Hardy

Pour obtenir le grade de
DOCTEUR
SPÉCIALITÉ : GÉNIE CIVIL

Titre de la thèse :

*Optimisation de la gestion du patrimoine culturel et historique à l'aide des
méthodologies avancées d'inspection*

Soutenue publiquement le 8 décembre 2020

Jury :

M. Jean-Louis Batoz	Professeur des Universités, Université de technologie de Compiègne	Président
Mme. Anne Chabas	Professeur des Universités, Université Paris Est Créteil	Rapporteur
M. Youssef Diab	Professeur des Universités, Université Gustave Eiffel	Rapporteur
Mme. Sylvie Yotte	Professeur des Universités, Université de Limoges	Examineur
M. Alaa Chateauneuf	Professeur des Universités, Université Clermont Auvergne	Directeur
Mme. Mathilde Lavenu	Maître de Conférences, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Clermont-Ferrand	Encadrante
Mme. Aurélie Talon	Maître de Conférences, Université Clermont Auvergne	Encadrante

A mes amours,
sans qui ce travail n'aurait été possible.

« Mais si belle qu'elle se soit conservée en vieillissant, il est difficile de ne pas soupirer, de ne pas s'indigner devant les dégradations, les mutilations sans nombre que simultanément le temps et les hommes ont fait subir au vénérable monument. »

Victor Hugo, Notre-Dame de Paris (1831)

Remerciements

Cette thèse n'était pas prévue. Mon stage de fin d'études s'est déroulé au sein d'une entreprise spécialisée dans l'étude des matériaux des Monuments Historiques. J'ai été recrutée. Cette expérience très formatrice a duré sept années. Le jour où l'offre de thèse est parue, je me suis dit que mon profil atypique conviendrait parfaitement, j'ai donc postulé. Je n'attendais pas de retour, mais quelques jours après j'ai rencontré celui qui serait mon futur directeur de thèse, et celui-ci me propose de travailler ensemble. Je doute, revenir à l'école, venir à Clermont Ferrand, trop d'attache là où je vis pour tout quitter. On me propose de télétravailler en partie. J'accepte. L'aventure commence...

Cette thèse s'est déroulée au sein de l'axe Mécanique, Génie Mécanique, Génie Civil et Génie Industriel de l'Institut Pascal dont je remercie les directeurs associés Nicolas Gayton pour l'axe et Evelyne GIL pour l'Institut. Je voudrais également remercier Christian Larroche directeur de Polytech Clermont pour m'avoir accueilli lors de mes déplacements dans ses locaux.

Mes remerciements vont en premier lieu à mes encadrants de thèse :

- Mon directeur de thèse, Alaa Chateaufort, sans qui cette aventure n'aurait pas pu avoir lieu. Alors merci Alaa, un grand merci même un énorme merci. Merci de m'avoir accordé ta confiance, de m'avoir acceptée. Je t'en serai éternellement reconnaissante. Merci.
- Ma co-encadrante de thèse, Aurélie Talon, merci, sans qui le contenu de ces travaux de thèse n'aurait pas été le même. Pendant ces trois ans, tu m'as orienté pour que j'arrive à cette qualité de résultats. Merci pour tes nombreuses relectures. Merci.
- Ma co-encadrante de thèse, Mathilde Lavenu, merci d'avoir accepté cet encadrement. Merci pour ton support scientifique en termes de conservation et restauration des Monuments Historiques et merci pour tes mises en relation. Merci.

Je remercie l'ensemble de mon jury, dont le président -Jean-Louis Batoz-, les rapporteurs -Anne Chabas et Youssef Diab-, l'examinateur -Sylvie Yotte-, d'avoir accepté de rapporter et d'examiner mon travail. Je remercie également les membres extérieurs de mes deux comités de thèse d'avoir accepté d'y participer et grâce à vos remarques d'avoir fait avancer mon travail. Un grand merci à Anne Chabas – Responsable Pédagogique du master 2 MAPE - et à Aline Magnien – Directrice du LRMH.

Cette thèse a eu lieu dans le cadre du projet HeritageCare. Les réunions avec les différents partenaires français, portugais et espagnol du projet ont jalonné mes trois années de thèse, donnant lieu aux discussions animées et constructives qui ont nourri mes réflexions. Qu'ils en soient tous remerciés. J'en profite pour remercier les membres du Campus de Azurém de m'avoir accueilli dans leurs locaux lors de l'été 2017 en particulier Maria José Morais, Maria Giovanna Masciotta et Luis Ramos.

Je remercie également l'ensemble des personnes qui m'ont ouvert les portes de leur propriété, dont la commune de Chambon-sur-Lac pour la chapelle funéraire, monsieur Sébastien Gouttebel de la commune Murol pour le château, la commune de Charroux pour la porte d'Occident, Agnès Moyer pour le prieuré, la commune de Sarlat pour l'ancienne église Sainte-Marie, la mairie de Saint-Pourçain pour la tour de l'horloge, la commune de Mozac pour l'abbaye, Jacques Retournaud pour la chapelle de Notre-Dame de Foncourrieu, la ville de Vichy pour l'Eglise Saint-Blaise et le kiosque, Christophe Debuire représentant la ville de Clermont-Ferrand pour la chapelle de l'hôpital et le marché Saint Joseph, Christophe Bascoul pour la villa Russe. L'ensemble de ces échanges ont alimenté les travaux de ma thèse.

Un merci à l'équipe de formation de Génie Civil de Polytech pour m'avoir permis de vous accompagner aux pauses café et aux repas du midi. Et merci à l'ensemble des doctorants que j'ai pu croiser, plus ou moins longtemps, pendant ces trois années. Elodie merci d'avoir été là pour moi lorsque j'étais à l'Université. Merci à Yasser, stagiaire, qui m'a aidé dans la rédaction des rapports et merci à Jean-Baptiste, stagiaire, pour ton travail effectué sur le développement du HBIM.

Merci à ma famille et à mes amis. Merci aux personnes qui ont cru en moi pour la réalisation de ce projet fou et ambitieux, merci à eux de m'avoir soutenu de quelque manière qui soit. Merci à ma pupuce qui par ses ronronnements ont été un réconfort et un soutien. Ma mémé, mon pépé et Michel, vous auriez été tellement fières de moi.

Le mot de la fin revient à mes deux amours ; Fabrice, c'est grâce à toi que j'en suis arrivée là et toi, mon petit Elias, qui a surgit pendant ces travaux, merci d'avoir pointé le bout de ton petit nez.

Résumé

La thèse porte sur l'optimisation de la gestion du patrimoine culturel et historique à l'aide des méthodologies avancées d'inspection tout en s'appuyant sur le projet HeritageCare.

La réponse à cette problématique est posée en cinq chapitres : (1) un état de l'art des méthodologies de gestion préventive, du projet HeritageCare et de l'identification de l'état de dégradation, (2) la mise en place de la méthodologie générale de la gestion préventive décomposée en quatre étapes (l'anamnèse, le diagnostic, la thérapie et le contrôle), (3) la proposition de modèles d'agrégation (4), les résultats de l'application de la démarche de gestion préventive et enfin (5) ceux de l'application des modèles. Ces derniers permettent de hiérarchiser les bâtis sur la base de 37 critères organisés en sous critères et indicateurs, de mettre en évidence la prise de décision des propriétaires sur la base de matrice de criticité combinant les valeurs des indicateurs, de déterminer la durée de vie résiduelle des bâtis sur la base de courbes d'altérations, de proposer et de hiérarchiser des actions de maintenance en s'appuyant sur une base de données développée.

La méthodologie est illustrée par son application à quatorze bâtis représentant le patrimoine culturel et historique français.

Mots clefs : agrégation des données, patrimoine culturel et historique, gestion préventive, conservation préventive, altération, indicateurs, base de données, travaux d'entretiens, prise de décision, HeritageCare.

Abstract

The objective of the thesis is to optimize the management of cultural and historical building heritage using advanced inspection methodologies with HeritageCare project.

The answer to this problem is detailed in five chapters: (1) a state of the art of preventive management methodologies, the HeritageCare project and the identification of the state of degradation, (2) the implementation of the general methodology on preventive management is decomposed into 4 steps (anamnesis, diagnosis, therapy and control), (3) proposal of aggregation models (4), results of the application of the management approach preventive and finally (5) the application of models. These make it possible to prioritize the buildings on the basis of 37 criteria organized into sub-criteria and indicators, highlight the decision-making of the owners on the basis of a criticality matrix combining the values of the indicators, determine the useful life of the buildings with the deterioration curves, propose and prioritize maintenance actions based on a developed database.

The methodology is illustrated by its application on fourteen buildings representing the French cultural and historical heritage.

Keywords: data aggregation, cultural and historical heritage, preventive management, preventive conservation, alteration, indicators, database, maintenance work, decision making, HeritageCare.

Table des matières

Remerciements.....	7
Résumé.....	9
Introduction générale.....	13
Chapitre 1 : Conservation préventive du patrimoine culturel et historique.....	15
Introduction	15
1.1 Contexte	15
1.1.1 Définition des travaux d'entretien.....	16
1.1.2 Budgets alloués aux travaux d'entretien	17
1.1.3 Conséquence de l'absence de conservation préventive	21
1.2 Etat de l'art des recherches, des méthodes et outils.....	23
1.2.1 Méthodologies de gestion préventive	23
1.2.2 Projet européen HeritageCare.....	27
1.2.3 Identification de l'état de dégradation	32
Synthèse et problématique	37
Chapitre 2 : Démarche d'une gestion préventive	39
Introduction	39
2.1 Etape 1 : Anamnèse.....	39
2.1.1 Recherche d'informations.....	40
2.1.2 Préparation de la mission et matériel nécessaire	41
2.2 Etape 2 : Diagnostic	43
2.2.1 Instruction pour l'inspection.....	43
2.2.2 Construction d'un atlas d'altération	46
2.2.3 Elaboration d'un référentiel des altérations.....	49
2.3 Etape 3 : Thérapie.....	51
.....	51
2.3.1 Entretien et mesures de prévention (ALT1)	51
2.3.2 Réparation modérée et investigation supplémentaire (ALT2).....	51
2.3.3 Intervention majeure basée sur un diagnostic (ALT3)	52
2.4 Etape 4 : Contrôle.....	55
Synthèse du deuxième chapitre	57
Chapitre 3 : Proposition de modèles d'agrégation	58
Introduction	58
3.1 Proposition d'indicateurs	58
3.1.1 Indicateurs.....	59
3.1.2 Hiérarchisation des critères	78
3.1.3 Synthèse de la pondération des critères.....	86

3.2	Proposition d'un modèle d'agrégation des indicateurs	87
3.2.1	Présentation du modèle	87
3.2.2	Synthèse du modèle d'agrégation	91
3.3	Détermination de la durée avec des courbes d'altération	92
3.4	Proposition d'une démarche de détermination des actions de maintenance.....	92
3.4.1	Hiérarchisation des actions possibles	92
3.4.2	Base de données des actions de maintenance	93
	Synthèse du troisième chapitre.....	94
Chapitre 4 : Présentation du corpus et application de la méthodologie de gestion au patrimoine culturel et historique		95
	Introduction	95
4.1	Présentation générale des bâtis du corpus	96
4.1.1	Choix du corpus.....	96
4.1.2	Présentation générale et gestion d'aujourd'hui.....	98
4.1.3	Synthèse.....	108
4.2	Application de la démarche de gestion préventive	110
4.2.1	Application de la méthodologie HeritageCare	110
4.2.2	Etat général des bâtis.....	115
4.2.3	Synthèse.....	131
	Synthèse du quatrième chapitre.....	134
Chapitre 5 : Application des modèles d'agrégation.....		135
	Introduction	135
5.1	Evaluation des critères	136
5.2	Hiérarchisation des bâtis.....	140
5.2.1	Hiérarchisation sans pondération.....	140
5.2.2	Hiérarchisation avec pondération	142
5.2.3	Proposition d'une hiérarchisation	149
5.3	Modèle d'agrégation des indicateurs	151
5.3.1	Evaluation de la vitesse d'altération	151
5.3.2	Evaluation du risque de perte de solidité.....	151
5.3.3	Evaluation de la motivation du maître d'ouvrage.....	152
5.4	Détermination de la durée de vie résiduelle.....	153
5.5	Proposition et hiérarchisation des actions de maintenance.....	157
5.5.1	Cas du bâti B.....	157
5.5.2	Cas du bâti E	160
	Synthèse du cinquième chapitre.....	163
Conclusion générale.....		165
	Résultats du modèle d'agrégation	165
	Perspectives.....	166

Diffusion et formation	166
Recherche et applications.....	166
Références bibliographiques	168
Table des figures.....	177
Table des tableaux.....	179
Annexes.....	182
Annexe 1 : Protection du patrimoine en France	183
Annexe 2 : Les acteurs du patrimoine.....	185
Annexe 3 : Charte de Venise	190
Annexe 4 : Présentation de HeritageCare.....	192
Annexe 5 : Données pour constituer des référentiels	196
Annexe 6 : Principe de techniques d'investigations non destructives.....	199
Annexe 7 : Etat des lieux.....	208
Annexe 8 : Proposition d'un référentiel des altérations	242
Annexe 9 : Base de données des actions de maintenance.....	248
Annexe 10 : Exemple d'un rapport HeritageCare.....	264

Introduction générale

Notre périmètre d'étude est le patrimoine culturel et historique c'est-à-dire le patrimoine protégé ou non et appartenant à tout type d'entité (privé, public ou mixte). Le patrimoine culturel est défini comme l'ensemble des biens matériels ayant un intérêt patrimonial, ayant une ou des valeurs qui peuvent être de différentes natures tel qu'artistique, symbolique, historique, sociale, économique technologique ou scientifique. Le patrimoine historique se distingue quant à lui par un statut singulier : celui de « monument historique » correspondant à la reconnaissance par la Nation de la valeur patrimoniale d'un bien. Cette protection implique une responsabilité partagée entre les propriétaires et l'Etat au regard de sa conservation et de sa transmission aux générations à venir. Aujourd'hui, cette catégorie recouvre environ 43600 édifices alors que le nombre d'édifices relevant du patrimoine culturel présentant un intérêt est estimé entre 400 000 et 500 000.

Quel que soit le statut des édifices, le « propriétaire » est maître d'ouvrage de l'entretien et des travaux qui y sont entrepris. Il lui appartient à ce titre de définir les opérations d'entretien ou de restauration, de choisir le maître d'œuvre et les entreprises et restaurateurs qui seront chargés des interventions, d'assurer le financement et de solliciter si nécessaire l'aide de l'État, des collectivités ou d'autres partenaires. Actuellement, si l'entretien du patrimoine est réalisé, il se fait aléatoirement, en France il n'existe en effet pas de réglementation ni même de méthodologie de gestion préventive tant pour le patrimoine public que le patrimoine privé (protégé ou non).

L'incendie récent de la cathédrale Notre-Dame de Paris a permis à l'ensemble de la population et des acteurs politiques de reprendre conscience que le patrimoine n'est pas pérenne et qu'il peut disparaître accidentellement. Les incendies peuvent être une conséquence d'un défaut d'entretien, mais, tout comme des infiltrations d'eau dans la couverture provoquent le pourrissement des éléments en bois de la charpente pouvant entraîner une rupture puis un effondrement du bâtiment. Bien que ces accidents divers aient pu rythmer les reconstructions de notre patrimoine culturel et historique, cela engendre des coûts importants pour les propriétaires. Dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.Erreur ! Source du renvoi introuvable.Erreur ! Source du renvoi introuvable.Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Tableau 1 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.Erreur ! Source du renvoi introuvable.Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, une liste est proposée de quelques exemples d'accidents qui ont pu se manifester et qui auraient pu être probablement évité à l'aide d'une gestion préventive du bâti.

Patrimoine	Date	Accident	Causes
Ancienne poterie de la Montagne, France	28/07/2019	Effondrement plancher.	Présence de fissure sur poutre en bois
Musée national de Rio de Janeiro, Brésil	2/09/2018	Incendie : destruction totale de l'intérieur.	Problème de dysfonctionnement de la climatisation.
Château de Champs sur Marne, France	20/09/2006	Chute d'un plancher.	Présence mэрule.
Château de Chambord, France	11/2003	Chute d'un plancher.	Attaque de vrillettes.
Château de Lunéville, France	2/01/2003	Incendie : destruction de la charpente de la chapelle.	Problème électrique.
Le château de Windsor, Angleterre	20/11/1992	Incendie.	Lampe halogène située proche d'une tenture.

Tableau 1 : Exemple d'accidents

Dans ce contexte, nous défendons la thèse que la gestion préventive permettrait d'éviter des chantiers de restaurations mobilisant des ressources financières et des moyens techniques importants pour les propriétaires. La gestion préventive permettrait la mise en place de la conservation préventive correspondant

aux « mesures et actions visant à éviter ou à limiter dans le futur une dégradation, une détérioration et une perte et, par conséquent, toute intervention invasive ». A contrario, la conservation curative est définie comme étant des « actions entreprises directement sur un bien pour arrêter une détérioration ou limiter une dégradation ».

Ce projet de thèse sur l'optimisation de la gestion du patrimoine culturel et historique à l'aide des méthodologies avancées d'inspection doit répondre aux besoins des professionnels du patrimoine mais aussi aux propriétaires. Cette optimisation repose sur :

- Le contexte des méthodes scientifiques existantes pour la maintenance préventive. Actuellement des méthodes scientifiques existent dans le cas des ouvrages d'art. Le CEREMA¹ aide les gestionnaires et les maîtres d'ouvrage à la mise en place de protocole pour leur gestion. Tandis que pour le patrimoine culturel et historique il n'existe pas d'instituts pour la mise en place de la maintenance préventive. Les centres existants ont un rôle soit dans la recherche de fonds pour le lancement des travaux, soit de contrôle scientifique lors de la phase chantier ou bien encore de prescripteur de travaux de restauration. L'objectif est de proposer une démarche scientifique de gestion préventive agrégeant divers aspects ;
- L'intérêt de connaître les mécanismes de dégradation et le temps associé. La durée de vie des matériaux (principalement des pierres, du bois, le métal) du patrimoine culturel et historique peut être extrêmement longue. Leur longévité dépend fortement du contexte et de l'environnement dans lesquels ils sont situés. L'objectif est de déterminer leur état de dégradation et d'y associer une durée de vie résiduelle ;
- Des projets de recherches participant à l'élaboration de la méthodologie de gestion préventive tel que HeritageCare. Ce dernier est un projet européen entre l'Espagne, le Portugal et la France qui a débuté en septembre 2016 et s'est achevé en août 2019. Son objectif est de mettre en place des niveaux de service pour aider les propriétaires à gérer leur patrimoine. Chacun des pays devait tester ces niveaux sur un échantillonnage de bâti représentatif de leur patrimoine architectural.

La problématique de cette thèse est d'établir une méthodologie scientifique destinée à la gestion préventive du patrimoine culturel et historique en intégrant les dimensions patrimoniales, techniques, économiques, environnementales, temporelles et de gouvernance. Cette méthodologie s'appuie sur les travaux du projet HeritageCare en intégrant des outils de traitement des données et d'aide à la décision.

Les principales limites à ces travaux sont : l'échantillonnage des bâtis du corpus qui doit représenter l'ensemble de notre patrimoine culturel et historique et l'avancement du projet HeritageCare qui se fait en parallèle des travaux de la thèse. Ce travail est décomposé en cinq chapitres.

Le premier chapitre présente la conservation préventive du patrimoine culturel et historique en France, puis il aborde l'état de l'art des méthodologies de gestion préventive au sein du projet HeritageCare et enfin il détaille l'identification de l'état de dégradation. Le deuxième chapitre décrit la méthodologie générale de la gestion préventive décomposée en quatre parties. Le troisième chapitre introduit le modèle d'agrégation constitué de cinq familles de critères hiérarchisés, une méthodologie d'agrégation des indicateurs et enfin la base de données des actions de maintenance. Le quatrième chapitre détaille les résultats de la méthodologie avec la gestion préventive. Enfin, le cinquième chapitre énumère les résultats du modèle d'agrégation.

¹ CEREMA : Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement

Chapitre 1 : Conservation préventive du patrimoine culturel et historique

Introduction

Aujourd'hui, la conservation préventive de l'ensemble du patrimoine culturel et historique est un défi pour les années à venir. Tous les jours, des bâtis de ce patrimoine disparaissent vu qu'ils sont impactés par des accidents (incendie à la suite d'un problème électrique, chute de plancher suite à l'apparition d'insectes dans le bois, effondrements de murs suite à la présence d'une fuite d'eau). Ces bâtiments peuvent aussi subir des destructions volontaires (suite à un non-entretien ou si le bâti devient dangereux et sa remise en fonction à un coût trop élevé pour son propriétaire). La gestion préventive d'un bâti a pour but de mettre en place des actions de conservations préventives afin d'éviter ces éventuels accidents et/ou destruction.

Ce chapitre présente le contexte de la thèse et les recherches existantes associées afin d'aboutir à une problématique, à savoir le développement d'une méthodologie de gestion préventive. Ce chapitre détaille aussi le projet européen HeritageCare qui souhaite intégrer les dimensions techniques de dégradation du bâti.

Ce sont les raisons pour lesquelles, ce chapitre s'articule autour de :

- La présentation du contexte caractérisé par un défaut de budget alloué spécifiquement à la conservation préventive ;
- L'état de l'art des recherches et des applications actuelles sur les méthodologies de gestion préventive, le projet européen intitulé HeritageCare, la caractérisation de l'état de dégradation et les méthodes pour déterminer les durées de vie. Ces quatre thèmes constituent le socle de connaissances sur lequel nous construisons la méthodologie de la thèse.

1.1 Contexte

L'attention portée à la prévention et à l'entretien dans le domaine des monuments protégés ou non n'est pas récente. Déjà au XIX^{ème} siècle, Viollet Le Duc affirme que la France ignore « la culture de l'entretien ». Dans ses chantiers de travaux de restauration, il est en effet confronté au délabrement des monuments anciens [Choay 2009]. Adolphe Napoléon Didron, acteur de la conservation du patrimoine, suggère quant à lui de « conserver le plus possible, ne restaurer à aucun prix » laissant entendre qu'il fallait entretenir l'objet pour en assurer l'authenticité [Guichen 1995]. Puis au XX^{ème} siècle, la charte d'Athènes [Icomos 1931], l'article 4 de la Charte de Venise [Icomos 1964] reproduit en annexe 3, et la charte de Burra [Icomos 1979], statuent enfin sur la maintenance et sur les actions préventives pour conserver le patrimoine.

L'annexe 1 de ce mémoire retrace l'histoire de la gestion du patrimoine et l'annexe 2 définit les acteurs du patrimoine culturel et historique en France.

En France, la conservation préventive apparaît dans les années 1980 avec la création d'un service au sein du Centre de Recherche des Musées de France (C2RMF). Ce service a pour but d'étudier les biens mobiliers dans les musées en analysant par exemple le climat (température, humidité relative) dans les vitrines ou bien en choisissant des matériaux d'exposition pour ne pas accentuer leur vitesse de corrosion dans le cas des métaux [Boutaine 2011].

Avant l'élaboration de la norme européenne [Afnor 2011], il existait plusieurs définitions de la conservation préventive mais elles étaient principalement dédiées aux biens mobiliers [Van Balen 2015]. Au fil du temps,

la problématique de la conservation préventive s'est élargie au champ de l'immeuble, c'est-à-dire à une plus grande échelle mais avec un niveau de complexité augmenté. En 2011, un consensus est trouvé entre les différents pays européens pour définir les différents termes liés à la conservation-restauration, dont la conservation préventive concernant le patrimoine immobilier. Le tableau ci-dessous synthétise l'ensemble des définitions de la conservation préventive.

[Afnor 2011]	Mesures et actions visant à éviter ou à limiter dans le futur une dégradation, une détérioration et une perte et, par conséquent, toute intervention invasive.
[Icom-cc 2008]	L'ensemble des mesures et actions ayant pour objectif d'éviter et de minimiser les détériorations ou pertes à venir. Elles s'inscrivent dans le contexte ou l'environnement d'un bien culturel, mais plus souvent dans ceux d'un ensemble de biens, quels que soient leur ancienneté et leur état. Ces mesures et actions sont indirectes, elles n'interfèrent pas avec les matériaux et structures des biens. Elles ne modifient pas leur apparence.
[Guichen 1995]	Toute action directe ou indirecte ayant pour but d'augmenter l'espérance de vie d'un élément ou ensemble d'éléments du patrimoine.
[C2rmf 2006]	La conservation préventive intervient sur l'ensemble des domaines qui peuvent avoir des incidences et des effets sur l'intégrité d'une collection, d'un objet ou d'une œuvre d'art, et menacer à terme son existence.

Tableau 2 : Définition de la conservation préventive

Du fait de sa complexité, la conservation préventive reste aujourd'hui non systématique [Della Torre 2016] étant donné que la plupart des interventions s'effectuent tardivement. Elles sont réalisées à la suite d'un désordre apparent générant des travaux de réparation et/ou de restauration. Il n'existe par ailleurs pas de département de conservation préventive spécifique pour les biens immobiliers contrairement aux biens mobiliers. Ce service pourrait permettre d'avoir une vue d'ensemble du monument pour en améliorer sa conservation en y proposant par exemple des cahiers des charges ou des méthodologies pour améliorer la veille sanitaire.

Deux problématiques en découlent et concernent d'une part les budgets alloués aux financements des travaux d'entretien et d'autre part l'absence de mise en place de veille sanitaire des monuments par l'ensemble des maîtres d'ouvrage.

Nous rappelons également le fait qu'aujourd'hui il n'y a que peu de politique de gestion préventive appliquée sur le patrimoine. Pour le cas du patrimoine protégé, si cette politique est mise en place, elle s'appuie sur le budget « entretien », tandis que pour le cas des bâtis non protégés, cette politique est réalisée avec les fonds propres du propriétaire. Afin de détailler cela, nous proposons de définir les travaux d'entretien, puis de présenter les budgets attribués et enfin les conséquences de défaut de la politique de conservation préventive.

1.1.1 Définition des travaux d'entretien

Les travaux d'entretien sont définis comme étant des actions périodiques de conservation préventive visant à maintenir un bien dans un état approprié, afin qu'il conserve son intérêt patrimonial [Afnor 2011]. Ils peuvent correspondre par exemple aux nettoyages des gouttières ou au dépoussiérage du mobilier. Dans le cas de travaux sur le patrimoine protégé au titre des monuments historiques, ils ne nécessitent ni maîtrise d'œuvre ni autorisation de travaux, ils peuvent être engagés sans formalités, sauf si une aide financière est demandée pour leur réalisation [Mcc 2009]. Aujourd'hui en France, la conservation préventive n'est pas prévue dans le cas du patrimoine bâti dans les budgets du ministère de la culture, pourtant les formalités administratives sont plus simples et les coûts pourraient être réduits.

Les travaux de réparation sont définis quant à eux comme étant des « actions entreprises sur un bien en état stable ou stabilisé, dans le but d'en améliorer l'appréciation, la compréhension et/ou l'usage, tout en

respectant son intérêt patrimonial et les matériaux et techniques utilisés ». Ces travaux nécessitent une autorisation de travaux et une maîtrise d'œuvre effectuée par un architecte spécialisé. Les travaux de restauration, définis comme étant des « actions entreprises sur un bien ou une partie de celui-ci afin de lui restituer sa fonctionnalité et/ou son aspect », nécessitent là aussi une autorisation de travaux et le recours à une maîtrise d'œuvre effectuée par un architecte spécialisé (c'est-à-dire soit un ACMH² ou bien un architecte possédant une expérience certaine dans la pratique de la restauration et en lien avec les travaux à entreprendre) [Mcc 2009].

1.1.2 Budgets alloués aux travaux d'entretien

1.1.2.1 Cas des monuments protégés

Un bien est dit « protégé » lorsque sa valeur patrimoniale a été reconnue par l'Etat. Cette protection implique une responsabilité partagée entre les propriétaires et la collectivité nationale au regard de sa conservation et de sa transmission aux générations à venir. Une conséquence de cette protection est la loi sur la protection des monuments historiques du 31 décembre 1913 qui conforte les premières dispositions législatives de 1887. Cette loi est désormais codifiée et intégrée dans le titre II du Livre VI du code du patrimoine et stipule que le « propriétaire d'un monument historique » est le maître d'ouvrage des travaux qui y sont entrepris. Il doit donc définir les opérations d'entretien ou de restauration, choisir le maître d'œuvre et les entreprises, assurer le financement et solliciter l'aide de l'Etat. L'Etat, représenté par le ministère de la Culture et de la Communication est chargé directement, par l'intermédiaire de ses services régionaux (DRAC) et de ses établissements publics (CMN, OPPIC), de l'entretien et de la conservation des monuments historiques majeurs tels que les cathédrales et les domaines nationaux dont il a la charge.

Dans le cas des monuments protégés, le budget « entretien », au sein du ministère de la culture, est confondu avec le budget « restauration » [Nachbar 2019]. Les chiffres du budget 2019 s'élèvent à 130 millions d'euros pour la « restauration des monuments historiques grands projets » et 326 millions d'euros pour « l'entretien et la restauration des monuments historiques », hors grands projets³. Ces fonds financent les « monuments historiques » soit 41 000 édifices protégés (environ 14 000 édifices classés et 27 000 inscrits à l'inventaire supplémentaire des monuments historiques) pour lesquels le budget annuel de subventionnement par bâti est inférieur à 8 000 euros en moyenne. Cette estimation n'est cependant pas répartie sur l'ensemble du parc français ; elle est mobilisée uniquement pour le patrimoine historique qui le nécessite, cela étant déterminé lors du bilan sanitaire.

² ACMH : Architecte en Chef des Monuments Historiques (Cf. Annexe 2)

³ Les grands projets concernent les grands monuments historiques tels que les cathédrales et les grands domaines nationaux où l'Etat représenté par le ministère de la Culture et de la Communication est chargé directement, par l'intermédiaire de ses services régionaux (DRAC) et de ses établissements publics (CMN, OPPIC), de l'entretien et de la conservation.

La Figure 1 fait apparaître que les crédits d'entretien ont été réduits par rapport aux chiffres de 2010, tandis que les crédits de restauration ont augmentés.

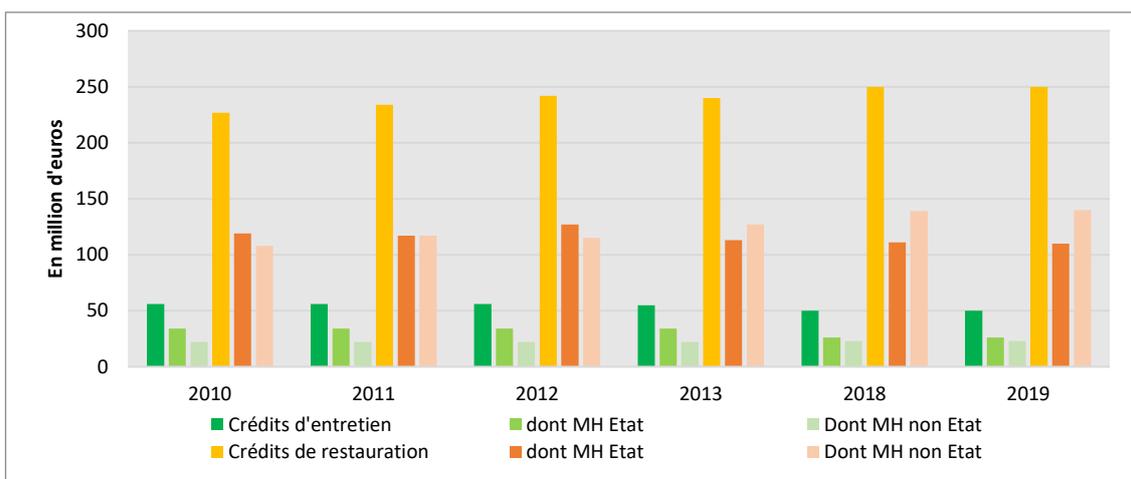


Figure 1 : Comparaison des crédits d'entretien et de restauration [Nachbar 2019]

1.1.2.1.1 Bilan sanitaire pour estimer les budgets

La loi des finances de 2007, dans son article 90, demande au ministre de la culture et de la communication de produire un rapport sur l'état du parc des monuments français. Son but est d'évaluer les investissements nécessaires à l'entretien et à la conservation des monuments classés ou inscrits et de déterminer les besoins régionaux. Cette demande a été reprise le 17 septembre 2007 par Monsieur Nicolas Sarkozy, Président de la République, lors de l'inauguration de la Cité de l'Architecture et du Patrimoine en demandant au ministre de la culture « de dresser rapidement un état sanitaire des monuments classés ou inscrits » en rappelant qu'il « ne sert à rien d'être fier de notre patrimoine français et de continuer à mégoter pour l'entretenir » [McC 2007].

Le rapport de 2007 a constitué un document de grand intérêt, le budget avait été estimé à 8,6 milliards d'euros (contre 6,3 milliards en 2003). Le parlement a donc demandé que ce bilan sanitaire soit actualisé tous les cinq ans. Cette fréquence a été déterminée en fonction de la charge de travail des agents concernés et en fonction du cycle des travaux de réalisation sur les monuments historiques.

Le bilan sanitaire contient les informations suivantes : le statut de la propriété (appartenance au ministère de la culture, autre ministère ou privé), l'état de l'édifice (bon, passable, défectueux, mauvais, péril), la vitesse d'altération (rapide, non rapide), l'estimation des montants des travaux (montant global des travaux de restauration, montant des travaux d'urgence, montant des travaux d'entretien). Ces informations doivent être enregistrées sur la plateforme AgrEgée du ministère de la culture.

Caroline Piel, inspectrice générale des Monuments historiques, mentionne dans un rapport de 2012 un bilan mitigé sur l'état sanitaire de l'ensemble du parc du fait d'un défaut de moyen humain et de temps. Des travaux ont été réalisés uniquement sur les monuments classés et les monuments inscrits nécessitant des travaux d'urgence. De plus, elle remet en question dans son rapport : la méthodologie du questionnaire qui repose sur la subjectivité de l'agent (ex : état de l'édifice), la simplicité du questionnaire pour des monuments complexes (ex : château, fortification), les outils nationaux non utilisés, la gestion des états des lieux dans les services régionaux et entre ces services.

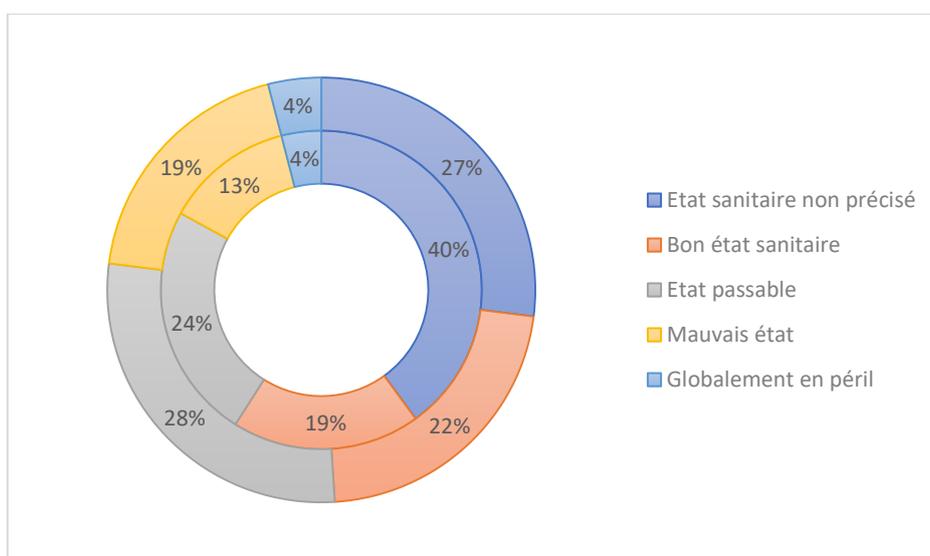


Figure 2 : Bilan de l'état sanitaire effectué en 2007 (anneau intérieur : bilan 2003 et anneau extérieur : bilan 2007)

La dernière mise à jour de ce bilan sanitaire [Nachbar 2019b] a été effectuée en 2018. Notons qu'il faut prendre avec précaution ces chiffres, puisqu'en 2017, lors de notre entretien avec la DRAC Auvergne-Rhône-Alpes de Clermont-Ferrand, nous avons relevé que les bilans sanitaires étaient très peu effectués. Cependant, les résultats de cet état sanitaire (cf. Figure 2) font apparaître que 23 % des immeubles protégés au titre des monuments historiques sont en mauvais état ou en péril (contre 30% en 2012). Le taux d'immeubles en péril est passé de 4,93 % en 2012 à 4,76 % en 2018 (cf. Tableau 3). Le tableau montre également que les immeubles en péril dont les propriétaires sont mixtes (publics et privés) ont un taux supérieur à la moyenne.

	Immeubles en péril	Immeubles en mauvais état	Immeuble dans un état moyen	Immeubles en bon état
État	4,78	12,41	39,25	43,57
Régions	5,06	10,13	41,77	43,04
Départements	4,61	15,23	39,88	40,28
Communes	3,9	21,11	42,89	32,11
Mixtes publics	4,42	29,83	36,46	29,28
Publics non précisés	4,77	16,25	39	39,98
Mixtes privé / public	9,03	29,83	37,83	23,31
Privés	5,66	15,8	41,67	36,87
Indéterminés	4,33	17,7	38,7	39,31
Moyenne nationale	4,76	18,53	41,52	35,18

Tableau 3 : Répartition en pourcentage des immeubles protégés en fonction de leur état sanitaire pour chaque catégorie de propriétaire

1.1.2.1.2 Mission patrimoine en péril

Malgré les difficultés rencontrées dans la réalisation du bilan sanitaire, les résultats ont montré que l'Etat a réussi à diminuer le patrimoine en péril de 0,17%. Cependant cette diminution n'est pas encore significative. Ainsi, en 2017, le Président de la République a confié à Stéphane Bern une mission d'identification du patrimoine immobilier en péril et de recherche de sources de financement innovantes pour en assurer la restauration.

Stéphane Bern monte ainsi une opération en partenariat avec la Fondation du patrimoine, le ministère de la Culture et la Française Des Jeux. Les français (qu'il s'agisse de collectivités, d'associations ou de citoyens) ont signalé 3 500 sites en péril, sur une plateforme participative en 2017. Les dossiers présentés ont été examinés par les équipes de la Fondation du patrimoine et du ministère de la Culture, et sélectionnés selon plusieurs critères : leur intérêt patrimonial et culturel, l'urgence de leur restauration, la recherche d'un équilibre géographique et historique (en privilégiant les zones rurales, dans un objectif de revitalisation des territoires), le projet de valorisation ou de réutilisation, s'il y a lieu, et les retombées économiques attendues. Au total, pour l'édition 2018, 269 projets ont été sélectionnés dont 18 considérés comme emblématiques du patrimoine en péril : un par région, soit 13 en France métropolitaine et 5 en Outre-mer. Fort de ce succès, le dispositif est reconduit pour deux années supplémentaires, comme le prévoyait la convention signée entre la FDJ et la Fondation du patrimoine. À l'issue de cette période, une évaluation sera réalisée afin de déterminer s'il y a lieu de le pérenniser [Nachbar 2019].

1.1.2.2 Cas des monuments non protégés

Pour le cas du patrimoine non protégé, il n'existe pas aujourd'hui d'aide pour soutenir le financement de l'entretien et le diagnostic préventif n'est pas obligatoire.

Cependant, pour la réalisation de travaux, des associations et des fondations sont présentes. Par exemple, la Fondation du Patrimoine a mis en place un Label permettant une déduction fiscale, le Loto du Patrimoine et les plateformes de financement participatif peuvent aussi permettre de financer des travaux sur du patrimoine non protégé.

Les différentes aides en fonction de la protection du patrimoine culturel et historique sont synthétisées dans le Tableau 4.

Organisme		Monument classé/monument inscrit	Monument sans protection
L'Etat	Directions Régionales des Affaires Culturelles (DRAC) : Subvention des travaux de conservation et d'entretien et des études. Les demandes sont à envoyer avec un formulaire type.	-public ou privé -taux maximum de subvention : (édifice classé): 80% (non plafonnés) -aides cumulables avec les subventions des collectivités territoriales (Régions et Départements) -déductions fiscales sur la part des travaux restant à charge -avances importantes (début travaux)	Au cas par cas, des aides ponctuelles pour des édifices présentant un intérêt patrimonial certain en privilégiant l'accompagnement des politiques publiques de valorisation telles que les abords, les ZPPAUP ⁴ , les AVAP ⁵ et les Secteurs sauvegardés.
Les collectivités locales	Chaque collectivité territoriale (conseil régional et conseil général essentiellement) définit son propre règlement en matière de subventions au patrimoine protégé.	Présence d'aides dépendant des collectivités.	Bâtiment qui présente un intérêt patrimonial : zone ZPPAUP / secteur sauvegardé / ville classée « Art et Histoire » Également, le bâtiment doit être visible de la voie publique.
Le Mécénat	Par soutien de mécènes : entreprises ou particuliers Par parrainage : dans ce cas, le donateur propose une opération de promotion commerciale (logos, messages publicitaire) en contrepartie du don financier.	-Patrimoine public /privé -Le propriétaire signe une convention, avec une structure habilitée, prévoyant un engagement de dix ans de conservation et d'ouverture au public. -Cas du mécénat : déductions fiscales : réduction de l'impôt sur les bénéficiaires -Cas du parrainage : des dépenses déductibles du résultat au titre de charges d'exploitation (assimilées à des dépenses de nature publicitaire) si le soutien financier s'inscrit dans un dispositif de parrainage	
Les fondations	La Fondation du Patrimoine	-Patrimoine rural -Patrimoine public/privé -Aide dans la recherche de mécènes	-Patrimoine rural -Patrimoine privé : LABEL ⁶ (déduction fiscale)
	La Fondation « Pays de France » du Crédit Agricole	Patrimoine public/privé	Patrimoine public/privé
	Association Sauvegarde de l'Art	absence d'aide	Églises et des chapelles antérieures à 1800 – travaux gros œuvre
	La Demeure Historique	- Patrimoine public/privé -Accompagnement et soutien aux propriétaires	Jardin ou demeure remarquable - Patrimoine public/privé
	La Fondation pour les Monuments Historiques	- Patrimoine public/privé -Aides financière pour des projets de restaurations et des mises en accessibilité	Aucune aide
Les concours et les Prix	<i>Prix du Patrimoine culturel européen – Concours Europa Nostra : Concours « patrimoine en péril » (concours à l'échelle régionale organisé par la VMF) Concours René Fontaine (concours organisé par Maisons Paysannes) Prix de sauvegarde Vieilles Maisons Françaises (VMF) Concours Pèlerin « Un patrimoine pour demain »</i>		
Les aides européennes	L'Union Européenne peut apporter son soutien financier à des projets à caractère culturel, principalement à travers deux fonds : Fonds Européen de Développement Régional (FEDER) et FEAGA (Fonds européen agricole de garantie)		

Tableau 4 : Synthèse des différentes aides

1.1.3 Conséquence de l'absence de conservation préventive

A défaut d'une politique de conservation préventive pour l'entretien du patrimoine bâti, des travaux de réparation et de restauration sont effectués. A l'exception des travaux d'entretien [Mcc 2009], les travaux

⁴ ZPPAUP : Zone de Protection du Patrimoine Architectural, Urbain et Paysager

⁵ AVAP : aires de mise en valeur de l'architecture et du patrimoine

⁶ Le label : La Fondation du Patrimoine est le seul organisme privé habilité par le Ministère de l'Economie et des Finances à pouvoir octroyer un label à une opération de restauration concernant un immeuble non protégé au titre des monuments historiques mais présentant cependant un réel intérêt patrimonial. Sous certaines conditions, ce label permet aux propriétaires privés de bénéficier de déductions fiscales incitatives pour des travaux extérieurs réalisés sur des édifices visibles de la voie publique.

réalisés sur du patrimoine protégé sont soumis à deux législations : le Code du Patrimoine (les travaux sont soumis à une procédure d'autorisation administrative préalable, adressée à la DRAC) et le Code de l'Urbanisme (les travaux doivent faire l'objet d'une déclaration préalable au Maire). Dans le cas des monuments non protégés sont soumis à la législation du Code de l'Urbanisme. Et, les règles de l'art doivent être respectées pour l'ensemble du patrimoine bâti.

Le choix d'entreprises compétentes est particulièrement important en matière de restauration de monuments anciens. Il n'existe pas d'entreprises « agréées » par les monuments historiques mais le maître d'ouvrage doit néanmoins s'assurer que l'entreprise et les personnels employés possèdent effectivement les compétences requises et que l'entreprise concernée peut se prévaloir d'une expérience suffisante sur des chantiers de même ampleur et de même complexité.

Il existe cependant dans certaines spécialités (maçonnerie-taille de pierre, charpente, couverture), une qualification « monuments historiques » accordée par l'organisme indépendant QUALIBAT. Cette qualification est un gage de compétence qui doit être prise en compte lors de l'examen des offres. Elle est accordée par un jury indépendant composé de professionnels du bâtiment, de maîtres d'œuvre et de maîtres d'ouvrage. Elle est attribuée à titre temporaire et régulièrement réexaminée. Il existe aussi le Groupement Français des Entreprises de Restauration de Monuments Historiques (GMH), syndicat professionnel créé en 1960 affilié à la fédération française du bâtiment, qui est composé d'environ 200 entreprises spécialisées dans les métiers de la restauration des monuments Historiques.

Le maître d'ouvrage assisté par l'architecte maître d'œuvre doit demander lors de la consultation que l'entreprise candidate fournisse tous les éléments lui permettant d'apprécier ses capacités, ses compétences et ses références. Dans le domaine des monuments historiques comme dans d'autres, le prix de la prestation n'est pas le seul critère à prendre en compte, et le maître d'ouvrage doit maintenir un juste équilibre entre la qualité du prestataire, sa proposition technique et le prix soumis. Le maître d'œuvre choisi par le propriétaire a une mission de conseil lors du choix des entreprises. Les services régionaux du ministère de la culture (DRAC) peuvent également être sollicités. Certains travaux (restauration de peintures murales, de dorures, de textiles, de vitraux...) demandent l'intervention de restaurateurs ou d'entreprises spécialisés. Les maîtres d'ouvrage doivent faire appel à des restaurateurs diplômés. Suivant les enjeux patrimoniaux ou les niveaux de complexité des interventions, l'expertise du LRMH peut être requise pour aider à la mise en place de méthodologie ou de protocole de restauration spécifiques.

1.2 Etat de l'art des recherches, des méthodes et outils

La problématique présentée précédemment montre l'absence de méthodologie de gestion préventive programmée pour le patrimoine culturel et historique. Pour la mise en place d'une telle méthodologie, trois thématiques principales de recherches doivent être abordées.

Nous abordons tout d'abord les méthodologies de gestion de ce patrimoine, élaborées dans des cadres scientifiques ou pratiques. Ensuite, nous présenterons le projet Européen HeritageCare dans lequel s'inscrit cette thèse. Puis, nous aborderons l'état du patrimoine en cherchant à définir les altérations du bâti en utilisant soit des échelles de classification, soit un critère de caractérisation.

1.2.1 Méthodologies de gestion préventive

Les méthodologies de gestion préventive du patrimoine culturel et historique sont quasi-inexistantes par rapport à ce qui existe sur les ouvrages d'arts (ponts, viaducs, murs de soutènement, tunnels) et sur les structures en béton [Ashto 2010, Odot, 2009, Birmm 2015, Setra 2006, Fib 2008, Miyamoto 1991].

Les méthodologies existantes de gestion du patrimoine débutent toujours par une recherche d'informations et par la visite initiale qui permet d'établir un constat des altérations ; les visites de suivi sont programmées en fonction de l'état de l'ouvrage. Lors de la visite initiale, l'ensemble des altérations est relevé et associé à des critères qualitatifs et/ou quantitatifs en fonction de la méthodologie mise en place. Parfois, un critère est créé pour caractériser l'état d'altération pour obtenir un classement et/ou une hiérarchisation des bâtis, afin de prioriser les actions de maintenance.

En France, le CEREMA s'est fixé l'objectif d'accompagner les maîtres d'ouvrages dans la gestion des ouvrages d'art. Une méthodologie de gestion [Setra 2006] a été mise en place afin de définir la politique d'entretien et de préservation en évaluant l'état de l'ouvrage à l'aide d'un critère (appelé critère apparent) ; elle est schématisée à la Figure 3. D'autre part, des critères socio-économiques sont déterminés en fonction de la politique mise en œuvre par le maître d'ouvrage pour proposer une pré-programmation des actions de maintenance et fournir des données macro-économiques sur le coût de la maintenance. Pour cela, un ensemble d'outils a été mis en place comme le critère de priorité socio-économique et celui de priorité technique, l'évolution de l'état du patrimoine, l'utilisation d'outils macroéconomiques et enfin la programmation des actions de maintenance.

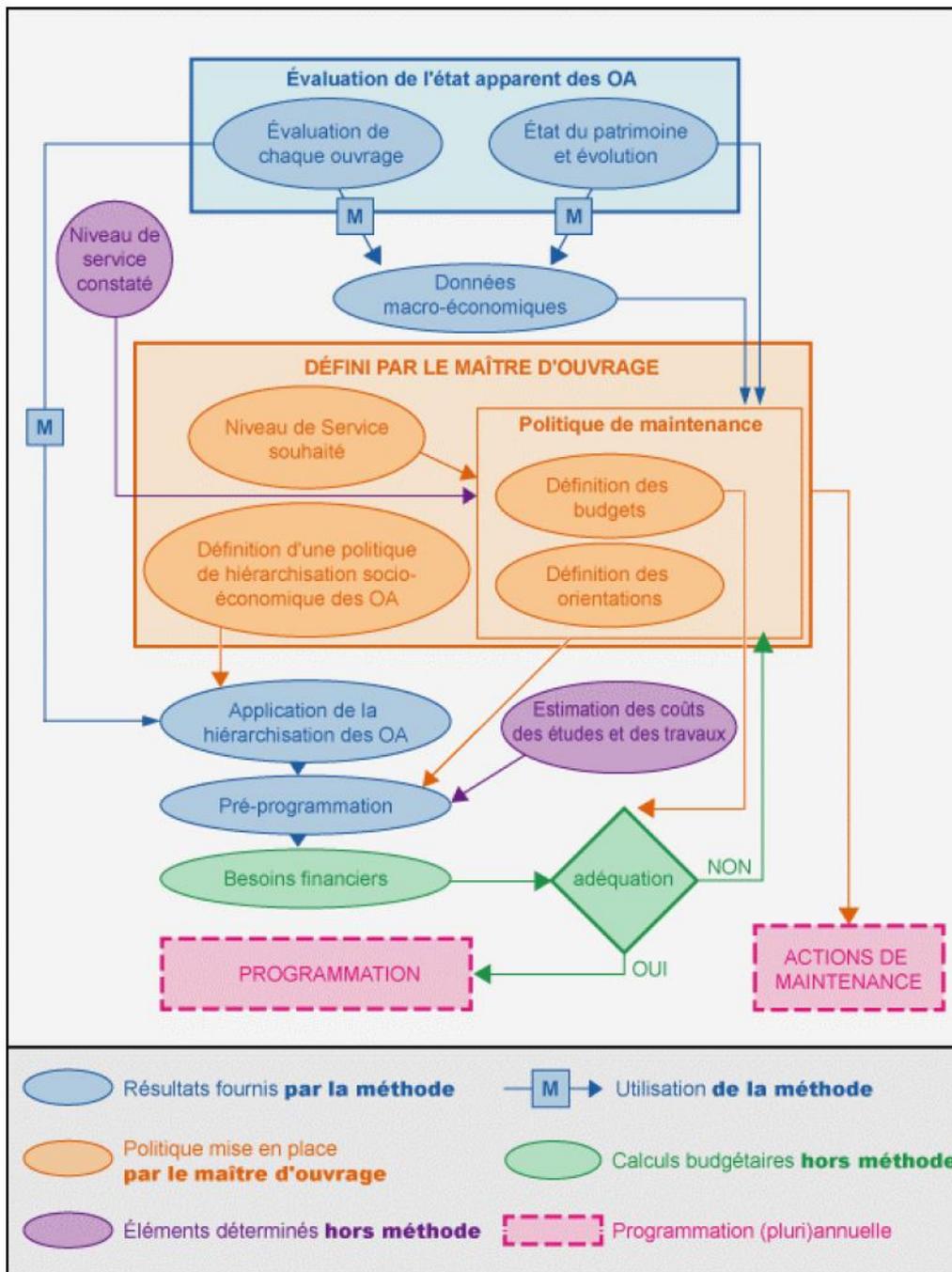


Figure 3 : Exemple d'une méthodologie de gestion des ouvrages d'art ; Organigramme des opérations et des outils de gestion des ouvrages d'art [Setra 2006]

En pratique, une méthodologie existe pour déterminer l'état du patrimoine historique. Cette méthodologie, si elle est effectuée, permet d'avoir un état des lieux pour la prévision du budget. Le bilan sanitaire se résume avec les informations du Tableau 5.

Page 1	Description administrative du bien (adresse, protection, date de la visite) Synthèse de l'état du bâti avec ; sa vitesse d'altération (- stable - lente - rapide – accélérée), l'état de l'édifice (bon, passable, défectueux, mauvais, péril) Origine / Déclenchement / Objet de la visite
Page 2	Participants à la visite
Page 3	Plans, croquis
Page 4 à 21	Appréciation : - bon - passable - défectueux - mauvais - péril – Description de l'état de la catégorie : Cause(s) probable(s) des désordres : Mesure(s) préconisée(s) : Catégorie : Fondations – Sous-sols/ Structure- Maçonnerie- Gros œuvre/Parement-Enduits/ Couverture-Charpente /Menuiserie-Métallerie-Vitreaux /Cloisonnement-Revêtement intérieurs – décors /Equipement technique-Sécurité /Environnement-Abords-Voirie et réseaux/Tous corps d'état

Tableau 5 : Méthodologie de veille sanitaire par l'Etat

Contrairement aux ouvrages d'art, il n'existe pas de politique de gestion préventive sur le patrimoine culturel et historique. Elle est moins aisée à mettre en place puisque le patrimoine culturel est caractérisé par un ensemble de typologies architecturales (architecture funéraire, architecture religieuse, architecture domestique, architecture militaire, etc.), de propriétaires (public, privé) et de niveaux de protections (absence ou avec).

En 2003, Icomos préconisait d'appréhender les structures historiques en procédant à des études s'inspirant de la médecine, tel que défini dans la Figure 4 avec l'anamnèse, le diagnostic, la thérapie et le contrôle [Icomos 2003]. La réflexion concernant la mise en place de méthodologie de gestion préventive sur le patrimoine bâti a débuté avec le cas de l'étude effectuée par l'Unesco en 2012 sur le site archéologique de Petra [Unesco 2012].

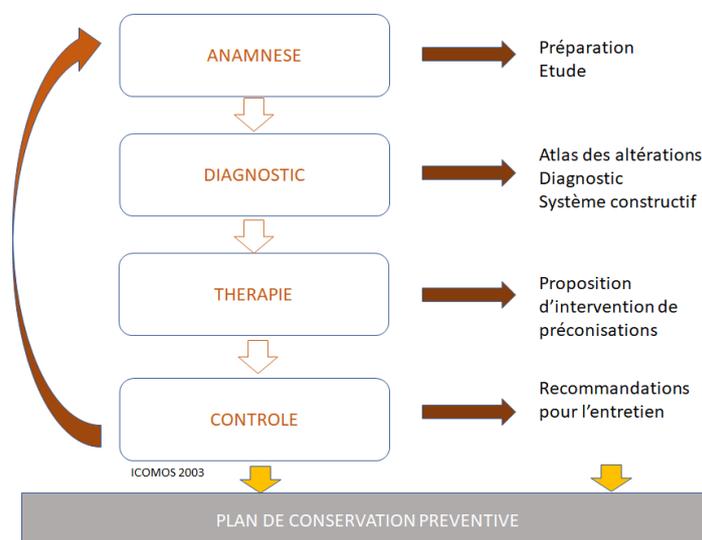


Figure 4 : Méthodologie état des lieux du bâti [Balarezo 2016]

Cette méthodologie fonctionne si elle est répétée régulièrement [Balarezo 2016, Van Roy 2016, Vandesande 2016]. Cependant, elle nécessite la mise en place d'outils spécifiques (tels que l'atlas des altérations).

Les quatre étapes sont décrites ci-dessous :

Etape 1 : Anamnèse	Ce terme est souvent utilisé en médecine et fait référence à la collecte et à la récupération des informations données au cours d'une consultation. L'anamnèse permet l'identification des données et des informations significatives, telles que la localisation et la description des dommages affectant le bâtiment. Il est important de rechercher les informations historiques relatives aux étapes de construction du bâti. L'étude climatique de l'environnement est proposée [Van Roy 2016]
Etape 2 : Diagnostic	Hypothèses générées avec l'identification des altérations, la détermination de la cause des désordres, les investigations supplémentaires (si nécessaire), la synthèse des recherches historiques [Icomos 2014]. Deux approches sont envisageables : l'approche qualitative, principalement basée sur des observations identifiant les dommages structuraux, et l'approche quantitative, basée sur les tests de matériaux, le suivi et l'analyse structurale. Outils : atlas des altérations, cartographie des altérations, connaissance des systèmes de construction.
Etape 3 : Thérapie	Préconisations des actions en fonction du diagnostic
Etape 4 : Contrôle	Mise en place d'actions de surveillance cycliques et régulières pour la gestion préventive.

Tableau 6 : Synthèse de la méthodologie [Balarezo 2016]

Bien que ces méthodologies soient peu appliquées dans le monde du fait de leur méconnaissance et sans doute de leur niveau de complexité, des groupes de travail et des projets européens travaillent en commun pour améliorer la conservation du patrimoine en mettant en place des documents normatifs décrivant des méthodologies.

Depuis 2004, des groupes de travail se forment à l'échelle européenne pour la rédaction de documents méthodologiques communs pour les procédures d'intervention et les méthodes d'essai et d'analyses scientifiques. La France participe à la création de normes spécifiques à la conservation du patrimoine culturel matériel. Au sein du comité européen de normalisation (CEN), les travaux sont menés sous l'égide du comité technique CEN/TC 346 « Conservation of cultural property ». Le Tableau 7 indique les normes principales de la conservation du patrimoine culturel en relation avec nos travaux.

EN 15759-1	Environnement intérieur – Partie 1 : Recommandations pour le chauffage des églises, chapelles et autres édifices culturels
EN 15898	Principaux termes généraux et définitions correspondantes
EN 15801	Méthodes d'essai – Détermination de l'absorption d'eau par capillarité
EN 15803	Méthodes d'essai – Détermination de la perméabilité à la vapeur d'eau (dp)
EN 15886	Méthodes d'essai – Mesurage chromatique des surfaces
EN 16095	Constater l'état du patrimoine culturel mobilier
EN 16096	Évaluation et rapport sur l'état du patrimoine culturel bâti
EN 16242	Modes opératoires et instruments de mesure de l'humidité de l'air et des échanges d'humidité entre l'air et les biens culturels
EN 16302	Méthodes d'essai – Mesurage de l'absorption d'eau par la méthode à la pipette
EN 16455	Extraction et détermination des sels solubles dans la pierre naturelle et les matériaux associés utilisés dans le patrimoine culturel
EN 16515	Lignes directrices pour la caractérisation de la pierre naturelle utilisée dans le patrimoine culturel
EN 16572	Glossaire des termes techniques relatifs aux mortiers de maçonnerie et aux enduits utilisés dans le domaine du patrimoine culturel
EN 16790	Gestion de lutte intégrée contre les nuisibles (IPM) pour la protection du patrimoine culturel
EN 16682	Méthodes de mesurage de la teneur en humidité, ou teneur en eau, des matériaux du patrimoine culturel immobilier
EN 17121	Structures en bois du patrimoine – Lignes directrices relatives à l'évaluation sur site

Tableau 7 : Normes publiées par l'AFNOR

Des projets européens tels que RehabiMed, Tobus ou bien HeritageCare sont par ailleurs mis en place. RehabiMed a débuté en 1998 afin de contribuer à la mise en valeur et à la protection du patrimoine partagé par les différents pays méditerranéens. L'objectif de RehabiMed est de renforcer l'activité de réhabilitation et d'entretien de l'architecture traditionnelle méditerranéenne, comme facteur de développement durable (social, économique et environnemental). Pour atteindre cet objectif, le projet aborde la problématique en trois thématiques : 1) le développement d'outils stratégiques et méthodologiques destinés à la réhabilitation, 2) la mise en place de diverses actions de diffusion et de formation de professionnels avec les contenus des outils développés et 3) la mise en œuvre de quatre opérations pilotes avec des travaux réels de réhabilitation, afin de mettre à l'épreuve, d'expérimenter, de démontrer l'importance et les possibilités de même que les effets positifs que représente une bonne politique de réhabilitation [Casanovas 2007].

Tobus a quant à lui débuté en 2002. Son but est de mettre en place un outil d'évaluation de l'état des altérations pour déterminer les coûts de rénovation des bâtiments. Ce projet ne concerne pas le patrimoine culturel et historique mais reste intéressant puisqu'il a intégré une base de données reliée aux coûts de rénovation [Brandt 2002].

HeritageCare a débuté en 2016 pour aider les propriétaires à entretenir leur patrimoine immobilier et mobilier. L'objectif de HeritageCare est de proposer des méthodologies de maintenance afin d'anticiper les éventuelles dégradations. Nous proposons de présenter ce projet dans le paragraphe 1.2.2 de ce chapitre.

1.2.1.1 Synthèse et analyse critique

La littérature et les applications sur le patrimoine culturel et historique, c'est-à-dire le patrimoine protégé et non protégé, permettent de démontrer qu'il n'existe pas de gestion préventive de ce patrimoine. Pour mettre en place une méthodologie, nous nous baserons sur les applications qui sont utilisées dans le cas des ouvrages d'art, nous respecterons les quatre étapes préconisées dans la littérature (anamnèse, diagnostic, la thérapie et le contrôle) et nous utiliserons les recherches effectuées dans le cadre du projet HeritageCare et présentées dans le paragraphe suivant.

1.2.2 Projet européen HeritageCare

1.2.2.1 Motivations du projet

Au sein des trois pays concernés par le projet (France, Espagne et Portugal), il n'existe pas de stratégie de gestion du patrimoine qui intègre la surveillance, l'inspection et la maintenance préventive. C'est pour cette raison que le projet européen HeritageCare a pour but d'implémenter une méthodologie de maintenance du patrimoine bâti dans le Sud-Ouest de l'Europe, appelé espace SUDOE. L'ensemble du périmètre SUDOE est détaillé sur la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Le projet est motivé par ce principe « mieux vaut prévenir que guérir », et son but est donc de remplacer les interventions tardives par des mesures de conservation préventive pour réduire les coûts et pour préserver la valeur patrimoniale des bâtis protégés et non protégés.

Les trois objectifs principaux sont : (1) le développement d'une méthode de maintenance préventive, (2) la mise en place des outils nécessaires pour implémenter la méthodologie et la stratégie de gestion, (3) la création d'une entité à but non lucratif pour garantir la pérennité des résultats au-delà du projet. Ce projet rentre dans le cadre du programme Interreg-SUDOE. Le programme fait partie de l'objectif européen de coopération territoriale. Cet objectif est financé par l'un des fonds de la politique régionale européenne : le Fonds Européen de Développement Régional (FEDER). Les acteurs du projet et la gestion du projet sont présentés en annexe 4.

HeritageCare s'est inspiré d'une association à but non lucratif, appelée le Monumentenwacht située dans la région Flamande de la Belgique et aux Pays-Bas, qui a pour but de promouvoir la gestion préventive. Cette association a mis en place un système d'abonnement pour les maîtres d'ouvrages incluant une visite initiale puis des visites de suivi. Ces dernières permettent d'effectuer des petits travaux (exemple : nettoyage des gouttières, remettre les éléments déplacés sur la toiture) et de préconiser de l'entretien, des réparations et/ou des restaurations. Ces petits travaux permettent d'améliorer l'état des bâtis inspectés d'après la Figure 5. Le rapport de diagnostic informe également sur les éléments suivants : la vitesse de dégradation, l'importance de l'élément touché pour le patrimoine, les effets des dommages et le risque pour la sécurité [Balarezo 2016].

Le Monumentenwacht ne peut pas être appliqué en France puisqu'il est soutenu par la région Flamande qui participe financièrement au coût des abonnements ce qui génère des prix très attractifs. En effet, les abonnés doivent payer une souscription annuelle de 40 euros par bâti et le cout du diagnostic est de 45 euros par heure et par personne (sachant que la durée moyenne d'inspection est 3,5 heures avec deux professionnels). Cet institut rencontre un franc succès avec 3200 abonnés dont 12% de propriétaires publics, 40% de paroisses et 48% de propriétaires privés et permet donc d'appréhender au mieux la gestion préventive pour l'ensemble du patrimoine investigué.

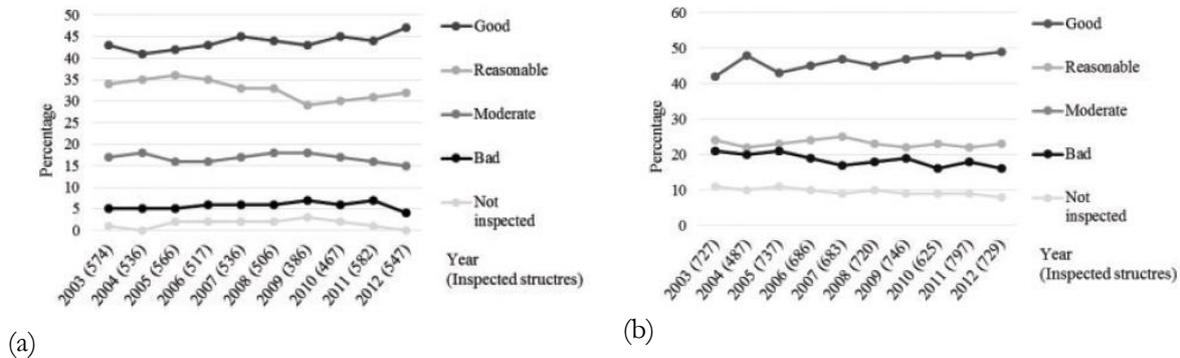


Figure 5 : (a) Evolution de l'état des toitures (b) Evolution de l'état des gouttières inspectées par le Monumentenwacht [Vandesande 2016]

1.2.2.2 Présentation de la méthodologie

La stratégie du projet HeritageCare s'appuie sur la mise en place d'une méthodologie de gestion à trois niveaux pour l'inspection systématique, le diagnostic, la préservation et la gestion du patrimoine culturel.

1.2.2.2.1 Niveau de service SL1

Ce niveau, appelé « StandardCare », s'appuie sur une inspection visuelle du bâti et de son mobilier. L'état des lieux est réalisé par des professionnels d'HeritageCare avec une phase de préparation, une phase d'inspection sur place et une phase après inspection. Ces trois étapes respectent la norme [Afnor 2012] et constituent le niveau de service 1 schématisé ci-dessous :

Etape 1 : Avant l'inspection	Etape 2 : Pendant l'inspection	Etape 3 : Après l'inspection
<ul style="list-style-type: none"> -Enquête auprès du propriétaire -Information sur le bâti -Etude historique -Information de gestion et d'équipements -Enregistrement des objets intégrés et du mobilier -Sélection du matériel pour l'inspection 	<ul style="list-style-type: none"> -Mise en place du protocole d'inspection -Attribution des critères liés à l'état et au risque -Réalisation de petits travaux (si nécessaire) 	<ul style="list-style-type: none"> -Téléchargement de l'ensemble des données sur la plateforme informatique -Rapatriement du rapport sur la plateforme informatique -Envoi du rapport avec les recommandations au propriétaire -Questionnaire à envoyer pour avoir un avis critique du travail effectué -Enregistrement sur la plateforme informatique des actions du propriétaire suivant les recommandations

Tableau 8 : Récapitulatif des étapes à effectuer dans le cadre du SL1

L'état des lieux comprend une phase préalable à l'inspection qui vise à collecter toutes les informations nécessaires qui constitueront la base du travail de terrain ultérieur. Au cours de cette première étape, les informations suivantes sont compilées : une enquête auprès du propriétaire ; les informations d'identification du bâti, les informations de gestion et les informations sur les équipements.

Les inspections in-situ sont effectuées par des personnes possédant des connaissances suffisantes en matériaux, techniques de construction et mécanismes d'altération des matériaux et biens patrimoniaux. Les relevés sur le terrain se font par le biais d'une plateforme informatique ; ils ont pour but de relever l'état puis les risques associés aux éléments constituant le bâti.

D'après le Tableau 9, l'état des éléments peut être bon, moyen, médiocre ou mauvais. Pour chacun de ces états sont associés des symptômes, des risques en fonction de l'urgence et un commentaire. Par exemple pour l'état considéré comme moyen, ses symptômes sont mineurs, ses risques en fonction de l'urgence sont « à moyen terme » et les commentaires associés sont « L'état n'est pas parfait mais ne nécessite pas d'action immédiate / Un monitoring est nécessaire pour anticiper les futures altérations ».

Classement selon l'état des éléments	Symptômes	Classement des risques en fonction de l'urgence	Commentaire
Bon	Aucun symptôme	A long terme	Aucune action immédiate / Une surveillance préventive est nécessaire
Moyen	Symptômes mineurs	A moyen terme	L'état n'est pas parfait mais ne nécessite pas d'action immédiate / Un monitoring est nécessaire pour anticiper les futures altérations
Médiocre	Symptômes passablement forts	A court terme	L'état nécessite des réparations / Un diagnostic supplémentaire doit être effectué
Mauvais	Symptômes majeurs	Immédiat	Réparation urgente / Diagnostic supplémentaire indispensable
Non accessible	Partie non accessible	Non inspecté	Zone non inspectée (problème de sécurité et/ou non visible – non accessible)

Tableau 9 : Echelle de classement (état et risque) de HeritageCare

Une plateforme informatique a été mise en place dans le cadre du projet HeritageCare avec un objectif double. Les professionnels peuvent rassembler l'ensemble des données sur le bâti (plan, recherche historiques, diagnostic...) et permettre l'élaboration du rapport de diagnostic (avec le classement de l'état des éléments et le classement des risques en fonction des urgences, des photographies prises lors de l'intervention sur place, des recommandations). L'Annexe 10 : Exemple d'un rapport HeritageCare, de ce mémoire présente un rapport élaboré avec la plateforme informatique. Par ailleurs, les gestionnaires du patrimoine culturel et historique peuvent suivre l'état de leur bâti en continu et accéder à l'ensemble des données que les professionnels de HeritageCare partagent avec eux.

La plateforme se décompose en une page d'accueil rassemblant l'ensemble des bâtis que nous avons inspecté, puis pour chacun des bâtis :

- Un onglet appelé « building ID » rassemble les éléments liés à l'identité (avec les informations générales, les informations sur le gestionnaire, les informations sur la structure du bâti, les informations sur l'historique et le téléchargement des plans) ;
- Un onglet pour chacun des niveaux de service.

L'application de ce niveau de service est développée au paragraphe 4.2.1.1.

1.2.2.2.2 Niveau de service SL2

Le deuxième niveau de service, appelé « PlusCare », permet d'aller plus en profondeur dans la compréhension du bâti. Les résultats sont mis à la disposition du propriétaire sur un modèle 3D de l'édifice (effectué par photogrammétrie ou à l'aide d'une caméra 360). Comme pour le SL1, le niveau de service 2 suit un protocole d'inspection qui peut varier en fonction de la procédure d'enregistrement 3D sélectionnée.

Il comprend deux tâches principales : la visite virtuelle et la collecte d'informations supplémentaires (sur le bâti et le mobilier). Le but de ce niveau est de proposer une visite virtuelle du bâti qui permettra aux utilisateurs d'entrer et de se déplacer virtuellement dans le modèle 3D. Les inspections sont effectuées par au moins un professionnel possédant une expertise suffisante dans les techniques de relevés 3D. Après l'inspection, un travail de traitement est effectué pour exploiter les données brutes saisies sur le terrain, l'ensemble des données sont téléchargées pour alimenter la plateforme informatique. Le Tableau 10 propose un récapitulatif des étapes à effectuer dans le cadre de ce niveau.

Etape 1 : Avant l'inspection	Etape 2 : Pendant l'inspection	Etape 3 : Après l'inspection
<ul style="list-style-type: none"> -Consultation des données provenant du SL1 -Recherche de données cartographiques -Choix de la technique de modélisation 3D -Sélection du matériel pour l'inspection 	<ul style="list-style-type: none"> -Mise en place du protocole de modélisation 3D -Mise en place du protocole de photographies pour la visite virtuelle -Enregistrement de l'ensemble des données (auscultation non destructive, mobilier inventaire, suivi climatique/structural) 	<ul style="list-style-type: none"> -Traitement des données -Téléchargement des données dans la plateforme -Enregistrement sur la plateforme informatique des actions du propriétaire suivant les recommandations

Tableau 10 : Récapitulatif des étapes à effectuer dans le cadre du SL2

L'application de ce niveau de service est développée au paragraphe 4.2.1.1.3.

1.2.2.2.3 Niveau de service SL3

Le troisième niveau de service, appelé « TotalCare », permet de représenter le bâtiment par une maquette numérique. Le développement de ces maquettes numériques, appelées hBIM « Historic Building Information Modeling », dans le cadre du projet a pour but de centraliser et de gérer toutes les informations (provenant des trois niveaux : information géographique, cartographie des matériaux, altérations, investigations supplémentaires, capteurs, etc.) pour faciliter la prise de décision en matière de maintenance et de mesures de conservation préventive. Par ailleurs, il est important de noter que la maquette numérique avec l'ensemble des informations est un outil qui peut être facilement mis en réseau afin de faciliter les échanges entre les différents acteurs.

Cette technologie est encore peu utilisée dans le domaine du bâti ancien car elle ne tient pas compte des spécificités du patrimoine culturel et historique. Cependant, elle commence à être utilisée dans le cadre de travaux importants de réhabilitation. La méthodologie SL3 est innovante car elle propose d'utiliser le BIM pour gérer l'entretien, donc la conservation du patrimoine. Le Tableau 11 propose un récapitulatif des étapes à effectuer dans le cadre de ce niveau.

Etape 1 : Avant l'inspection	Etape 2 : Pendant l'inspection	Etape 3 : Après l'inspection
<ul style="list-style-type: none"> -Enregistrement des données provenant du SL1 et SL2 -Sélection du matériel pour l'inspection -Modélisation 3D BIM sur la plateforme 	<ul style="list-style-type: none"> -Mise en place du protocole d'inspection 	<ul style="list-style-type: none"> -Traitement des données -Téléchargement des données dans la plateforme -Mise en place du plan de maintenance préventive

Tableau 11 : Récapitulatif des étapes à effectuer dans le cadre du SL3

L'application de ce niveau de service est développée au paragraphe 4.2.1.1.3.

1.2.2.3 Synthèse

Ce projet, finalisé en août 2019, montre qu'il y a une volonté très forte pour mettre en place une méthodologie en vue d'améliorer la conservation des édifices. Ces actions ont été menées par dix-neuf partenaires européens (présentés dans l'Annexe 4 : Présentation de HeritageCare) représentés par des universités, des centres de recherche et des associations dont sept acteurs français.

1.2.3 Identification de l'état de dégradation

Actuellement, il existe diverses méthodes pour évaluer l'état de dégradation des éléments du bâti. Nous distinguons d'une part les échelles de classification et d'autre part des critères d'altérations. Ces deux approches permettent de caractériser le bâti à un instant donné.

1.2.3.1 Echelles de classification

Plusieurs auteurs ont mis en place des systèmes de classification des défauts et des critères de dégradation afin d'exprimer la détérioration visuelle et fonctionnelle des éléments analysés. Généralement, ces systèmes de classification consistent à classer les défauts en fonction d'une échelle de variables discrètes, qui varie de la condition la plus favorable (pas de dégradation visible) à la condition la plus défavorable (dégradation généralisée). Bien qu'elles soient faciles à utiliser et à interpréter, ces systèmes de classification présentent certaines limites : les échelles adoptées fournissent uniquement des paramètres de dégradation qualitatifs (au lieu de paramètres quantitatifs). Des exemples d'échelles, plus ou moins détaillés, sont indiqués dans le Tableau 12.

Source	Qté cat.	Description des catégories
[Afnor 2012]	4	-Aucun symptôme (CC0), -Symptômes mineurs (CC1), Catégorie 1 : Peinture abîmée, présence de mousse sur les tuiles et quelques tuiles cassées ; -Symptômes passablement forts (CC2) Catégorie 2 : Dommages localisés causés par une attaque biologique (pourriture humide) dans les panneaux, nécessitant une remise en état et un remplacement partiel ; -Symptômes majeurs (CC3), Catégorie 3 : Fuite au niveau de la toiture, entraînant un dommage consécutif et un dommage majeur causé par attaque fongique ou de pourriture. -NOTE Des symptômes en apparence mineurs peuvent cacher des désordres imprévus. La catégorie CC 3 comprend également l'effondrement de la structure et les défaillances fonctionnelles totales.
[Nachbar 2019]	5	-Bon -Passable -Défectueux -Mauvais -Péril
[Duling 2006]	5	-Excellent : l'objet ou le bâti est considéré comme neuf, il ne présente aucun signe de détérioration. -Bon : l'objet ou le bâti présente une usure superficielle, des défauts mineurs et nécessite un entretien. Il peut être rétabli avec une maintenance ou un entretien non planifié. -Moyen : l'objet ou le bâti nécessitent une réparation qui doit être effectuée par une entreprise spécialisée. Le bâti a été soumis à une utilisation anormale, et son mauvais état peut affecter les éléments environnants. Des travaux de maintenance sont en attente. -Médiocre : l'objet ou le bâti sont gravement altérés et ils nécessitent des travaux de rénovation. Il existe un risque imminent. L'état du bâti a un impact sur les éléments environnants et/ou crée un risque potentiel pour la santé ou la sécurité. -Très médiocre : l'objet ou le bâti n'ont plus leur rôle initial et ne sont plus opérationnels. Ils ne peuvent pas être restaurés, ils doivent être remplacés. L'état du bâti a un impact sur les éléments environnants et/ou crée un risque potentiel pour la santé, et la vie.
[Miyamoto 1991]	5	-Sans risque : indique que le pont est en bon état -Presque sans risque : indique qu'il n'y a pas de dommages importants -Modéré : indique qu'il y a des dommages qui nécessitent une inspection -Légèrement dangereux : indique que le pont doit être réparé et/ou renforcé -Dangereux : indique que le pont ne doit plus être utilisé et qu'il nécessite une reconstruction

Tableau 12 : Exemples d'échelles

Dans un second temps, la détermination de l'état de dégradation peut être déterminée à l'aide de ces critères quantitatifs et qualitatifs. Pour cela des référentiels ont été mis en place : [Ashto 2010, Odot 2009, Birmm 2015, Setra 2006]. Ce sont des référentiels destinés à être utilisés sur des ouvrages d'arts. Ils intègrent un certain nombre de critères sur les matériaux utilisés dans le patrimoine culturel et historique : la maçonnerie, le bois et le métal. Ils sont synthétisés en Annexe 5 : Données pour constituer des référentiels.

Dans un troisième temps, des auteurs [Silva 2011b, Silva 2016, Mousavie 2017] proposent des conditions de dégradation pour le cas des revêtements de façade en pierre naturelle, définies en fonction de l'étendue de la façade affectée par chaque groupe de défauts et en tenant compte de l'importance des différents défauts à l'intérieur de chaque groupe. Par exemple, le Tableau 13 propose une échelle de sept critères pour lesquels sont associés une quantification en pourcentage des désordres.

Evaluation de l'état	Description de l'état	Altération %
7	Excellent : aucun désordre détecté	0-10
6	Très bon : désordre mineur	11-25
5	Bon : présence de quelques désordres	26-40
4	Moyen : désordre modéré	41-55
3	Médiocre : désordre majeur	56-70
2	Très médiocre : détérioration importante	71-85
1	Dangereux	>85

Tableau 13 : Table de dégradation mixte (qualitative et quantitative) par [Duling 2006] (traduit)

Dans le cas d'une étude sur une façade en pierre naturelle [Silva 2016], cinq états sont proposés et chacun de ces états détaillent le pourcentage minimal de défauts associés. A titre d'exemple, le Tableau 14 définit l'état appelé « légère dégradation » :

Condition de dégradation	Désordres	% de surface impacté
Condition C : légère dégradation	Dégradation en surface des matériaux	Tâche d'humidité Tâche localisée Changement de couleur Mousse, lichen, algue Colonisation biologique Efflorescence Défaut de planéité >15 <30 >10 - <50
	Désordre sur les joints	Dégradation du joint Perte de matière – joint ouvert <30 <10
	Désordre du support	Ecaillage des contours des pierres <20
	Défauts intégrité	Dégradation de la surface des matériaux < 10 % >20 <20 Dégradation de la surface des matériaux entre 10% et 30% <20 Ouverture fissure <1 mm <5 Ouverture fissure >1 mm et < 5 mm Fracture

Tableau 14 : Table de dégradation mixte proposée par [Silva 2016] – pour le cas des façades en pierres naturelles – condition C (traduit par Clémence Cauvin-Hardy)

1.2.3.2 Caractérisation de l'altération du bâti par la mise en place d'un critère

Dans cette partie, nous présentons quatre indices caractérisant l'état de la structure que nous avons trouvée dans la littérature.

1.2.3.2.1 Indice de dommage linéaire

Pour ce premier exemple l'indice de dommage linéaire DI a été mis en place par [Fitzner 2002]. Il préconise d'effectuer une cartographie des matériaux puis la cartographie des altérations en attribuant une altération et une catégorie de dégradation principalement définie quantitativement (entre D et F). Ces deux paramètres permettent de calculer l'indice de dégradation. L'indice de dégradation, qui va de 0 à 5, permet de quantifier et d'évaluer les dégradations pour des bâtis entiers ou seulement des parties. Il permet la comparaison et le classement des différents monuments ou de leurs composants et peut être utilisé comme outil de maintenance dans la réévaluation régulière des monuments.

$$DI = \frac{(A.0) + (B.1) + (C.2) + (D.3) + (E.4) + (F.5)}{100} \quad (1)$$

avec :

DI : Indice de dommage linéaire

A : Surface concernée (%) – catégorie d'altération 0

B : Surface concernée (%) – catégorie d'altération 1

C : Surface concernée (%) – catégorie d'altération 2

D : Surface concernée (%) – catégorie d'altération 3

E : Surface concernée (%) – catégorie d'altération 4

F : Surface concernée (%) – catégorie d'altération 5

avec : $\sum_A^F = 100$

1.2.3.2.2 Indice de désordre

L'indice de désordre appelé FI a été mis en place par [Bauer 2011]. Il s'agit d'un rapport entre le nombre de défauts comptabilisés et la superficie des zones inspectées. Dans cette étude, il avait été mis en évidence, entre autres, que la quantité de désordres fluctue en fonction de l'orientation des façades et des impacts climatiques.

$$FI = \frac{NF}{FA} \quad (2)$$

avec :

FI : Indice de désordre

NF : nombre de désordres (quantité)

FA : superficie des façades (m²)

1.2.3.2.3 Indice de sévérité

L'indice de sévérité appelé S_w a été mis en place par Gaspar et Brito [Pedro 2008] et est utilisé dans différentes études dont [Silva 2012, Silva 2016]. Il est défini comme étant le rapport entre la zone dégradée pondérée à l'aide d'un facteur et la surface totale du revêtement pondérée par le facteur le plus élevé.

$$S_w = \frac{\sum(A_n \cdot k_n \cdot k_{a,n})}{A \sum(k_{max})} \quad (3)$$

avec :

S_w : la gravité de la dégradation, exprimant le niveau global de dégradation de la façade en % ; il varie de 0 (bon état des matériaux) à 100% (mauvais état des matériaux) ;

A_n : la zone du revêtement affectée par des dégradations n (m^2) ;

k_n : le facteur multiplicateur n de l'anomalie en fonction de son niveau de dégradation variant entre 0 (pas de dégradation visible) et 4 (dégradation généralisée) ;

$k_{a,n}$: le coefficient de pondération correspondant à l'importance relative de chaque anomalie ($k_{a,n} \in]0, +\infty[$). Le coût de réparation peut être pris en compte avec ce coefficient. Par conséquent, le coût de la réparation de chaque anomalie est comparé au coût d'application d'un nouveau revêtement.

1.2.3.2.4 Indice apparent

L'indice apparent a été mis en place dans le cadre de la méthodologie proposée pour la gestion des ouvrages d'art en France [Setra 2006]. Il est calculé à l'aide de deux sous indices. Son but est de permettre d'évaluer l'état apparent de chaque ouvrage, afin d'obtenir une image de l'état du patrimoine. L'indice global IE, qui qualifie l'état général de l'ouvrage, se calcule à partir de deux indices d'état partiels IE_t et IE_a correspondant respectivement aux parties d'ouvrage « tablier » et « appuis ». Le Tableau 15 récapitule les différents niveaux de l'indice apparent.

IE	Description
1	L'ouvrage ne présente aucun désordre ou des désordres infimes ;
2	L'ouvrage présente des désordres mineurs et peu étendus ;
3	L'ouvrage présente des désordres mineurs et étendus ou des désordres significatifs et peu étendus ;
4	L'ouvrage présente des désordres significatifs et étendus ;
5	L'ouvrage présente des désordres importants mais peu nombreux ;
6	L'ouvrage présente des désordres préoccupants et/ou nécessitant une augmentation de la fréquence de la surveillance périodique ;
7	L'état de l'ouvrage nécessite une surveillance renforcée ;
8	L'état de l'ouvrage nécessite sa mise sous haute surveillance, à quoi s'ajoutent des mesures de sécurité immédiates ou des mesures de sauvegarde ;
NE	L'état de l'ouvrage n'est pas évalué.

Tableau 15 : Echelle de l'indice global

1.2.3.3 Synthèse et analyse critique

La littérature permet de montrer qu'il existe pratiquement pour chaque méthodologie mise en œuvre une échelle de classement et/ou un indice pour caractériser le patrimoine. Derrière ces méthodes de caractérisation, il existe un ensemble d'outils qui doivent être mis en place pour pouvoir caractériser le patrimoine, tel que l'atlas d'altérations, les référentiels associés, les méthodologies liées aux visites, etc. Nous pouvons retenir qu'il est préférable de caractériser le bâti par les altérations pour avoir une perception de la structure.

Dans le Tableau 16 nous proposons pour chaque exemple ses avantages principaux et ses limites principales.

Indices	Avantages	Limites
Domage linéaire	-caractérisation de l'élément ou du bâti	-difficultés d'attribuer un pourcentage dans les cinq catégories -ne prend pas en compte l'urgence et/ou le risque
Désordre	-simple à mettre en place (car seulement nbre de défauts sur la superficie inspectée)	-absence de catégorie lié à l'état/ l'urgence/ ou le risque -absence de quantification
Sévérité	-quantification des altérations -indice lié à l'état -indice lié au coût des réparations en fonction de la typologie des altérations	-absence d'indice lié au risque -absence de référentiel lié aux altérations -nécessite la mise en place d'une bibliothèque de coûts de réparations associés à chaque désordre
Apparent	-précision de l'échelle	-spécifique aux ouvrages d'art

Tableau 16 : Comparaison des indices « d'altérations »

Synthèse et problématique

Ce premier chapitre permet de faire le point sur la politique de conservation préventive en France. La conservation préventive est définie comme étant des mesures et des actions visant à éviter les dégradations futures. En France, cette notion existe uniquement sur le patrimoine protégé au sein de la loi de protection des monuments historiques mais elle est peu efficace puisque bien souvent les travaux d'entretien sont confondus avec les travaux de restauration.

Pour la mise en place d'une méthodologie de gestion préventive, nous avons présenté trois méthodologies principales : les méthodologies existantes de gestion préventive, la méthodologie élaborée dans le projet HeritageCare avec ses trois niveaux de service et la caractérisation de l'état de dégradation avec la présentation des indices existants.

La thèse que nous défendons dans ce mémoire porte sur la mise en place d'une méthodologie de gestion préventive sur l'ensemble du patrimoine culturel et historique pour aider les propriétaires à entretenir leurs bâtis. Elle permet de contribuer à favoriser le développement de cette approche en termes de responsabilité patrimoniale, de maîtrise des coûts et d'acteur de la transmission du patrimoine.

Cette approche générale se décompose en plusieurs thématiques avec la démarche de gestion préventive, la mise au point de modèles d'agrégation et la proposition d'une base de données d'actions de maintenance, qui sont détaillées comme suit :

- Démarche de gestion préventive :
Nous proposons une méthodologie de gestion préventive, que nous avons mise en place en interaction avec le projet HeritageCare. Cette démarche est présentée dans le chapitre 2, elle est décomposée en quatre étapes : l'anamnèse, le diagnostic, la thérapie et le contrôle ;
- Modèles d'agrégation :
Dans le chapitre 3, nous proposons cinq familles de critères, appelés indicateurs, qui ont pour but de caractériser le bâti de par son état structural, son environnement, sa vulnérabilité, ses coûts de travaux et son aspect socio-économique. La pondération associée à ces critères est obtenue par une démarche d'analyse multicritère hiérarchique (AHP). La mise en place de matrices de criticité permet d'agréger les cinq indicateurs afin de déterminer : la vitesse d'altération des bâtis, le risque de perte de solidité, la motivation du propriétaire à engager des travaux et enfin la prise de décision du propriétaire. L'utilisation de courbes d'altération permettent d'obtenir la durée de vie résiduelle des bâtis ;
- Actions de maintenance :
Également dans le chapitre 3 ; nous avons développé une base de données des travaux de maintenance et nous proposons une méthodologie pour les hiérarchiser.

Le chapitre 4, permet d'illustrer et de valider la méthodologie de gestion préventive que nous proposons. Dans un premier temps nous présentons l'ensemble des bâtis puis leur état en se basant sur les résultats du critère d'altération et du critère d'intégrité par bâti et par corps d'état.

Le chapitre 5, permet d'agréger l'ensemble des résultats aux modèles pour obtenir : une hiérarchisation des bâtis, une aide à la décision d'engager les travaux de maintenances, la durée de vie résiduelle des bâtis et une hiérarchisation des actions de maintenance.

La figure suivante propose une schématisation de l'ensemble des travaux de la thèse en interaction avec le projet HeritageCare.

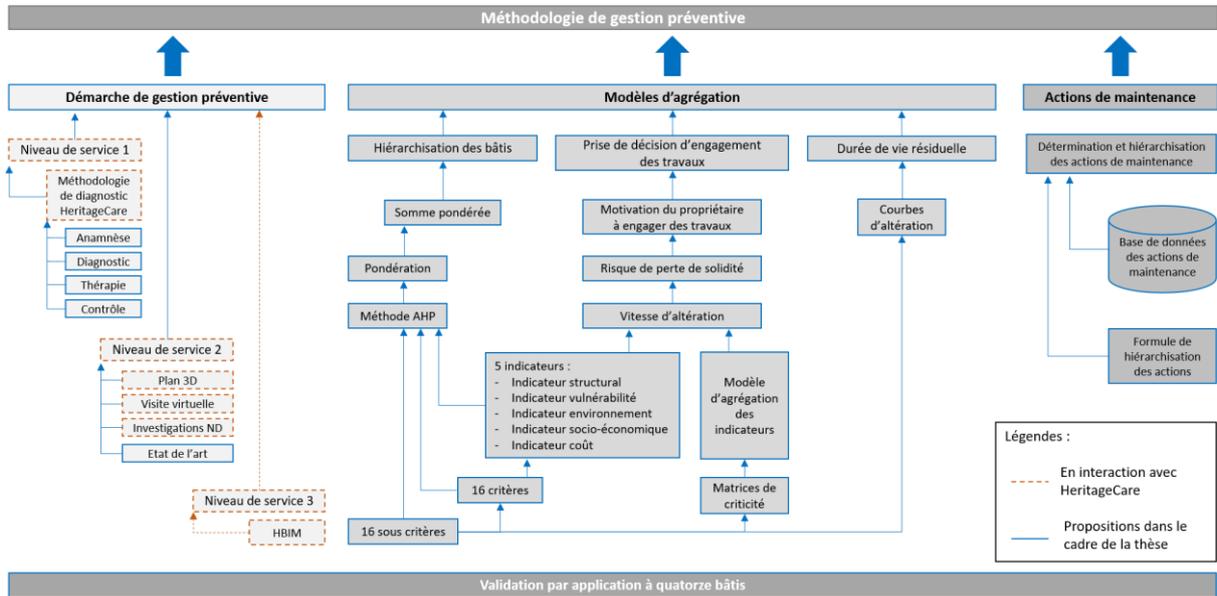


Figure 6 : Schématisation des travaux de la thèse

La figure suivante présente l'organisation des chapitres de la thèse.

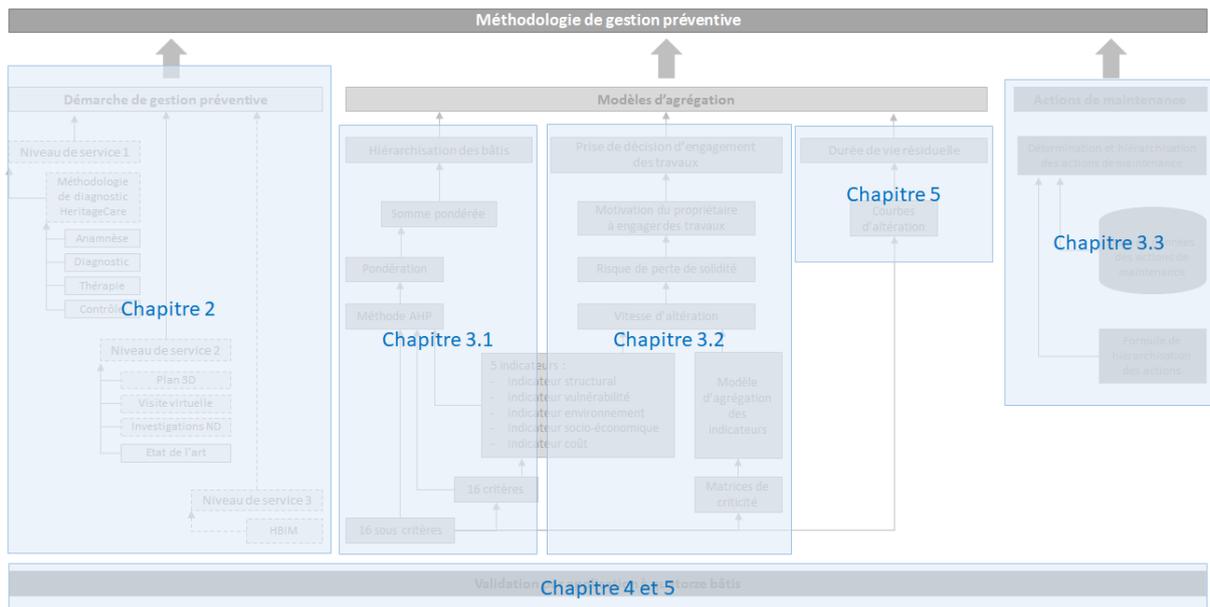


Figure 7 : Organisation des chapitres de la thèse

Chapitre 2 : Démarche d'une gestion préventive

Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons mis en évidence qu'en France, les travaux de réparation et de restauration sont privilégiés par rapport aux travaux d'entretien. Les travaux, sont souvent effectués lorsque les dommages sont présents, ce qui conduit à des interventions nécessitant des investissements financiers mais parfois même techniques importants. Le projet HeritageCare apporte une réponse à cette problématique, en aidant les propriétaires à développer une gestion préventive de leur patrimoine (qu'il soit protégé ou non, public ou privé). Les travaux de la thèse ont interagi et alimenté le projet.

Ce deuxième chapitre « Démarche d'une gestion préventive » s'articule autour des quatre étapes de la méthodologie proposée :

- Etape d' « anamnèse » dédiée à la recherche d'informations et de la préparation de la mission ;
- Etape de « diagnostic » comprenant la mise en place de l'atlas d'altérations, l'élaboration d'un référentiel des altérations et les instructions pour l'inspection ;
- Etape de « thérapie » comprenant la définition de chacune des solutions de recommandations ;
- Etape de « contrôle » consacrée à la définition des mesures préventives régulières.

La figure suivante présente en rouge le contenu de ce chapitre par rapport à la globalité des travaux de thèse.

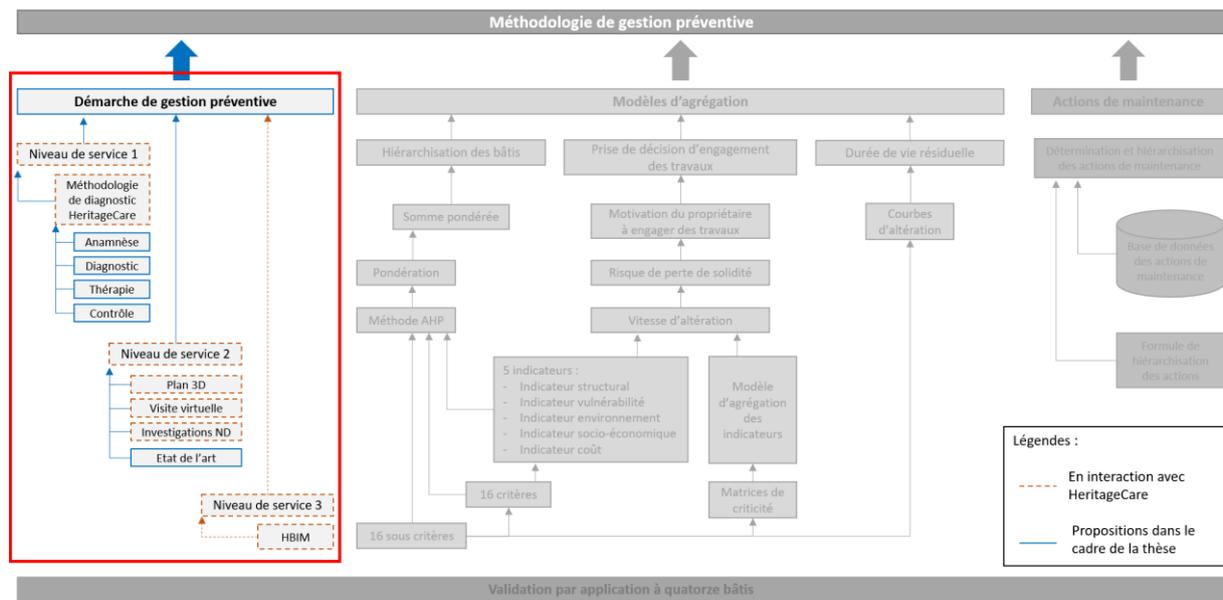


Figure 8 : Contenu de la thèse présenté dans ce chapitre 2

L'interaction de la démarche proposée avec la méthodologie HeritageCare fait l'objet du paragraphe 4.2.1.

2.1 Etape 1 : Anamnèse

La première étape a comme but de préparer l'intervention, en prenant contact entre autres avec le gestionnaire et le propriétaire, pour rechercher des informations sur le bâti.

2.1.1 Recherche d'informations

Avant de démarrer l'intervention in situ, des informations administratives, historiques et techniques sur le bâti doivent être recherchées.

2.1.1.1 Informations administratives

Les informations administratives peuvent provenir de plusieurs sources : le propriétaire, les archives (MAP⁷, AN⁸, AD⁹ et AM¹⁰), de rapports travaux, des bases de données publiques en ligne (ex : base patrimoine architectural avec Mérimée¹¹, base patrimoine mobilier avec Palissy¹², base Architecture et patrimoine¹³, etc). Les principales informations relatives au bien comprennent : l'identification du bien, la localisation géographique, les coordonnées des propriétaires, les coordonnées du gestionnaire (si existant), le statut du bâti (si présence ou non d'une protection).

2.1.1.2 Informations historiques

Le recueil de données historiques est essentiel pour appréhender l'édifice dans toute sa complexité. Ces informations de natures variées permettent de mieux comprendre le bâti, son histoire, sa structure, ses matériaux et ses altérations visibles. Les éléments qui peuvent être récupérés sont principalement et selon les cas : des plans et des photographies qui permettent de faciliter les relevés, des anciens rapports de diagnostic, des synthèses des interventions de conservation et d'entretien réalisées, des synthèses des modifications fonctionnelles et structurales.

Dans le cas des bâtis protégés, les recherches documentaires s'effectuent principalement aux archives. Ces informations sont synthétisées sur la base Mérimée (dans le cas des biens immobiliers et sur la base Palissy dans le cas des biens mobiliers). Si le bâti est classé, des documents historiques peuvent être archivés et accessibles à la médiathèque de l'architecture du patrimoine situé à Charenton le Pont. Dans le cas des bâtis n'ayant pas de protection, les informations sont récupérées auprès des propriétaires et gestionnaires, et des archives départementales.

2.1.1.3 Informations techniques

Les informations techniques concernent principalement des diagnostics réglementés. Ces données sont en général regroupées dans un dossier technique appartenant au maître d'ouvrage. Ces documents sont établis en fonction de l'usage (privé, public) et du statut (propriété, location) du bâtiment.

Les diagnostics immobiliers, principalement effectués pour des bâtis non protégés et/ou des monuments inscrits, visent à informer l'acquéreur ou le locataire sur certains aspects du logement dans le cas d'une vente ou d'une location. Pour les établissements recevant du public (ERP), les règles de sécurité d'incendie et d'accessibilité peuvent varier en fonction du classement du bâtiment.

La liste des diagnostics sont synthétisés dans le Tableau 17.

⁷ Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine

⁸ Archives Nationales

⁹ Archives Départementales

¹⁰ Archives Municipales

¹¹ <https://www.pop.culture.gouv.fr/>

¹² <https://www.pop.culture.gouv.fr/>

¹³ <http://www2.culture.gouv.fr/culture/inventai/patrimoine/>

Nom du diagnostic	Objectif :	Obligatoire
Diagnostic de performance énergétique (DPE)	Evaluation de la quantité d'énergie et de gaz à effet de serre consommée ou dégagée par un logement	Obligatoire dans le cas de la vente / location d'un bien immobilier Concerné l'ensemble des constructions sauf les lieux de culte, bâtiments à usage principal industriel ou agricole ou artisanal, monuments historiques.
Constat de risque d'exposition au plomb (Crep)	Identification de la présence de plomb dans revêtement. Remarque : Actuellement la poussière de plomb est très problématique pour le patrimoine bâti. Vu qu'elle a été accumulée au fil des années sur les pierres des façades parisiennes et liée à la pollution atmosphérique, il y a un risque de contamination au plomb provoqué par la pollution ambiante, notamment par les anciens carburants plombés [ICOMOS 2017].	Obligatoire (détection plomb dans revêtement) lors de travaux le cas de la vente / location d'un bien immobilier si bien construit avant 1949.
Etat d'amiante	Identification de la présence d'amiante des biens construits avant 1997.	Obligatoire lors de travaux et dans le cas de la vente / location d'un bien immobilier si bien construit avant 1997
Etat relatif à la présence de termites	Détermination si présence d'insectes à larves xylophage dont les termites	Obligatoire en fonction du département. Concerné l'ensemble des constructions.
Etat de l'installation intérieure de gaz	Diagnostic de l'état des installations intérieures de gaz.	Obligatoire dans le cas de la vente/location d'un bien immobilier ayant une installation individuelle a plus de 15 ans.
Etat de l'installation intérieure d'électricité	Diagnostic de l'état des installations électriques des habitations qui ont plus de 15 ans.	Obligatoire dans le cas de la vente/location d'un bien immobilier ayant une installation individuelle a plus de 15 ans.
Etat de l'installation d'assainissement non collectif	Diagnostic de l'état des installations d'assainissement non collectif (par exemple, fosse septique) qui a pour but d'informer de la conformité ou non de l'installation avec la réglementation.	Obligatoire dans le cas d'une installation d'assainissement non collectif.
Etat des servitudes « risques » et d'information sur les sols	L'acquéreur ou le locataire d'un bien immobilier doit être informé par le vendeur ou le bailleur des risques et pollutions (naturels, miniers, technologiques, sismiques, radon...) auxquelles le bien est exposé. Pour ce faire, un diagnostic <i>état des risques et pollutions</i> fondé sur les informations transmises par le préfet du département, doit être annexé à la promesse de vente ou, à défaut, à l'acte de vente.	Obligatoire dans le cas de la vente/location d'un bien immobilier.
Cas des établissements recevant du public (ERP)	Les <u>établissements recevant du public (ERP)</u> sont soumis à des obligations en matière de sécurité et de lutte contre l'incendie. Les ERP sont classés en types et en catégories qui définissent les exigences réglementaires applicables (type d'autorisation de travaux ou règles de sécurité par exemple) en fonction des risques.	Obligatoire cas des ERP.

Tableau 17 : Synthèse des diagnostics techniques

2.1.2 Préparation de la mission et matériel nécessaire

Réalisée dans un cadre temporel limité, la visite doit faire l'objet d'une préparation en amont. Ce travail préparatoire doit permettre d'établir le calendrier et les modalités de la visite en lien avec le responsable du site.

A cet effet, il est nécessaire de prêter attention aux données pratiques suivantes : a-t-on l'autorisation de tous les propriétaires pour visiter l'édifice ? Qui aura la clé permettant d'entrer ? Existe-t-il des plans du bâtiment ? Faut-il effectuer un plan de prévention ? Si les plans sont inexistant il est souhaitable d'effectuer

un reportage photographique (principalement des façades) avant l'intervention. Les photographies permettront d'effectuer les relevés sur celles-ci. L'édifice a-t-il des zones obscures (sous-sols, greniers, etc.) dans lesquelles on aura besoin d'un éclairage spécial, de lanternes, etc. ? L'accès à tous les espaces sera-t-il facile ou faudra-t-il utiliser des escabeaux, des harnais de sécurité, des cordes, etc. ?

2.1.2.1 Réalisation de supports pour le relevé

La réalisation de supports pour le relevé est une étape importante ; elle nécessite d'effectuer une visite sur le site avant la réalisation de l'évaluation de l'état du bien. Pour cela, des plans et des photos doivent être effectués pour faciliter le relevé. Les plans sont issus des archives s'ils existent où ils sont faits à l'aide de dessin plus ou moins schématique. Pour faciliter le relevé, des photographies peuvent être effectuées avant l'intervention.

2.1.2.2 Relevé des modes de construction et des matériaux

Le relevé des modes de construction et des matériaux est effectué sur les plans et/ou sur le relevé photographique. Il a pour objectif l'identification de tous les types de matériaux employés : les types de maçonnerie et leurs appareils respectifs (les briques, les mortiers employés, les badigeons intérieurs, les crépis extérieurs, le bois employé dans les poutres, les types de planchers, les couvertures, etc.). Il sera aussi très intéressant de croiser l'information obtenue de l'étude de construction avec celle concernant les pathologies du bâtiment.

2.1.2.3 Outils pour l'observation in situ

Le matériel de base nécessaire à l'état des lieux est : une planche à dessin, un stylo quatre couleurs, un mètre, une lampe torche (ou lampe frontale), un appareil photo et les EPI.

Si lors de l'état des lieux, nous voulons aller un peu plus en profondeur pour la compréhension du bâti nous proposons comme matériel :

- Une loupe, une paire de jumelles, un appareil photo avec un télé objectif et un escabeau pour faciliter l'observation ;
- Un petit marteau burin, un poinçon, un ciseau à bois et des sacs en plastiques pour appréhender l'état des matériaux et/ou pour effectuer des petits prélèvements ;
- Un pachomètre, un radar et de l'auscultation sonique pour effectuer des mesures non destructives. Leur principe de fonctionnement est détaillé en Annexe 6 : Principe de techniques d'investigations non destructives.

2.2 Etape 2 : Diagnostic

L'équipe qui effectue la visite d'inspection du bâtiment doit avoir « des yeux formés et entraînés » et avoir de la patience (pour éviter la tentation de parvenir d'une manière trop rapide à des conclusions quant aux causes des problèmes), de la curiosité (ne pas considérer comme acquises des choses que l'on n'a pas pu vérifier) et de l'imagination (pour mesurer, vérifier des situations dans une visite) [Casanovas 2007].

Pour aider l'inspecteur dans ses missions, nous proposons la mise en place d'outils d'aide à l'identification des désordres sous la forme d'un atlas d'altération, des instructions pour l'inspection et enfin un référentiel des altérations.

2.2.1 Instruction pour l'inspection

Le diagnostic doit être effectué dans un ordre et avec une organisation qui permet de n'oublier aucun élément ni aucun problème déterminant. Le parcours d'inspection commencera à l'extérieur du bâtiment, d'où l'on pourra observer les symptômes que l'on suivra plus en détail pendant le parcours complet, en même temps cela permettra de se faire une idée globale du bâtiment faisant l'objet de l'étude.

En premier temps, nous proposons de relever les modes constructifs et les matériaux utilisés pour chacun des corps d'état. L'ensemble de cette cartographie des modes constructifs permet d'effectuer l'étude de construction avant même de débiter l'enregistrement de l'état. Elle permettra entre autres de déterminer l'évolution du bâti avec la prise en compte de ses agrandissements et de ses modifications pour mieux le comprendre.

En deuxième temps, nous proposons le relevé des altérations qui devront être localisées (à l'aide de l'atlas et du référentiel) sur les plans ou sur les photos. Chacune d'entre elle doit être quantifiée, hiérarchisée par des critères pour qualifier l'état, les risques et l'urgence afin de formuler des recommandations.

Par exemple, pendant l'inspection de la charpente, le guide que nous proposons, présente les typologies de charpente, le vocabulaire spécifique dédié à la charpente et des conseils pour savoir ce qu'il faut regarder pendant l'intervention. Ci-dessous un extrait du guide d'inspection avec les typologies de charpente, suivies par des conseils pour l'inspection synthétisés dans le Tableau 18 et le Tableau 19.

Les principaux types de charpente sont :

- Charpente ordinaire : il s'agit d'un versant ou charpente du toit à deux versants ;
- Charpente à croupe : il s'agit d'une toiture présentant 3 ou 4 versants nécessitant la présence d'une ou deux croupes. La croupe est un élément de charpente permettant de terminer une toiture ;
- Charpente à la Philibert : il s'agit d'une technique de charpente permettant d'optimiser l'usage des combles. Aux arbalétriers des fermes classiques, il est substitué des assemblages de cerces courbes. Le résultat est une charpente en courbe ;
- Charpente « à la Mansard » : il s'agit d'une technique de charpente permettant d'optimiser l'usage des combles, on parle de « mansardes » pour désigner des combles habités. Il s'agit d'une charpente à fermes triangulaires de faible pente.

Par ailleurs, des conseils pour l'inspection sont détaillés dans le Tableau 18 et le Tableau 19.

Couverture	
Check-list :	Matériaux couverture, mode de pose des matériaux, faitage, souche, arêtiers, rives, noues, lucarnes, etc.
Conseils :	<p>1/Déterminer la nature de l'ensemble des matériaux (matériau de couverture, matériau utilisé pour les éléments courants).</p> <p>2/Décrire les altérations composant la toiture (typologie altération, % affecté).</p> <p>3/Ne pas oublier de regarder les points singuliers dont : la ligne de faitage (rectiligne ou non), l'ensemble de la toiture afin de vérifier si elle présente une déformation et l'ensemble des équipements d'évacuations des eaux pluviales (altération : oxydation, colonisation biologique).</p> <p>4/Aller dans les combles, détecter les éventuels fuites (humidité, traces sombres).</p> <p>6/Vérifier la présence d'une lame d'air si les combles sont isolés.</p> <p><i>Plan : Relever si possible la dimension du matériau de couverture et son mode de fixation.</i></p>
Charpente	
Check-list :	Ferme, entre-ferme, pannes, chevrons, arbalétriers, poinçon, voliges, etc.
Conseils :	<p>1/Observer des zones sensibles par l'extérieur (raccord du toit avec les souches, ligne de faitage, dégradation des solins et par l'intérieur (si présence, trace de ruissellement sur les éléments en bois).</p> <p>2/Vérifier l'état structural des différents éléments de bois (fente, fléchissement, désolidarisation des assemblages...).</p> <p>3/Vérifier les bois encastés dans la maçonnerie (particulièrement les entrants, pannes sablières).</p> <p>4/Vérifier visuellement les assemblages (désolidarisation, humidité, etc.).</p> <p>5/Vérifier l'état sanitaire des différents éléments en bois par poinçonnement avec la détection éventuelle des insectes (vérification si présence sciure du bois) et la présence de champignons.</p> <p><i>Technique ND : Mesurer l'humidité des bois et mesure de l'humidité ambiante.</i></p> <p><i>Plan : Schématiser le plan des fermes et des entre-fermes.</i></p>
Evacuation des eaux pluviales	
Check-list :	Gouttières, descentes d'eaux pluviales, égouts, les raccords aux réseaux d'évacuation, les puisards, les puits, les sources, etc.
Conseils :	<p>1/Déterminer la nature des matériaux.</p> <p>2/Vérifier que toutes les sorties des gouttières ont des tuyaux de descente pour diriger l'eau loin de la construction (elle ne doit être pas redirigée vers la structure ou vers les fondations).</p> <p>3/Noter les altérations de ces équipements (problème fixation, vieillissement des matériaux, perforation, problème soudure...). Noter si présence de débris dans ces équipements et si donc obstruction.</p> <p>4/Noter les altérations induites sur la structure interne et externe du bâti (trace infiltration, trace oxydation, etc.).</p> <p>5/Noter le diamètre des DEP.</p> <p><i>Plan : Localiser les DEP, les gouttières et les chéneaux sur un plan.</i></p>
Enveloppe du bâti	
Check-list :	Éléments structuraux verticaux, éléments structuraux horizontaux, balcons et terrasses, escaliers extérieurs, repérage des arrivées réseaux, etc. Menuiseries : fenêtres, volets, garde-corps, portes, etc.
Conseils :	<p>1/Détecter la typologie des murs (maçonnerie, enduit, pan de bois, etc.).</p> <p>2/Relever la nature des matériaux constituant le mur.</p> <p>3/Relever l'ensemble des altérations et les indiquer sur un plan.</p> <p>4/Déterminer si présence d'un traitement en surface de la pierre (ex : hydrofuge sur la pierre).</p> <p><i>Technique ND : Réaliser les essais in situ non destructif si besoin : mesure hygrométrique, pipette de karsten, auscultation sonore.</i></p> <p><i>Plan : localiser les différents types de revêtements.</i></p>
Cas des murs enduits :	<p>1/Déterminer la nature de l'enduit visuellement (parfois l'enduit situé en partie basse est différent de celui de l'élévation).</p> <p>2/Sonner pour vérifier l'adhérence à la façade et relever les altérations (adhérence enduit, humidité, sels, etc.).</p> <p>3/Essayer de visualiser la nature du mur et de son état sous l'enduit.</p> <p>4/Déterminer si possible l'épaisseur de l'enduit et le nombre de couches.</p> <p><i>Technique ND : test sels avec bandelette, mesure hygrométrique</i></p> <p><i>Plan : localisation des zones enduites</i></p>

Tableau 18 : Instruction pour l'inspection

(suite) Enveloppe du bâti	
Cas spécifique des balcons :	<p>1/Déterminer les matériaux (dalle et corbeau) et le mode constructif.</p> <p>2/Déterminer altération (ex : fissure parallèle façade ou perpendiculaire)</p> <p>3/Vérifier l'écoulement de l'eau.</p> <p>4/Mesurer l'épaisseur de la dalle.</p> <p>Réaliser les essais in situ non destructif : pachomètre / radar : pour déterminer si présence de métal dans la dalle.</p> <p><i>Technique ND : pachomètre / radar pour déterminer si présence de métal.</i></p> <p><i>Plan : localisation des balcons</i></p>
Cas spécifique des menuiseries :	<p>1/Vérifier que les fenêtres ont toujours leur rôle de protéger contre la pluie, l'air et des insectes.</p> <p>2/Déterminer les matériaux utilisés et prise des mesures des fenêtres.</p> <p>3/Déterminer les altérations sur les matériaux (bois) : au niveau des appuis de fenêtre, au niveau de la connexion entre les cadres de fenêtres et la maçonnerie. S'il y a des ouvertures qui se sont développées, le calfeutrage doit être appliqué entre le bois et la maçonnerie.</p> <p>4/Examiner les éléments du cadre de la fenêtre, rechercher les signes de pourriture et les endroits où la peinture ou la laque a cloqué, s'est fissurée ou s'est usée.</p> <p>5/Vérifier l'alignement des fenêtres, car les structures des fenêtres peuvent se désaligner lorsqu'un bâtiment bouge un peu.</p> <p><i>Technique ND : mesure hygrométrique</i></p> <p><i>Plan : localisation des fenêtres</i></p>
Intérieur de l'édifice	
Check-list :	<p>Éléments structuraux verticaux : murs / fondations,</p> <p>Éléments structuraux horizontaux : planchers,</p> <p>Matériaux de finition internes,</p> <p>Escaliers intérieurs et passerelles,</p> <p>Portes / fenêtres.</p>
Cas spécifique des planchers :	<p>1/Déterminer le mode constructif et déterminer la nature du plancher (visualisation du plancher par-dessus et par-dessous) en utilisant certains critères : sens des fissures, présence de petits clous sur les lames de parquet, souplesse du plancher (un plancher en bois est plus souple qu'un plancher en métal), traces, fantômes des solives.</p> <p><i>Technique ND :</i></p> <p><i>-Pachomètre peut aider à déterminer si le plancher est en métal et en béton.</i></p> <p><i>Déterminer la distance entre solives (en bois, elle est généralement de l'ordre de 25 à 40cm et en métal elle est de l'ordre de 65 à 80 cm environ). L'espacement entre solives peut donc être un critère pour distinguer un plancher bois d'un plancher métallique.</i></p> <p><i>-Radar pour aider à déterminer la distance entre solive.</i></p> <p>2/Déterminer le mode d'appui des solives / poutres et noter les altérations,</p> <p>3/Déterminer le sens de portée (sens des poutres/solives).</p> <p>4/Déterminer l'état sanitaire.</p> <p>Déterminer les altérations (si accès) sur les poutres, les solives, les appuis et les éléments utilisés pour créer des liaisons.</p> <p>Remarque : la vérification du plancher doit s'effectuer du plancher haut et du plancher bas de la structure car par exemple la cave souffre de remontées capillaires, donc les matériaux constituant les planchers sont plus altérés.</p> <p><i>Technique ND : mesurer l'humidité du bois, détermination de la nature du bois, détermination de sa résistance, mesure hygrométrique.</i></p>
Cas spécifique des escaliers :	<p>Désordres les plus fréquents : usure et/ou rupture des marches, déformations dues à des tassements différentiels, désordres liés à la présence d'humidité.</p>

Tableau 19 : Instruction pour l'inspection (suite)

2.2.2 Construction d'un atlas d'altération

Les principaux matériaux utilisés dans le patrimoine culturel sont la pierre, le bois, le métal et le béton armé. Un bâti ancien est principalement composé de maçonneries pour la construction des parois verticales, de bois pour les charpentes et les planchers et enfin de métal pour les planchers, la charpente ou des éléments de renfort.

Cependant au XX^{ème} siècle il y a eu l'essor du béton armé qui a été utilisé pour la construction de nouveaux bâtiments et/ou pour la reconstruction d'éléments (ex : substitution d'une charpente en bois par du béton armé, substitution d'un plancher en bois par un plancher en béton armé). Dans le cas de la thèse les matériaux principalement étudiés sont la pierre, le bois et le métal puisque nous n'avions pas de bâti en béton armé figurant dans le corpus du programme HeritageCare.

2.2.2.1 Matériaux principaux du patrimoine bâti

2.2.2.1.1 Cas de la pierre

Dans les structures anciennes, la pierre a été principalement utilisée pour les constructions des parois verticales, elle peut être soit sédimentaire, métamorphique ou magmatique. Elle est déterminée principalement en fonction des ressources disponibles de la zone géographique, par exemple à Paris la pierre la plus utilisée est celle de Saint-Maximin qui correspond à une pierre sédimentaire, ses carrières sont situées proches de Paris dans l'Oise (95). A Clermont-Ferrand la pierre la plus fréquemment employée est la pierre de Volvic qui correspond à une pierre magmatique.

Les altérations sont principalement pathologiques et structurales. Le glossaire [Icomos-Iscs 2008] présente principalement les altérations dites pathologiques et qui sont réparties selon cinq catégories : fissures et déformation (fracture, clivage...), détachement (boursoufflure, éclatement, délitage, désagrégation, fragmentation, pelage, desquamation), figures induites par des pertes de matière (alvéolisation, érosion, dégât mécanique, microkarst, partie manquante, perforation, pitting), altération chromatique et dépôt (croûte, dépôt, altération chromatique, efflorescence, encroûtement, aspect luisant, graffiti, patine, encrassement, sub-efflorescence) et colonisation biologique (colonisation biologique, algue, lichen, mousse, moisissure, plante). Dans le cadre du projet HeritageCARE, le glossaire a été complété et enrichi [McC 2003, McC 2006, Strres 2016, Strres b 2016] avec les altérations de types structurales tels que les fissures et les déformations.

2.2.2.1.2 Cas du bois

Dans les structures anciennes, le bois est retrouvé principalement sur les éléments horizontaux c'est à dire les charpentes et les planchers. La nature du bois utilisée est soit un résineux ou soit un feuillus, cela dépend principalement de son usage et des ressources disponibles et de la zone géographique. L'essence de chêne a été souvent utilisée mais il se peut que d'autres essences aient été sélectionnées (ex : épicea, châtaignier, etc.).

Les altérations [McC 2002] sont principalement les altérations biologiques (liées aux risques biologiques en fonction des classes d'emploi) et les altérations mécaniques. Ces dernières se manifestent par l'apparition de fentes ou fissures, le fléchissement des pièces de bois ou par la désolidarisation des assemblages. Les altérations biologiques du matériau bois dans les constructions sont essentiellement provoquées par des microorganismes (bactéries ou champignons) et par des insectes xylophages ou nidifiant dans le bois. Les altérations cryptogamiques du bois mis en œuvre sont un phénomène anormal, et sont liés dans la majorité des cas à une mauvaise conception de l'ouvrage : bois soumis à des ré-humidifications consécutives liées à une mauvaise aération, à une mauvaise réalisation (bois au contact de maçonneries humides ou de matériaux poreux non isolés du sol, etc.) ou à une cause accidentelle (infiltration d'eau).

2.2.2.1.3 Cas du métal

Le métal le plus utilisé est le fer présent dans trois alliages : la fonte, le fer puddlé et l'acier. Cependant il existe d'autres matériaux utilisés dans le bâti ancien, comme le cuivre dans le cas de toiture, le zinc ou le plomb dans le cas de toiture ou des descentes d'eaux pluviales. Dans notre travail, nous nous intéresserons plus particulièrement au fer du fait que nous inspectons soit des structures métalliques, des planchers ou des charpentes. Les pathologies rencontrées sur le fer sont principalement de la corrosion (uniforme ou localisée), des fissures (dues à des chocs, à sa fragilité, aux sollicitations, à sa fatigue), des déformations et des défauts d'assemblages [Strres 2018].

2.2.2.2 Mise en œuvre de l'atlas

Chaque pays du projet HeritageCare a contribué à la constitution de l'atlas des altérations, qui se décompose en sept familles (colonisation biologique, altération chromatique et dépôt, perte de matière, détachement, fissures, déformations et autres) et de sous-familles d'altération qui permettent de caractériser précisément l'altération. Le but de cet atlas est d'obtenir un vocabulaire uniforme pour l'ensemble des inspecteurs. Dans ce cadre, nous avons effectué une synthèse des altérations des matériaux du patrimoine (principalement les altérations liées aux colonisations biologiques et aux altérations chromatiques). Le Tableau 20 présente les familles et sous familles d'altérations.

Famille d'altération	Sous-famille d'altération
Colonisation biologique	Microorganisme
	Mousses et petites plantes
	Plantes
	Infestation rongeur
	Pourriture
Altération chromatique et dépôt	Croute
	Dépôt
	Altération chromatique
	Efflorescence
	Incrustation
	Film
	Tâche
	Graffiti
Patine	
Perte de matière	Erosion
	Alvéolisation
	Dégât mécanique
	Perte de mortier
	Lacune
	Pitting
	Perforation
	Calciné
Perte ou élément cassés	
Détachement	Boursoufflure
	Éclatement
	Délitage
	Désintégration
	Fragmentation
	Détachement de matériaux de revêtement
	Corrosion
Détachement d'unité	
Fissure	Colonnes et murs
	Poutres et sols
	Arches, voutes et dômes
	Éléments inclinés, fermes et toiture
Déformation	Colonnes et murs
	Poutres et sols
	Arches, voutes et dômes
	Éléments inclinés, fermes et toiture
Autre altérations	Drainage
	Installations
	Autres

Tableau 20 : Liste des familles d'altérations avec leurs sous-familles associées

2.2.2.2.1 Cas des altérations occasionnées par les colonisations biologiques

Dans le cas des altérations liées aux colonisations biologiques, nous avons proposé une décomposition en dix sous-familles : moisissures et champignons, bactéries, algues, lichens, mousses, plantes, insectes, rongeurs, oiseaux et pourritures. Pour chacune de ces sous-familles, il a été intégré : une description, des photos, les paramètres caractérisant le désordre, les matériaux pouvant être impactés, les causes, les conséquences, les éventuelles interactions avec d'autres désordres, les préventions pour éviter le désordre et les altérations équivalentes.

Par exemple, le cas des insectes à larves xylophages appartenant à la sous-famille des attaques par des petits animaux de la famille colonisation biologique, sont décrits dans le Tableau 21.

Description		
Prolifération d'insectes comme la petite vrillette, les termites, les cafards, la grosse vrillette, le lyctus, le capricorne peuvent endommager et détruire les matériaux organiques. Même si ce sont souvent les insectes adultes qui sont découverts, c'est le stade larvaire qui cause les dommages les plus graves. Les dégâts causés par les insectes peuvent aller des trous et des galeries (alimentation et nidification) aux taches et marques par régurgitation (alimentation) et à la destruction totale de l'élément		
Causes possibles	Méthode de caractérisation	Matériaux impactés
Absence d'entretien et / ou de nettoyage	Visuelle, sciure, loupe binoculaire (avec petit prélèvement)	Bois
Conséquences	Préconisations	Ne pas confondre avec
Perte de matière, changement de couleur, présence insecte, sciure	Surveillance visuelle régulière, préservation du bois par des produits compatibles, imprégnation du bois avec produit compatible	Les attaques de termites
Illustration		
		
Présence d'infestation d'éléments ligneux sur des éléments en bois : grosse vrillette (Source www.fcba.fr)	Présence d'infestation d'éléments en bois sur des éléments en bois : les capricornes (source www.fcba.fr)	

Tableau 21 : Atlas des altération – Cas des insectes à larves xylophages

2.2.2.2.2 Cas des altérations occasionnées par altérations chromatiques

Dans le cas des altérations liées aux altérations chromatiques, nous avons proposé une décomposition en dix-sept sous-familles : croute noire, croute saline, encrassement, poussière, suie, coloration, décoloration, assombrissement dû à l'humidité, tâche, efflorescence, subefflorescence, encroutement, concrétion, film, graffiti, patine et tâche.

Par exemple, le cas de la croute noire, est décrit dans le Tableau 22.

Description		
Type de croûte se développant généralement sur les zones protégées contre les précipitations ou les eaux de ruissellement en milieu urbain. Les croûtes noires adhèrent généralement fermement au substrat. Elles sont composées principalement de particules de l'atmosphère, piégées dans une matrice de gypse.		
Causes possibles	Méthode de caractérisation	Matériaux impactés
Présence d'agents atmosphériques, d'agents biologiques, présence des eaux de ruissellement et accumulation de sédiments	Visuelle, loupe binoculaire (avec petit prélèvement), analyse	Pierre
Conséquences	Préconisations	Ne pas confondre avec
Perte esthétique, dégradation de la surface originelle du matériau	Surveillance visuelle régulière, préservation du bois par des produits compatibles, imprégnation du bois avec produit compatible	Dépôts de surface, incrustation, patine, algue
Illustration		
		
Croûte noire sur gargouille en calcaire	Croûte noire sur gargouille en calcaire	

Tableau 22 : Atlas des altération – Cas des croutes noires

L'ensemble de ce travail, effectué pour les altérations chromatiques et les colonisations biologiques, est rédigé en anglais et dans les langues de chacun des pays partenaires (français, portugais et espagnol). Le but de cet atlas est de proposer un vocabulaire universel pour chacun des trois pays.

2.2.3 Elaboration d'un référentiel des altérations

2.2.3.1 Rappel des catégories

Nous avons proposé d'utiliser trois catégories pour caractériser les altérations relevées pendant l'inspection. Ces catégories [Afnor 2011, Afnor 2012, Afnor 2012b] ont été mises en place par le comité technique européen CEN/TC 346 « Conservation du patrimoine culturel ». La première, correspondant à l'état de l'élément pour chaque désordre, est une catégorie d'état (cf. Tableau 23). La deuxième, appréciant les risques, est une catégorie du degré d'urgence (cf. Tableau 24). Enfin, la troisième correspond à une catégorie portant sur le type de recommandations (cf. Tableau 25).

Le Tableau 23 présente les niveaux d'états et des exemples associés tels que définis dans la norme [Afnor 2012].

Niveau	Symptômes	Remarques
CC 0	Aucun symptôme	-
CC 1	Symptôme mineure	Ex : Peinture abîmée, présence de mousse sur les tuiles et quelques tuiles cassées
CC 2	Symptômes passablement forts	Ex : Dommage localisé causé par une attaque biologique (pourriture humide) dans les panneaux, nécessitant une remise en état et un remplacement partiel.
CC 3	Symptômes majeurs	Ex : Fuite au niveau de la toiture, entraînant un dommage consécutif et un dommage majeur causé par attaque fongique ou de pourriture

Tableau 23 : Niveau d'état [Afnor 2012]

2.2.3.2 Référentiel des altérations

Dans le cadre de HeritageCare, nous avons proposé un référentiel pour pouvoir attribuer les quatre niveaux d'état. Cet outil est indispensable pour que l'ensemble des inspecteurs effectuant le diagnostic attribue la même catégorie d'état en fonction de l'étendue des altérations. Pour son élaboration, plusieurs sources [Frankovic 2014, Heinrichs 2008] ont été utilisées et certaines proviennent de guides sur les ouvrages d'arts [Aashto 2010, Odot 2009, Birmm 2015] puisqu'il n'existe pas de documents comparables pour le patrimoine bâti.

L'ensemble du référentiel situé en Annexe 8 : Proposition d'un référentiel des altérations) a été construit avec les données de l'Annexe 5 : Données pour constituer des référentiels). Le Tableau 24 présente deux exemples de catégorie d'état pour les sous-familles d'altérations « poussière » et « pourriture ».

Norme [Afnor 2012]	Gravité			
	0	1	2	3
Famille : Altération chromatique et dépôt Sous-famille : Poussière [Frankovic 2014]	Aucun symptôme	Symptômes mineurs	Symptômes passablement forts	Symptômes majeurs
Famille : Colonisation biologique Sous-famille : Pourriture [Odot 2009] [Aashto 2010]	Absence de d'encrassement	Absence de pourriture	Absence de pourriture	Absence de pourriture
		<20% de la surface	20-50% de la surface	>50% de la surface
		Moins de 10% de l'épaisseur de l'élément	Pourriture supérieure à 10% de l'épaisseur de l'élément et / ou se trouvant dans des zones de tension	La condition d'état est préoccupante, une étude structurale doit être réalisée

Tableau 24 : Référentiel HeritageCare – présentation des critères de gravité pour deux altérations

2.3 Etape 3 : Thérapie

Pour que le bâti soit en bon état, des actions de conservation doivent être mises en œuvre régulièrement. Nous proposons quatre niveaux de décision, basés sur la norme [Afnor 2012b] et sur le code du patrimoine, qu'un maître d'ouvrage ou un gestionnaire peut prendre : aucune intervention (ALT0), entretien/mesures de prévention (ALT1), réparation modérée et/ou investigation supplémentaire (ALT2) et intervention majeure basée sur un diagnostic (ALT3). Ces catégories sont synthétisées dans le Tableau 25.

Catégorie de recommandation (RC)	Mesures possibles	Catégorie d'urgence (UC)	Urgence
ALT0	Aucune intervention	UC0	A long terme
ALT1	Entretien/Mesures de prévention	UC1	A moyen terme
ALT2	Réparation modérée et/ou investigation complémentaire	UC2	A court terme
ALT3	Intervention majeure basée sur un diagnostic	UC3	Urgent et immédiat

Tableau 25 : Catégorie de recommandation et catégorie d'urgence [Afnor 2012]

2.3.1 Entretien et mesures de prévention (ALT1)

Les opérations d'entretien et/ou les mesures préventives consistent à intervenir, soit systématiquement, soit sur la base d'une dégradation visible ou amorcée, afin d'éviter ou de retarder une altération (pour des raisons économiques, patrimoniales, esthétiques et/ou de sécurité).

Pour être bien conduit, l'entretien courant d'un bâtiment doit être effectué [Cerema 2018] par une équipe habituée au bâti ancien, ayant un matériel adapté (petit outillage, jumelle etc.), suivant un programme préétabli, intervenant au moment opportun (par exemple, avant l'hiver pour enlever les feuilles qui peuvent obstruer les descentes des évacuations d'eaux pluviales).

Les actions d'entretien peuvent être le retrait de la végétation, le nettoyage général, la vérification de la toiture en allant dans les combles, la vérification de l'absence de fuites, la vérification de l'état de marche des équipements, le remaillage des couvertures, le remplacement ponctuel d'éléments manquants, la remise en peinture, le démoussage, la révision de solins et de l'étanchéité, la vérifications des évacuations et des réseaux, la révision de joints de maçonnerie, la réfection ponctuelle d'enduit, la reprise ponctuelle d'enduit, la taille et l'élagage d'arbre, etc.

2.3.2 Réparation modérée et investigation supplémentaire (ALT2)

La réparation consiste à remettre partiellement ou totalement en état un bâti altéré. Elle peut résulter d'un déficit d'entretien mais aussi d'autres causes. Si la nature des causes est indéterminée, des investigations supplémentaires sont proposées.

Actuellement, un certain nombre de techniques d'inspection [Blinda 2000, Blinda 2001, Blinda 2003, El Boudani 2015, Parent 2015] spécialisées pour le bâti ancien et plus spécifiques à la maçonnerie ont été inventoriées. Cet inventaire a permis de classer les techniques non destructives, semi destructives et destructives. Ces dernières ne sont pas préconisées pour le bâti ancien, car elles sont intrusives et ne respectent pas les recommandations internationales des chartes [Icomos 1964]. Actuellement, les techniques non destructives utilisées dans le cas de l'étude des matériaux sont principalement : le pachomètre, le radar géologique, l'auscultation sonique, le scléromètre, l'endoscopie, la colorimétrie, la thermographie infra

rouge, la mesure d'humidité et la pipette de Karsten. Dans le cas de l'étude structurale, des instrumentations à l'aide de capteurs peuvent être mises en place et des modélisations peuvent être effectuées. Nous indiquons dans le Tableau 26, les techniques d'investigations supplémentaires en fonction des familles d'altération et des matériaux impactés. Les principes de ces techniques sont expliqués dans l'Annexe 6 : Principe de techniques d'investigations non destructives

	Fissure	Déformation	Détachement	Perte de matière	Altération chromatique	Colonisation biologique
Pacho (M, B)	X	X	X	X	X	
Radar (M, B)	X	X	X	X		
Radiographique	X	X	X	X		
Auscultation sonique (M, B)	X	X	X	X		
Scléromètre (M, B)	X	X	X	X		
Endoscope (M,B,m)	X	X	X	X	X	
Colorimétrie (M,B,m)					X	
Thermo IR (M,B,m)	X	X	X	X	X	X
Diag Humidité (M,B)		X	X	X	X	X
Diag Sels (M)		X	X	X	X	X
Pipette Karsten (M)			X	X	X	X
Test mouillabilité (M)			X	X	X	X
Test éponge (M)			X	X	X	X
Monitoring (M,B,m)	X	X				

Tableau 26 : Synthèse des méthodes d'inspections avec indications des matériaux sur lesquels ces méthodes sont principalement utilisées M : maçonnerie / B : bois / m : métal

2.3.3 Intervention majeure basée sur un diagnostic (ALT3)

Les interventions majeures sont principalement des campagnes de travaux de restauration. Elles peuvent porter sur l'ensemble ou sur une partie du bâti, dans le but de sauvegarder, conserver ou restituer les qualités architecturales et techniques. Par une intervention directe sur le monument endommagé, l'objectif principal est de remédier et d'arrêter son altération (conservation curative). Les travaux de restauration peuvent consister à maintenir l'état actuel et ils doivent respecter les principes de stabilité dans le temps, de compatibilité des matériaux, de réversibilité et de lisibilité des apports contemporains. Dans le cas des édifices protégés et ceux à valeurs culturelles, la Charte de Venise [Icomos 1964] a posé les principes généraux qui guident les opérations de restauration du patrimoine bâti.

Dans le cas de travaux, les marchés et les descriptifs sont décomposés en corps d'état du bâti (maçonnerie – pierre de taille, menuiserie, couverture, charpente etc.). Pour cela, nous avons décidé de répertorier l'ensemble des travaux possibles selon trois corps d'état représentatifs de notre corpus : maçonnerie- pierre de taille, couverture et bois (charpente et plancher).

2.3.3.1 Cas des travaux sur la maçonnerie

Les travaux [Mcc 2006, Mcc 2003, Stresb 2016, Stresb 2016] qui peuvent être effectués sur la maçonnerie en pierre sont situés dans le Tableau 27 et le Tableau 28. Chaque famille de réparations est associée à des sous-familles.

Famille de réparation	Sous-type de famille de réparation
Maçonnerie de pierre (PM)	MP1 : Dépose de pierre
	MP2 : Taille de pierre
	MP3 : Pose de pierres neuves ou anciennes
	MP4 : Bouchons en pierre neuve
	MP5 : Jointoiement ou rejointoiement sur maçonnerie moellon ou meulière
	MP6 : Ragréage mortier
	MP7 : Jointoiement ou rejointoiement sur maçonnerie brique pleine
Consolidation (PC)	PC1 : Armatures métalliques avec ragréage mortier
	PC2 : Goujons et agrafes
	PC3 : Collage aux résines - structurel
	PC4 : Coulis et injection de mortier
	PC5 : Armatures métalliques avec ragréage mortier
	PC6 : Consolidation de pierre - non structurel
Réparation et renforcement structuraux (PR)	PR1 : Renforcement des maçonneries par injection coulis
	PR2 : Réparation/renforcement mise en place de broches, boulons d'ancrage et tirants
	PR2 : Mise en place d'une contre voute
	PR2 : Mise en place d'un ceinturage
Nettoyage (PN)	PN1 : Nettoyage par eau claire en effectuant un ruissellement et une nébulisation
	PN2 : Nettoyage par eau claire en effectuant système d'injection extraction
	PN3 : Nettoyage par procédé cryogénique
	PN4 : Nettoyage par hydro-abrasion
	PN5 : Nettoyage par micro abrasion à sec
	PN6 : Nettoyage par application de compresses ou de cataplasmes
	PN6 : Nettoyage par application de compresses ou de films pelables
	PN7 : Nettoyage par technique du laser
	PN7 : Elimination des graffitis
	PN8 : Débadigeonnage
	PN9 : Décapage des peintures
PN10 : Nettoyage haute pression	
Dessalement (PD)	PD1 : Elimination mécanique à sec
	PD2 : Méthode des compresses
	PD3 : Application sur les maçonneries d'un enduit très capillaire « sacrifié » (à refaire régulièrement)
	PD4 : Mise en œuvre d'un enduit d'assainissement destiné à piéger ou à laisser les sels sans altérer l'enduit
Traitement de surface (PTS)	PTS1 : Patines
	PTS2 : Badigeon
	PTS3 : Traitement biocide
	PTS4 : Hydrofugation
	PTS5 : Ragréage
	PTS6 : Anti-graffiti
	PTS7 : Bio minéralisation

Tableau 27 : Liste des travaux proposés sur la maçonnerie

Famille de réparation	Sous-type de famille de réparation
Lutte contre les remontées capillaires (PRC)	PRC1 : Le long des maçonneries enterrées, contre les infiltrations latérales avec la mise en œuvre d'une galerie périphérique
	PRC2 : Le long des maçonneries enterrées, contre les infiltrations latérales avec la mise en œuvre d'un drain vertical
	PRC3 : Dans les murs avec la mise en place d'une barrière étanche : insertion d'une barrière d'étanchéité
	PRC4 : Dans les murs avec la mise en place d'une barrière étanche : injection de produits imperméabilisants
	PRC5 : Dans les murs avec la mise en œuvre de l'électro-osmose pour l'évacuation de l'eau
	PRC6 : Dans les murs avec la mise en œuvre de l'électrophorèse pour l'évacuation de l'eau
	PRC7 : Dans les murs avec la mise en œuvre d'un procédé électronique d'assèchement des murs
Autre réparation liée à l'humidité (PRH)	PRH1 : Techniques pour lutter contre les pénétrations d'eaux de pluie
	PRH2 : Techniques pour lutter contre les condensations (ventilation, isolation, chauffage)
	PRH3 : Piochage l'enduit
	PRH4 : Consolidation d'un enduit ancien (injection coulis + clous inox)
	PRH5 : Réfection à neuf d'un enduit (3 couches)
	PRH6 : Réfection à neuf d'un enduit à deux couches
	PRH7 : Réfection et réparation d'un enduit mortiers plâtre et chaux
	PRH8 : Traitement des fers mis à nu
	PRH9 : Mise en place de bandeau à chaque plancher pour éviter le ruissellement
	PRH10 : Retirer enduit au rez de chaussée pour éviter remontée capillaire et rejaillissement

Tableau 28 : Liste des travaux proposés sur la maçonnerie (suite)

2.3.3.2 Cas des travaux sur la couverture

Les travaux [McC 2011] qui peuvent être effectués sur la couverture sont situés dans le Tableau 29. Le tableau est décomposé en six familles de réparations et des sous-familles sont associées.

	Sous-type de famille de réparation
Elément zinc – zinguerie (CZ)	CZ : Remplacement
Réparation / Rénovation élément architecturale (CRA)	CRA1 : Lucarne CRA2 : Cheminée
Réparation couverture (CR)	CR1 : Remaniage couverture en terre cuite CR2 : Remaniage couverture en Ardoise CR3 : Remaniage couverture en Lauze CR4 : Remaniage couverture en Cuivre CR5 : Remaniage couverture en Bois
Rénovation couverture sans isolant (CSI)	CSI 1 : Terre cuite CSI 2 : Ardoise CSI 3 : Lauze CSI 4 : Cuivre CSI 5 : Bois
Rénovation couverture avec isolant (CAI)	CAI 1 : Terre cuite CAI 2 : Ardoise CAI 3 : Lauze CAI 4 : Cuivre CAI 5 : Bois

Tableau 29 : Liste des travaux proposés sur la couverture

2.3.3.3 Cas des travaux sur le bois

La liste des travaux [MCC 2002] qui peuvent être effectués sur la charpente sont situés dans le Tableau 30. Le tableau est décomposé en trois familles de réparation auxquelles sont associées des sous-familles.

Famille de réparation	Sous-famille de réparation
Traitement (BT)	BT1 : Traitement à la créosote BT2 : Traitement au lait de chaux BT3 : Les lasures BT4 : Les huiles BT5 : Les cires BT6 : Les vernis BT7 : Les peintures et les laques
Renforcement (BRR)	BRR1 : Bois pour moisement BRR2 : Renforcement en résine armée BRR3 : Renforcement de pièce par augmentation de section BRR4 : Reconstitution assemblage BRR5 : Renforcement métallique d'ouvrages existants
Remplacement (BR)	BR1 : Remplacer un arbalétrier BR2 : Remplacer un entrain BR3 : Remplacer un poinçon BR4 : Ferme BR5 : Demi ferme BR6 : Panne intermédiaire BR7 : Panne faîtière BR8 : Chevronnage

Tableau 30 : Liste des travaux proposés sur le bois

2.4 Etape 4 : Contrôle

La mise en place d'actions de conservation préventive est indispensable pour le patrimoine bâti. La Figure 9 montre qu'un ouvrage souffrant d'un déficit de maintenance, courbes (B) et (C), n'atteindra pas la durée de vie escomptée par rapport à un ouvrage entretenu (courbe (A)).

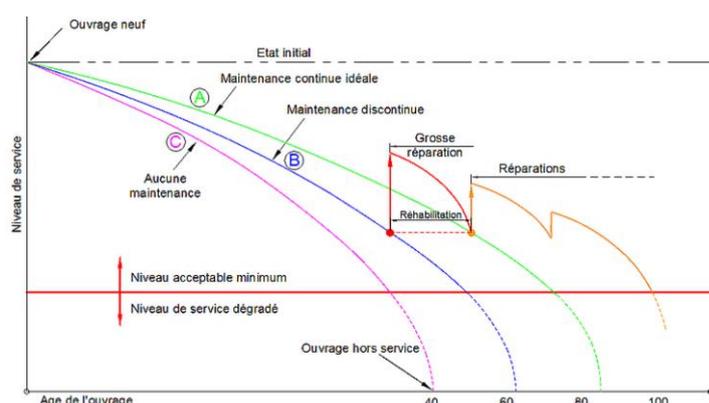


Figure 9 : Graphique illustrant différentes stratégies de maintenance [Cerema 2018]

Dans le cas du patrimoine bâti, bien que le concept de durée de vie n'existe pas puisque par exemple, une église n'a pas été construite pour une durée de vie déterminée (exemple 100 ans). Aujourd'hui, les ouvrages se construisent en faisant des hypothèses sur la durée de vie technique et la vie fonctionnelle. Cependant avec les politiques de développement durable, ces durées ont tendance à être augmentées. Pour que le patrimoine bâti soit conservé, des mesures préventives régulières doivent être mises en œuvre sur l'ensemble des corps d'état. Dans le Tableau 31, nous proposons des mesures préventives à effectuer régulièrement.

Nous proposons qu'elles soient appliquées principalement à la suite de tempêtes et après l'automne, afin de nettoyer les déchets végétaux qui ont pu s'accumuler sur le bâti et avant d'être confronté à la saison hivernale.

Corps d'état	Proposition d'actions préventives de conservation :
Couverture	Contrôle par l'extérieur (à l'aide d'une paire de jumelle ou d'un appareil photo avec un téléobjectif) et par l'intérieur (en allant dans les combles) afin de vérifier que la couverture présente l'ensemble de ses éléments. Il est conseillé de l'effectuer un jour de pluie afin de visualiser les zones problématiques. Vérification visuelle des éléments singuliers situés sur la toiture (exemple : cheminée, lucarne, etc.), Traitement anti-mousse (si besoin).
Charpente	Contrôle par l'extérieur (à l'aide d'une paire de jumelle ou d'un appareil photo avec un téléobjectif) afin de vérifier qu'il n'y a pas d'élément déplacé sur la toiture, que les évacuations des eaux pluviales sont en fonctionnement et par -Contrôle par l'intérieur : vérification de l'absence de fuites à l'intérieur des combles, vérification de l'absence de sciure. La présence de sciure est un élément à prendre en compte car elle est synonyme d'attaques (passées) d'insectes à larves xylophages), Nettoyage des combles (pour éviter l'accumulation des poussières), Remarque : si la durabilité du bois n'est pas adaptée à son utilisation, il est conseillé de traiter régulièrement le bois avec des produits compatibles.
Evacuation des eaux pluviales	Vérification du fonctionnement des gouttières (absence d'engorgement, fixation des éléments de zinguerie) Remarque : après une tempête, il est conseillé d'effectuer une inspection afin de détecter les éventuelle déchets biologiques (feuilles, branches, etc.) ou autres bloquant les évacuations.
Enveloppe du bâti	Vérification visuelle de l'état des façades, Enlever régulièrement les colonisations biologiques, Evitez de saler proche des façades.
Intérieur du bâti	Vérification de l'état de la cave, Vérification des ouvertures/fermetures des menuiseries, Vérification des combles.

Tableau 31 : Synthèse des actions de conservation préventive par corps d'état

Synthèse du deuxième chapitre

La méthodologie de gestion préventive proposée dans ce chapitre permet une décomposition en quatre étapes avec :

- L'anamnèse qui est la première étape où nous avons proposé d'effectuer une recherche d'informations (historiques et administratives) et de préparer la mission. Cette étape est importante pour préparer au mieux la visite sur le site ;
- Le diagnostic qui est la deuxième étape où nous avons proposé des instructions pour le relevé et la mise en place d'outils spécifiques tels que l'atlas des altérations accompagné de son référentiel ;
- La thérapie qui est la troisième étape, nous proposons quatre catégories alternatives de recommandations avec : ne rien faire, entretien, réparation ou investigation supplémentaire et les travaux de restauration. Des investigations supplémentaires sont proposées en fonction de la famille d'altération et de la nature des matériaux. Nous avons également proposé une liste des travaux à recommander qui peuvent s'effectuer sur la maçonnerie en pierre, la couverture et la charpente ;
- Le contrôle qui est la dernière étape constitue en elle-même la conservation préventive du bâti. Pour cela nous avons proposé une liste d'actions à mettre en place en fonction des corps d'état.

Les données d'entrée de nos modèles d'agrégation ayant été collectées grâce à cette démarche de gestion préventive, le chapitre suivant consiste à présenter leur utilisation pour : (1) hiérarchiser les bâtis, (2) prendre des décisions d'engagement des travaux et (3) déterminer et hiérarchiser les actions de maintenance.

L'état de l'art des techniques de mesure que nous avons réalisé et utilisé pour collecter des données au niveau 2 de la méthodologie HeritageCare, est présenté en Annexe 6.

Chapitre 3 : Proposition de modèles d'agrégation

Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons proposé une démarche de gestion préventive pour l'ensemble des propriétaires (du patrimoine protégé et non protégé) intégrant quatre grandes étapes. Pour un gestionnaire et/ou un propriétaire, le choix des bâtis sur lesquels intervenir en priorité renvoie à une décision complexe impliquant des objectifs contradictoires. Pour intégrer ces enjeux multiples et parfois opposés, nous proposons de recourir à des modèles d'agrégation pour guider le maître d'ouvrage à prendre des décisions.

Ce troisième chapitre « Proposition de modèles d'agrégation » s'articule autour de trois points :

- Proposition d'indicateurs avec leurs critères et mise en place de pondérations ;
- Proposition d'un modèle d'agrégation selon trois étapes : évaluation de la vitesse d'altération, évaluation du risque de perte de solidité et évaluation de la décision du propriétaire ;
- Proposition d'une démarche de détermination et hiérarchisation des actions de maintenance et d'une base de données de ces actions.

La figure suivante présente en rouge le contenu de ce chapitre par rapport à la globalité des travaux de thèse.

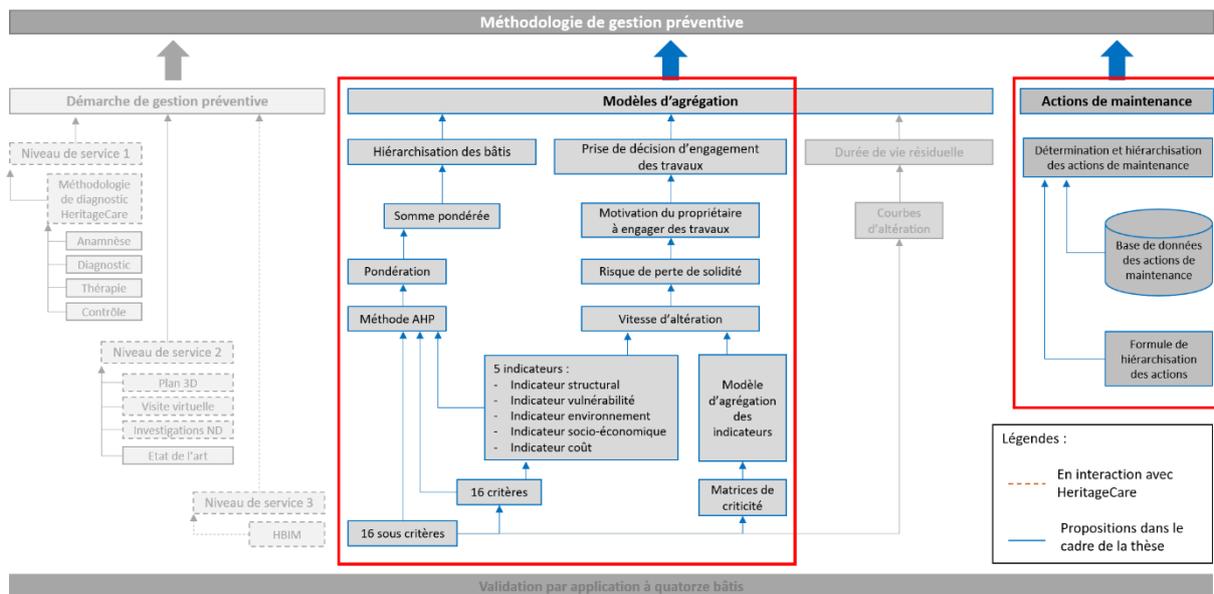


Figure 10 : Contenu de la thèse présenté dans ce chapitre 3

3.1 Proposition d'indicateurs

Pour restaurer ou conserver un patrimoine bâti, il ne suffit pas de considérer son état intrinsèque mais il faut aussi considérer les intérêts et les besoins socio-économiques. Pour cela nous proposons cinq indicateurs ayant des objectifs différents :

- Information sur l'état du patrimoine à l'aide de l'indicateur structural (plus il est important, plus il y a la présence d'altérations) ;
- Information sur l'environnement auquel est soumis le bâti, à l'aide de l'indicateur de sévérité de l'environnement (plus l'indicateur va être important, plus l'environnement est agressif) ;
- Information sur la fragilité du bâti au moyen de l'indicateur de vulnérabilité (plus l'indicateur va être important, plus il est susceptible d'être fragilisé) ;

- Information sur les enjeux socio-économique avec l'indicateur socio-économique (plus l'indicateur va être important plus il est considéré comme important) ;
- Information sur le coût ressenti pour le maître d'ouvrage (MOA) au moyen de l'indicateur de coût (plus l'indicateur va être important, plus le coût de financement ressenti par le maître d'ouvrage des travaux sera important pour mettre en place des actions de conservation).

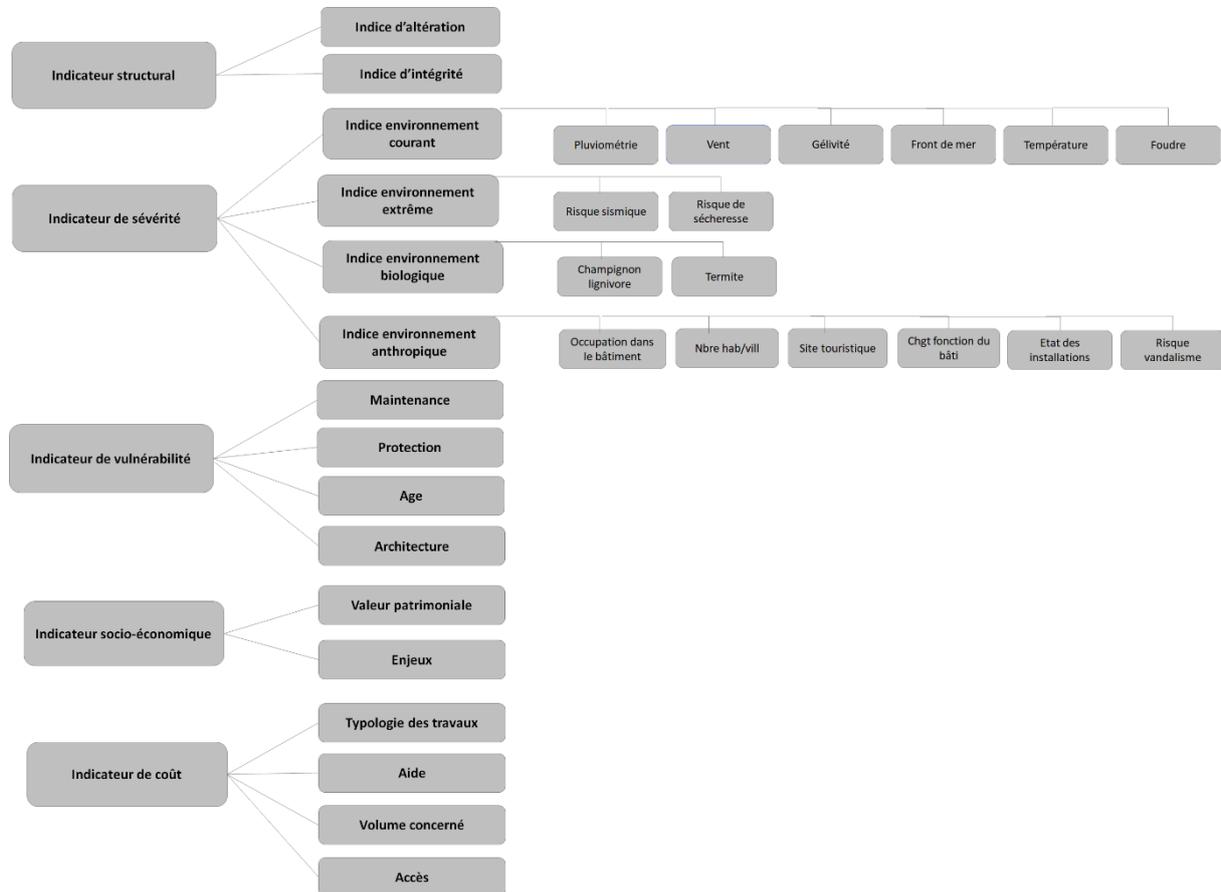


Figure 11 : Schéma de l'ensemble des critères

3.1.1 Indicateurs

Les indicateurs que nous proposons sont composés d'un ensemble de critères et de sous critères (pour l'indicateur de sévérité de l'environnement). Pour chacun d'entre eux nous proposons une échelle (de 0 à 3), plus le chiffre est important plus il signifie sa gravité.

Il est possible d'établir d'autres sous critères. Par exemple pour le critère « âge », il pourrait être suivi des sous-critères suivants : une unique campagne de construction, plusieurs campagnes de construction qui se suivent, des campagnes de constructions discontinues, une période de ruines suivie d'une reprise, etc. Cependant nous n'avons pas les informations pour l'ensemble des bâtis. Ces indicateurs ont été mis en place à la suite des éléments que nous avons collecté pour chacun des bâtis.

3.1.1.1 Indicateur structural

En raison de leur âge et éventuellement d'un déficit de maintenance, les bâtis anciens subissent de fortes dégradations. Pour évaluer le niveau de dégradation, nous proposons un indicateur structural basé sur deux critères : le critère d'altération déterminé à partir d'un examen visuel et le critère d'intégrité lié à des désordres structuraux spécifiques. Ces critères sont présentés dans les sections suivantes.

3.1.1.1.1 Critère d'altération

L'évaluation sanitaire du patrimoine met en jeu deux processus : la surveillance initiale (puis périodique) et sa classification. La surveillance d'un ouvrage est principalement assurée par des spécialistes du bâti ancien, dans le cadre de visites initiales (et périodiques). Les visites permettent de relever et de classer les altérations observées.

La classification des ouvrages s'opère en fonction de leur état apparent, déterminé à partir des inspections in-situ. La comparaison des états sanitaires successifs à l'aide du critère d'altération, que nous proposons, permet de vérifier l'évolution de l'état du bâti et pourra permettre d'apprécier la cinétique de son éventuelle dégradation

L'altération est définie [Afnor 2011] comme étant une modification de l'état qui réduit l'intérêt patrimonial ou la stabilité, elle peut être caractérisée par deux aspects : la sévérité et l'étendue. Dans le cas de notre modèle, la sévérité est représentée par deux facteurs : les conditions liées à l'état k_n et au risque associé $k_{a,n}$. Pour déterminer ces facteurs multiplicateur, k_n et $k_{a,n}$, nous proposons d'utiliser les catégories d'états de la norme [Afnor 2012] rappelées dans le Tableau 32. La condition k_n liée à l'état et aux symptômes varie entre 0 (aucun symptôme) et 3 (symptôme majeur) ainsi que la condition liée à l'urgence varie entre 0 (à long terme) et 3 (urgent et immédiat).

k_n	Niveau de symptôme	$k_{a,n}$	Degré d'urgence
0	Aucun symptôme (CC0)	0	A long terme
1	Symptômes mineurs (CC1)	1	A moyen terme
2	Symptômes passablement forts (CC2)	2	A court terme
3	Symptômes majeurs (CC3)	3	Urgent et immédiat

Tableau 32 : Echelles pour l'évaluation de l'état k_n et de l'urgence $k_{a,n}$ du patrimoine bâti [Afnor 2012b]

Pour évaluer l'état du patrimoine investigué, nous proposons d'utiliser le critère S_w sur la base du travail de Gaspar et Brito [Pedro 2008]. Le critère d'altération est défini par le rapport entre la zone dégradée (pondérée à l'aide de deux échelles liées à l'état k_n et à l'urgence $k_{a,n}$) et la surface totale pondérée par la somme des pondérations liés à l'état. Il est défini par l'équation suivante :

$$S_w = \frac{\sum(A_n \cdot k_n \cdot k_{a,n})}{100 \cdot \sum(k_n)} \quad (4)$$

avec :

S_w : le critère d'altération, exprimant le niveau global de dégradation, plus la valeur du critère est élevée, plus il correspond à un mauvais état ;

A_n : le pourcentage de la zone affectée par l'altération n en % ;

k_n : la pondération de l'anomalie n en fonction de son niveau de dégradation, entre 0 (aucun symptôme) et 3 (symptômes majeurs) [Afnor 2012b] ;

$k_{a,n}$: la pondération de l'anomalie n en fonction de son niveau d'urgence, entre 0 (à long terme) et 3 (urgent et immédiat) [Afnor 2012b].

3.1.1.1.2 Critère d'intégrité

Nous proposons un critère d'intégrité pour mettre en évidence les désordres structuraux (ex : fissures, déformations) que le critère d'altération ne met pas en évidence. Deux méthodes sont proposées pour le déterminer : relevé visuel et auscultations non destructives.

3.1.1.1.2.1 Méthode de détermination du critère d'intégrité à l'aide d'auscultation non destructives

Ce critère permet d'établir un constat de l'état structural du patrimoine bâti. Ce critère intègre les dégâts structuraux observés lors de la visite (initiale ou périodique) que nous définissons comme étant les fissures et les déformations des éléments porteurs. Il intègre également des mesures d'auscultation in-situ simples et non destructives (telles que la mesure d'humidité des matériaux et la mesure de l'humidité relative HR). Nous proposons de décomposer les échelles suivant le Tableau 33.

		Parois verticales		Parois horizontales		Charpentes	
		Pathologie structurale	Humidité pierre	Pathologie structurale	Humidité intérieur HR	Humidité bois	Pathologie structurale
Gravité	0	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	1	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible
	2	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen
	3	Élevé	Élevé	Élevé	Élevé	Élevé	Élevé

Tableau 33 : Critère d'intégrité prenant en compte l'état structural

3.1.1.1.2.2 Méthodologie de détermination du critère d'intégrité à l'aide des relevés effectués in situ

Le critère d'intégrité C_{Ii} comprend les désordres structuraux visualisés lors de la visite (initiale ou périodique) des parois verticales C_{PVi} , des parois horizontales C_{PHi} et de la charpente C_{Ci} . Pour chacun, un produit est effectué entre leur quantité en pourcentage de la zone affectée A_n , et leur niveau de symptôme k_n (qui a été défini précédemment à savoir entre 0 correspondant à aucun symptôme et 3 correspondant à symptôme majeur).

Après les avoir déterminés (C_{PVi} , C_{PHi} , C_{Ci}), le critère d'intégrité est déterminé en prenant la valeur maximale et il est défini suivant une échelle allant de 0 à 3. Il vaut 0 lorsque le bâti ne présente pas de défauts structuraux et 3 lorsque le bâti présente des défauts structuraux.

La formule proposée permet de calculer le critère d'intégrité à l'aide d'auscultations non destructives I_{Si} est la suivante :

$$C_{Ii} = \max (I_{PVi} ; I_{PHi} ; I_{Ci}) \quad (5)$$

$$C_{PVi} = \sum A_n^{PV} \cdot k_n \cdot k_{a,n}$$

$$C_{PHi} = \sum A_n^{PH} \cdot k_n \cdot k_{a,n}$$

$$C_{Ci} = \sum A_n^C \cdot k_n \cdot k_{a,n}$$

avec :

- C_{Si} : le critère d'intégrité défini suivant une échelle allant de 0 à 3 ;
- C_{PVi} : le critère représentant l'intégrité structurale des parois verticales en % ;
- C_{PHi} : le critère représentant l'intégrité structurale des parois horizontales en % ;
- C_{Ci} : le critère représentant l'intégrité structurale de la charpente en % ;
- A_n : le pourcentage de la zone affectée (PV, PH ou C) par l'altération n en % ;
- k_n : le coefficient pondérateur de l'anomalie n en fonction de son niveau de dégradation ;
- $k_{a,n}$: le facteur d'urgence de l'anomalie n.

3.1.1.2 Indicateur de sévérité de l'environnement

Le patrimoine bâti est soumis à des phénomènes, naturels et anthropiques, depuis leur construction. L'Unesco [Unesco 2010] a proposé un ensemble de typologie de familles d'aléas : météorologique (tempête, foudre, sécheresse, vague de chaleur, élévation de la température à la surface de la mer), hydrologique (inondation, tsunami), géologique (volcanique, sismique, mouvement de masse, érosion), biologique (infestation par des parasites), astrophysique (exemple : impact météorites), anthropique (incendie, pollution) et le changement climatique (hausse du niveau de la mer, augmentation des phénomènes extrêmes, variation des amplitudes thermiques).

Dans notre modèle, nous proposons la mise en place de quatre critères pour caractériser cet environnement qui sont liés aux : phénomènes naturels courants, phénomènes naturels extrêmes, phénomènes biologiques et phénomènes anthropiques. Le but de ces critères est d'aboutir à un indicateur de sévérité de l'environnement qui reflète la cinétique de la dégradation.

3.1.1.2.1 Critère lié aux phénomènes naturels

Dans la littérature, certains paramètres naturels ont été considérés comme la pluviométrie, la distance au front de mer et la température. Nous proposons d'ajouter les critères suivants : le risque sismique, le risque de sécheresse, le vent et la gélivité. Les critères utilisés liés aux phénomènes naturels peuvent être divisés en deux catégories : des événements courants, tels que la pluviométrie, l'altitude, le gel/dégel et les sels provenant du front de mer et des événements extrêmes tels que le risque sismique et la sécheresse.

3.1.1.2.1.1 Critère lié aux événements courants

Le critère lié aux événements courants est défini par les sous-critères suivant : la pluie, le vent, le gel/dégel, les sels provenant du front de mer, l'impact de la foudre, l'influence du rayonnement solaire et la température. Pour chacun des critères proposés, nous synthétisons ses impacts sur le patrimoine bâti d'après la littérature scientifique.

3.1.1.2.1.1.1 Influence de la pluie

L'action de la pluie représente un facteur de dégradation par un impact mécanique et chimique. L'impact mécanique est relié à la violence avec laquelle les gouttes peuvent percuter la surface des édifices, l'effet du ruissellement peut altérer la pierre et peut produire un lessivage des joints et aussi l'effet de rejaillissement de la pluie en pied de façade. L'impact chimique est relié à la solubilisation des composés contenu dans l'atmosphère, dans l'eau et dans les matériaux des façades [Gibeaux 2018]. Par exemple, pour une façade composée d'un enduit au plâtre $\text{CaSO}_4,1/2\text{H}_2\text{O}$, le matériau peut se solubiliser en donnant des ions calciums Ca^{2+} et sulfates SO_4^{2-} . Ces ions peuvent se remobiliser et donner d'autres types de sels comme par exemple du gypse qui peut réagir avec un mortier à base de ciment pour donner des sels gonflants [Corinaldesi 2003].

Gravité	0	1	2	3
Critère : Pluviométrie annuelle (en mm)	Non soumis à l'eau de pluie	Inférieur à 500 mm	Entre 500 et 1000 mm	Supérieur à 1000 mm

Tableau 34 : Proposition de gravité du critère lié à la pluviométrie

Les données de pluviométrie se trouvent sur le site de Météo France¹⁴. Pour établir l'échelle de gravité, nous avons pris en compte les précipitations annuelles (mesurées en millimètres) maximales et minimales en France métropolitaine. Les données sur lesquelles nous avons travaillé sont en accès libre et concernent les villes les plus importantes des régions. La valeur maximale de précipitation annuelle est de 1483 mm (relevée

¹⁴ <http://www.meteofrance.com/climat/france>

à la Pointe de Socoa en Nouvelle-Aquitaine) et la valeur minimale relevée est de 513,2 mm (relevée à Ile Rousse en Corse). Ainsi nous proposons de décomposer l'échelle suivant le Tableau 34.

3.1.1.2.1.1.2 Influence du vent

L'action du vent représente un facteur de dégradation puisque ses effets sur les monuments sont nombreux : forces de pression sur la face exposée du monument et d'aspiration sur la face opposée, vibrations de structure par phénomène de résonance et de turbulence, transport de particules solides heurtant les façades, rapide évaporation de l'eau contenue dans les couches externes des pierres qui accélère le phénomène de cristallisation des sels [Ponziana 2012].

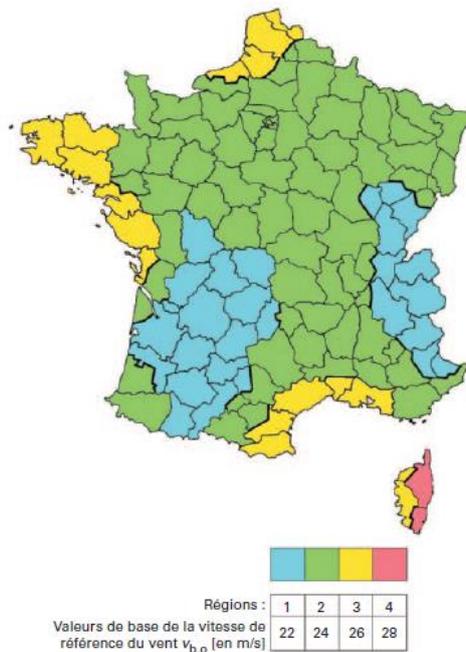


Figure 12 : Carte de France découpée en quatre zones d'intensité [Afnor 2005]

Dans le cas des nouvelles constructions l'Eurocodes définit les actions du vent pour le calcul structurel des bâtiments et des ouvrages de génie civil. La carte de vent (cf. Figure 12) propose quatre classes de région allant de la région 1, correspondant à la plus petite vitesse de vent, à la région 4, correspondant à la plus grande vitesse de vent. Dans ce cas, nous proposons d'utiliser ce découpage, pour mettre en place le critère lié à l'influence du vent. Un découpage en quatre zones d'intensité est proposé dans le Tableau 35.

Gravité	0	1	2	3
Critère : Vent	Régions de classe 1	Régions de classe 2	Régions de classe 3	Régions de classe 4

Tableau 35 : Proposition de gravité du critère lié au vent

3.1.1.2.1.1.3 Influence des cycles gel/dégel

Les cycles de gel/dégel dégradent les matériaux de construction notamment les pierres dont les roches sédimentaires vu qu'elles présentent une porosité et sont susceptibles d'être traversées par des fluides. Lorsque l'eau dans les pores est à l'état liquide et les conditions environnementales engendrent des baisses de températures, il y a gel de cette eau et par conséquent une augmentation du volume, générant des contraintes au sein de la pierre. Le gel agit selon plusieurs mécanismes complexes qui peuvent interagir entre

eux. Les contraintes générées sont liées à l'action conjointe de l'augmentation volumique pendant la formation de la glace et des migrations d'eau non gelée. Ce phénomène peut amener des désordres importants sur les matériaux poreux. De nombreuses recherches ont travaillées sur ce sujet dont [Al- Omari 2015, Walbert 2015, Thomachot-Schneider 2018] et ont permis de déterminer les mécanismes d'altération.

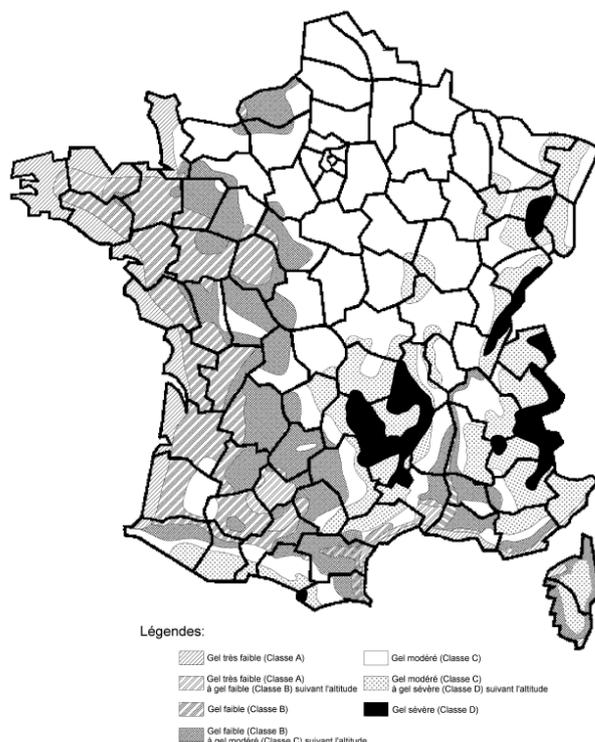


Figure 13 : Carte de France illustrant la répartition des zones de gel [Afnor 2006]

Nous proposons quatre niveaux de gravité, directement relié au découpage proposé par la norme EN NF B10-601 [Afnor 2006] concernant les prescriptions générales d'emploi des pierres naturelles. Ce découpage est détaillé par municipalité et elle propose quatre zones de gel (A : très faible, B : faible, C : modéré et D : sévère). Ces classes de gel (sévere, modéré, faible et très faible) ont été définies par les conditions suivantes mesurées en moyenne annuelle sur les 30 dernières années :

- Catégorie A : Gel très faible, moins de 2 jours ayant atteint une température inférieure à $- 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, correspondant à la gravité 0 ;
- Catégorie B : Gel faible, moins de 4 jours avec une température inférieure à $- 6\text{ }^{\circ}\text{C}$, correspondant à la gravité 1 ;
- Catégorie C : Gel modéré, moins de 10 jours avec une température inférieure à $- 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, correspondant à la gravité 2 ;
- Catégorie D : Gel sévère, plus de 10 avec une température inférieure à $- 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, correspondant à la gravité 3.

Nous proposons la décomposition en niveau de gravité dans le tableau suivant :

Gravité	0	1	2	3
Critère : Gel/dégel	Gel très faible	Gel faible	Gel modéré	Gel sévère

Tableau 36 : Proposition de gravité du critère lié au gel/dégel

3.1.1.2.1.1.4 Influence du front de mer

La distance par rapport au front de mer a un impact sur les matériaux. Étant donné que le sel, principalement le chlorure de sodium NaCl (appelé également halite), se trouve couramment sur les surfaces des bâtiments en bord de mer, il pénètre dans les maçonneries à la fois par l'intermédiaire des remontées capillaires ou transporté par l'eau (liquide ou vapeur) dans les pores, mais aussi par impaction d'embruns [Zezza 1996, Cardell 2003]. Nous proposons, dans le Tableau 37, quatre niveaux de gravité, reliés à la distance du bâti étudié par rapport au front de mer.

Gravité	0	1	2	3
Critère : Distance du front de mer	Très éloigné (>100 km)	Moyennement éloigné (100 – 1 km)	Proche (10 -1 km)	En front de mer (< 1 km)

Tableau 37 : Proposition de gravité du critère lié au front de mer

3.1.1.2.1.1.5 Influence du rayonnement solaire

Les rayonnements émis par le soleil comportent des ondes électromagnétiques dont une partie, appelée le rayonnement solaire, détermine principalement les conditions climatiques (dont la durée de l'ensoleillement) d'une région. Ces rayonnements sont plus ou moins absorbés par les matériaux, leur fournissant ainsi une énergie qui peut participer à leur altération. Les radiations les plus énergétiques sont les ultraviolets. Ce sont les plus nocives, particulièrement pour les matières organiques telles que le bois et les textiles. Sur les roches ou les pierres, l'influence de ces radiations et notamment des infrarouges, est moindre mais elles contribuent à augmenter leur température [Verdel 1993].

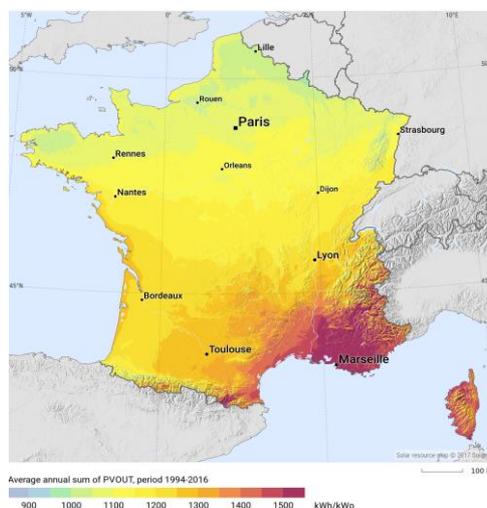


Figure 14 : Carte de France illustrant la répartition de la radiation solaire¹⁵

Le rayonnement solaire est mesuré par l'irradiation solaire correspondant à la quantité d'énergie solaire horaire issue du rayonnement solaire incident reçu par unité de surface, exprimée usuellement en watt-heure par mètre carré (Wh/m²) ou en joules par mètre carré (J/m²) selon le système international d'unités. Le Tableau 38 permet de montrer qu'en fonction des mois et de la localisation en France le rayonnement solaire n'est pas le même (cf. Figure 14). Par exemple, dans le Sud de la France est mesuré une moyenne de 4,22 kWh/m² sur l'année tandis que dans le Nord de la France est mesuré une moyenne de 2,89 kWh/m²

¹⁵ Source : <https://solargis.com/>

Radiation globale kWh/m ²	jan	fév.	mars	avr	mai	juin	juil	août	sep	oct	nov	déc	Moyenne annuelle
Lille	0,70	1,34	2,47	3,89	4,90	5,53	5,09	4,29	3,18	1,82	0,88	0,55	2,89
Paris	0,87	1,52	2,88	3,92	5,01	5,59	5,33	4,44	3,38	1,98	0,99	0,72	3,06
Clermont-Ferrand	1,20	1,89	3,06	4,21	4,64	5,57	5,98	4,98	3,87	2,34	1,44	1,01	3,36
Marseille	1,69	2,39	3,89	5,13	6,19	6,97	7,06	6,09	4,64	2,99	1,94	1,49	4,22

Tableau 38 : Radiation globale

3.1.1.2.1.1.6 Influence de la variation de la température

La variation de la température au cours d'une journée, ou bien sur l'année a des conséquences sur le bâti et donc sur les matériaux le composant. Les effets de la température entraînent des contraintes dites "thermiques" et engendrent une dilatation ou une contraction des matériaux. La pierre, le bois, le béton et le métal sont les principaux matériaux des édifices anciens ; ils sont sujets à des variations dimensionnelles sous les variations de température. Elles proviennent essentiellement de la chaleur fournie (par le rayonnement solaire durant le jour et de la perte de chaleur par rayonnement infrarouge et phénomène de convection durant la nuit). Ces phénomènes ne dépendent pas seulement de la couleur et de l'épaisseur du matériau, mais également de son hétérogénéité qui peut conduire à des déformations différentielles au cœur du matériau [Verdel 1993, McAllister 2017].

Du point de vue mécanique, ces variations thermiques induisent des contraintes dites "thermiques" dont l'intensité dépend de plusieurs facteurs : l'écart de température ΔT , le coefficient de dilatation thermique du matériau α , son module d'élasticité E et les conditions aux limites de l'élément (mouvement libre ou contraint). En l'absence d'eau par exemple, la contrainte qui se développe dans un matériau s'écrit de façon simplifiée par la formule ci-dessous :

$$\sigma = E \cdot \Delta T \cdot \alpha \quad (6)$$

Le coefficient de dilatation thermique α caractérise cette déformation et s'exprime en mètres par mètre et par degré Kelvin (mm/mK). Selon le type de pierre, il peut varier de 1.10^{-9} à 16.10^{-6} mm/mK.

Matériau	Coefficient de dilatation thermique linéaire en K ⁻¹	Variation de longueur ΔL dans le cas d'une longueur de 1m avec une variation de température ΔT de 20°C (mm)
Acier	11.10^{-6}	0,22
Béton	10.10^{-6}	0,20
Bois	35.10^{-6} à 55.10^{-6}	0,70 à 1,10
Granit	5.10^{-6} à 9.10^{-6}	0,10 à 0,18
Pierre	1.10^{-6} à 16.10^{-6}	0,02 à 0,32

Tableau 39 : Coefficient de dilatation thermique des principaux matériaux utilisés dans le bâti ancien

Dans le Tableau 39, les coefficients de dilatation thermique des principaux matériaux sont énumérés avec la variation de longueur d'un matériau (en prenant l'hypothèse que le matériau fait un mètre de longueur) sur une journée.

Grâce aux données de météo France, nous avons pu déterminer les températures minimales (en hiver) et les températures maximales (en été) sur les stations météorologiques situées au plus proche des bâtis. Même si les températures relevées ne sont pas exactement celles des sites, elles donnent une idée des amplitudes

thermiques annuelles mesurées à l'aide des températures normales. Les amplitudes thermiques annuelles ont été calculées avec la valeur minimale en janvier et la valeur maximale en juillet, les valeurs calculées sont l'amplitude maximale mesurée de 26,8°C et l'amplitude minimale mesurée de 22,9°C. Pour pouvoir mettre en place une échelle de gravité, nous avons déterminé l'amplitude minimale annuelle (14,5°C) et l'amplitude maximale annuelle (34,8°C). Nous proposons dans le Tableau 40 quatre critères de gravité.

Gravité	0	1	2	3
Critère : Température	Variation annuelle < 20°C	Variation annuelle entre 20 et 25°C	Variation annuelle entre 25 et 30°C	Variation annuelle > 30°C

Tableau 40 : Proposition de gravité du critère lié à la température

3.1.1.2.1.1.7 Influence de l'impact de la foudre

La foudre est un facteur de dégradation puisqu'elle peut engendrer des incendies. La foudre est un phénomène naturel de dommages importants qui provoque une décharge électrique qui produit une énergie pouvant atteindre plusieurs milliers de méga-watts. Les coups de foudre peuvent être divisés en coups de foudre directs sur la structure et en coups de foudre à proximité de la structure.

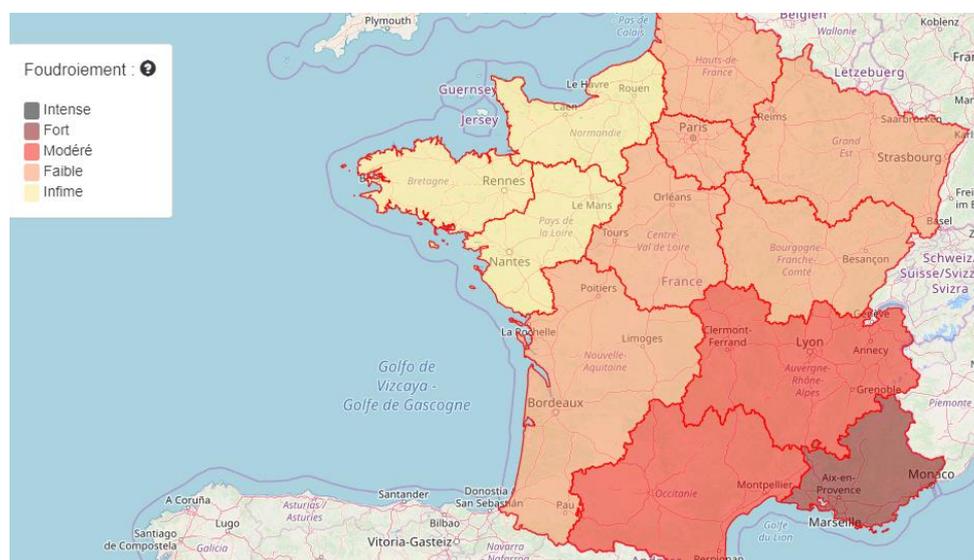


Figure 15 : Carte de France illustrant la répartition des foudroiements entre 2009 et 2018¹⁶

Si le bâti n'est pas protégé contre la foudre, il peut y avoir un risque de destruction totale ou partielle. Il existe des paratonnerres qui visent à protéger la structure d'un bâtiment et des parafoudres qui sont des protections à poser sur le circuit électrique pour protéger les appareils électriques des surtensions générées par la foudre.

¹⁶ Source : http://public.meteorage.fr/web_statsmap/web_statsmap.html#

Nous proposons quatre niveaux de gravité selon le découpage proposé par le site METEORAGE (cf. Figure 15) où le découpage s'effectue par municipalité. Dans le cadre de la thèse, nous proposons de rassembler le niveau fort et intense. Le découpage proposé est le suivant :

- Gravité 0 : correspond au niveau infime ;
- Gravité 1 : correspond au niveau faible ;
- Gravité 2 : correspond au niveau modéré ;
- Gravité 3 : correspond au niveau fort et intense.

3.1.1.2.1.2 Critère lié aux événements extrêmes

Parmi les facteurs naturels de dégradation, certains phénomènes peuvent provoquer une destruction rapide du patrimoine. Ces phénomènes qui peuvent être d'origine tellurique ou hydrologique, sont encore souvent imprévisibles et causent d'énormes dommages aux bâtis anciens qui n'ont pas été conçus de manière à supporter leurs effets. Dans le cadre de nos travaux, nous nous intéresserons aux principaux phénomènes liés aux séismes et aux sécheresses ; nous les appelons « événements extrêmes ».

3.1.1.2.1.2.1 Influence du risque sismique

L'action d'un séisme peut engendrer des dégradations désastreuses pour le patrimoine bâti. Pendant un tremblement de terre, un bâti est brusquement soumis à une accélération erratique transmise par le sol dont la valeur et la direction changent plusieurs fois par seconde. Les composantes horizontales de cette accélération sont les plus dangereuses car elles soumettent la structure à des efforts horizontaux en vue desquels elle n'a pas été conçue.

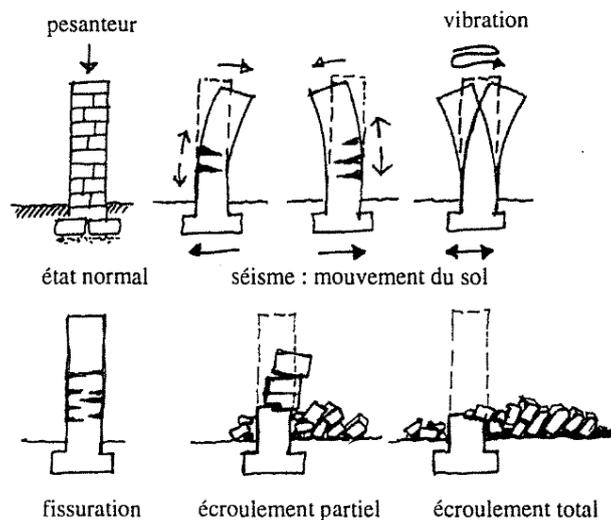


Figure 16 : Effets d'un séisme sur un mur de maçonnerie – cas d'une accélération horizontale [Verdel, 1993]

Ces efforts engendrent alors des tractions auxquelles les maçonneries ne peuvent résister. Les influences cumulées de ces mécanismes conduisent alors à l'apparition de fissures, plus ou moins larges et plus ou moins profondes dans l'édifice ; la structure peut s'écrouler partiellement ou complètement. Bien qu'en France, il n'y a pas eu de catastrophe récente, dans d'autres pays des événements récents ont eu lieu et beaucoup de dommages ont été relevés sur le patrimoine culturel (exemple : cas du Népal en 2015 [Pan 2018], cas de l'Italie en 2016).

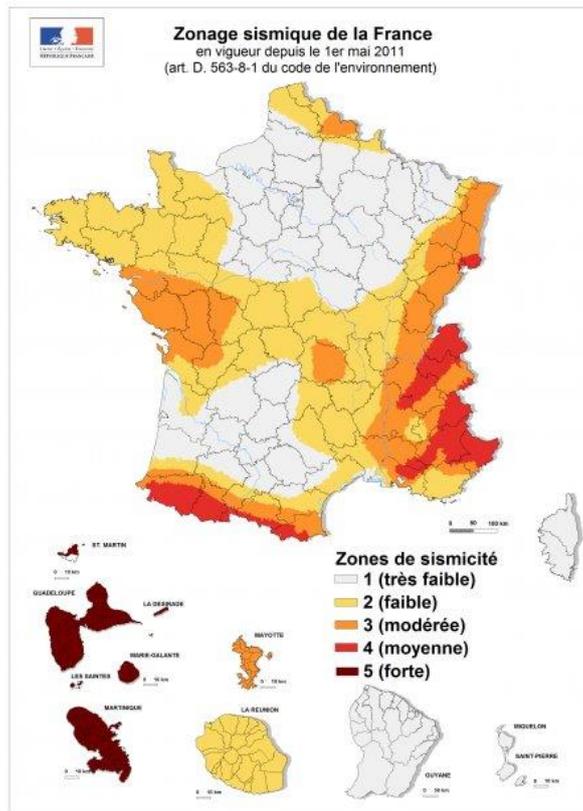


Figure 17 : Carte de France illustrant la répartition des zonages sismiques

Le risque sismique est évalué par l'analyse de la sismicité historique (c'est-à-dire la récurrence des séismes) et de la sismicité instrumentale. L'identification des failles actives permettent d'évaluer l'aléa sismique d'une région (cf. Figure 17). L'aléa sismique est défini par la probabilité qu'un séisme survienne dans une région donnée sur une période de référence (50 ans, 500 ans, ...). Un zonage sismique de la France en cinq zones a ainsi été élaboré (décret n° 2010-1255 du 22 octobre 2010) : sismicité très faible (zone 1), sismicité faible (zone 2), sismicité modérée (zone 3), sismicité moyenne (zone 4) et sismicité forte (zone 5). Ainsi, nous proposons un découpage selon une échelle de gravité répartie en quatre zones, comme l'indique le tableau ci-dessous :

Gravité	0	1	2	3
Critère : Risque sismique	Zone de sismicité 1 (très faible)	Zone de sismicité 2 (faible)	Zone de sismicité 3 (modérée)	Zone de sismicité 4 (moyenne) et 5 (forte).

Tableau 41 : Proposition de gravité du critère lié au risque sismique

3.1.1.2.1.2.2 Influence du risque de sécheresse

La sécheresse représente un facteur de dégradation qui peut être également désastreux pour le patrimoine bâti.

Gravité	0	1	2	3
Risque de sécheresse	Nul	Faible	Moyen	Fort

Tableau 42 : Proposition de gravité du critère lié au risque de sécheresse

Le risque de sécheresse est défini comme étant le retrait par assèchement des sols argileux lors d'une sécheresse prononcée et/ou durable, produisant des déformations de la surface des sols. Il peut être suivi

de phénomènes de gonflement au fur et à mesure du rétablissement des conditions hydrogéologiques initiales. Nous proposons un découpage selon une échelle de gravité répartie en quatre zones, selon le Tableau 42.

Pour cela, le *Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM)* a mis en place une cartographie de l'aléa sur la totalité de la France. Les cartes ont pour but de délimiter toutes les zones qui sont a priori sujettes au phénomène de retrait-gonflement et de hiérarchiser ces zones selon un degré d'aléa croissant. Les cartes peuvent se consulter sur le site *Géorisques*¹⁷ mis en place par le ministère de la transition écologique et solidaire. Pour chaque bâti de notre corpus nous avons utilisé la carte interactive proposée par le site pour déterminer la gravité du critère.

3.1.1.2.2 Critère lié aux phénomènes biologiques

3.1.1.2.2.1 Influence des champignons lignivores

Les champignons lignivores engendrent des désordres dans les structures bois et peuvent mettre en péril la solidité de la structure. La plus connue, la plus répandue, la plus invasive et destructrice, se nomme *Serpula Lacrymans*, ou appelé couramment *Mérule*. Ce champignon peut commencer son action destructrice à partir d'une humidité des bois de 20-22% en se nourrissant de la cellulose et la lignine contenu dans ce matériau (toutes essences confondues) [Laurent 2017].

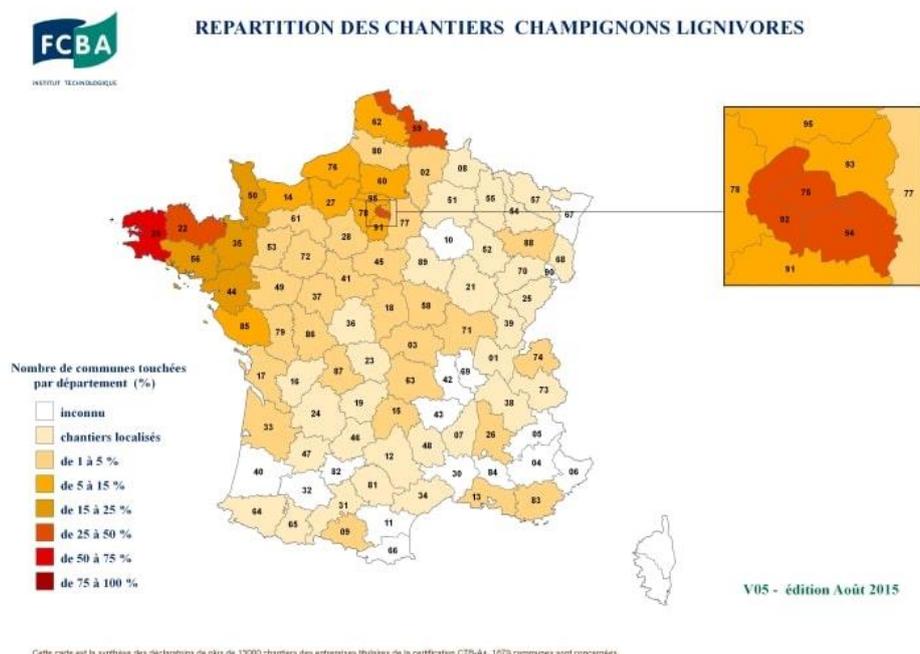


Figure 18 : Carte de France proposée par le FCBA avec la répartition des chantiers où ont été déclarés les champignons lignivores (version 05 – Aout 2015)

L'institut technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement (FCBA) a mis en place une carte de la France où (cf. Figure 18) est indiqué pour la plupart des départements le pourcentage de communes touchées par des champignons lignivores. Nous proposons le découpage suivant :

- Gravité 0 : correspond au pourcentage inconnu des communes impactées, nous faisons l'hypothèse l'absence de présence du champignon ;
- Gravité 1 : correspond aux chantiers localisés et allant jusqu'à 5% des communes touchées dans les départements ;

¹⁷ <https://www.georisques.gouv.fr/>

- Gravité 2 : correspond à l'intervalle de 5% à 25% des communes touchées dans les départements ;
- Gravité 3 : supérieur à 25% des communes touchées dans les départements.

3.1.1.2.2 Influence des termites

Les termites, insectes à larves xylophages (ILX), engendrent des désordres dans les structures bois et peuvent mettre en péril la solidité de la structure. La difficulté est de détecter leur présence. Pour cela, il existe un diagnostic immobilier obligatoire à effectuer avant tout achat ou vente d'un bien immobilier.

Les principales régions concernées par l'infestation des ILX sont : le Sud-ouest ; les départements des côtes atlantiques et méditerranéennes ; les départements bordant les vallées du Rhône, de la Garonne et de la Loire et l'Île de France.

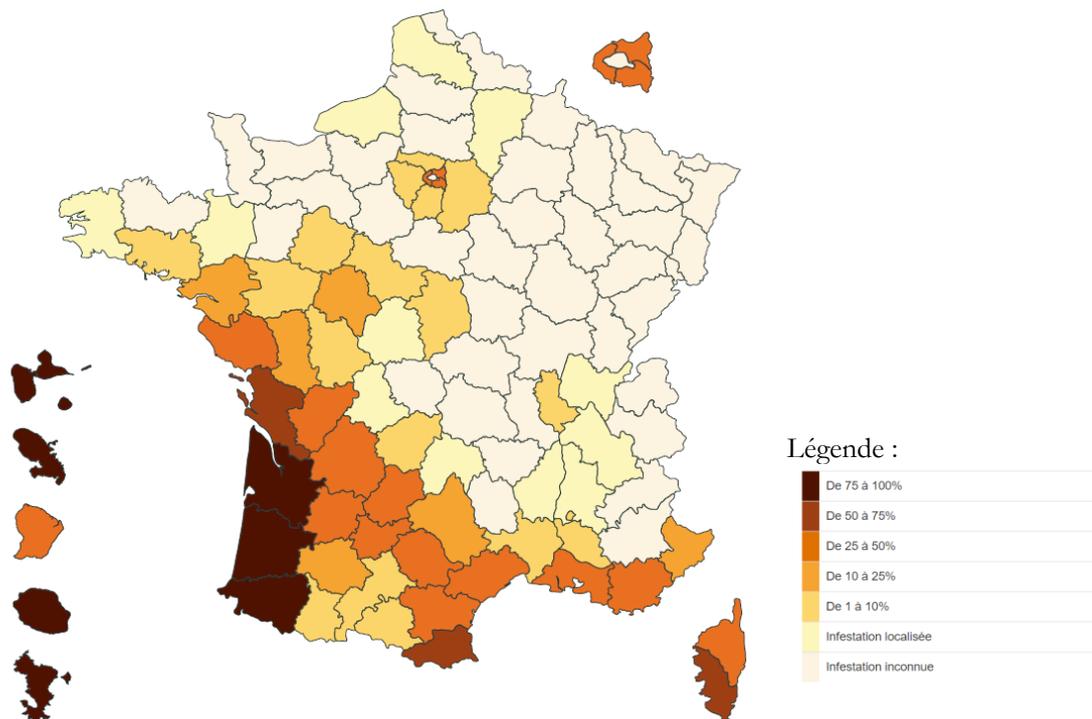


Figure 19 : Carte départementale de la France des infestations proposée par le FCBA

Le FCBA a mis en place une carte de la France (cf. Figure 19) où est indiqué pour la plupart des départements le pourcentage de communes infectées par les termites. Dans le modèle, nous proposons le découpage suivant :

- Gravité 0 : correspond au pourcentage inconnu, nous faisons l'hypothèse de l'absence d'insecte à larve xylophage ;
- Gravité 1 : correspond aux infestations localisées et jusqu'à 10% des communes touchées par département ;
- Gravité 2 : correspond aux infections de 10% à 50% des communes touchées par département ;
- Gravité 3 : correspond aux infections supérieures à 50% des communes touchées par département.

3.1.1.2.3 Critère lié aux phénomènes anthropiques

Par le développement de ses activités ou de façon plus directe, l'homme peut être responsable d'une altération de son environnement et de son patrimoine architectural. Dans le modèle, nous proposons de prendre en compte six critères : l'occupation dans le bâtiment, la pollution atmosphérique, l'attractivité

touristique du site, le potentiel risque de vandalisme, le changement de fonction du bâti et l'état des installations et des équipements.

3.1.1.2.3.1 Influence de l'occupation du bâti

L'occupation dans le bâtiment peut entraîner des phénomènes d'usure des matériaux (flèche du plancher, disparition des polychromies, usure du sol, tâche, etc.) mais également un bâtiment inoccupé peut entraîner des désordres significatifs (absence d'aération, absence de chauffage, non détection de fuite, etc.).

Nous considérons l'hypothèse que les phénomènes d'usure d'un bâti lorsqu'il est occupé sont plus importants que dans le cas où la structure n'est pas habitée. L'occupation du bâtiment est déterminée lors de l'inspection selon le tableau suivant :

Gravité	0	1	2	3
Critère : Occupation dans le bâtiment	Absence 0 personne sur l'année	Faible Habité pendant quelques jours sur l'année	Moyen Habité pendant quelques semaines sur l'année	Élevé Habité sur l'année entière

Tableau 43 : Niveaux de gravité du critère lié à l'occupation dans le bâtiment

3.1.1.2.3.2 Influence de la pollution atmosphérique

La pollution atmosphérique engendre des altérations (soiling, croute noire, sels à base de sulfates et nitrates, etc.) sur les bâtiments. La pollution est constituée de microparticules noires (suies, cendres volantes) à base de carbone provenant principalement de la combustion du charbon, des gaz et des dérivés du pétrole.

Nous proposons de prendre en compte le nombre d'habitants par ville pour déterminer la gravité de la pollution atmosphérique. Dans l'étude menée par [Lefèvre 2001], il a été démontré l'impact de la démographie sur les matériaux du patrimoine avec la formation de la croute gypseuse de la pierre ainsi que le phénomène de corrosion du verre. Le nombre d'habitants par ville est déterminé sur un site national référençant l'ensemble des éléments administratifs par municipalité¹⁸. Nous proposons d'attribuer un niveau de gravité avec le tableau suivant :

Gravité	0	1	2	3
Critère : Occupation dans le bâtiment	[0 ; 1 000[[1 000 ; 10 000[[10 000 ; 100 000[[100 000 ; 100 000[

Tableau 44 : Niveaux de gravité du critère lié à la pollution atmosphérique

3.1.1.2.3.3 Influence de l'attractivité touristique du site

L'attractivité touristique d'un site peut être négative ou bien positive, en fonction de sa politique de gestion [Lazzarotti 2010]. Dans les années 1970, le phénomène touristique [Icomos 1976] était perçu comme négatif [Icomos 1976], tandis qu'aujourd'hui l'attractivité touristique est vue plutôt positivement [Icomos 1999] si le site est aménagé pour répondre à la demande. Lorsqu'il y a du tourisme, les retombées économiques doivent permettre de renforcer la politique de gestion, de maintenance, d'entretien ou des campagnes de restauration du bâti.

Par ailleurs, il est important de mentionner que lorsque le bâti reçoit du public, il bénéficie du statut d'établissement recevant du public (ERP). Ces établissements sont soumis à des obligations en matière de sécurité et de lutte contre l'incendie et ils sont classés en types et en catégories qui définissent les exigences

¹⁸ <http://www.annuaire-des-mairies.com/>

réglementaires applicables (type d'autorisation de travaux ou règles de sécurité par exemple) en fonction des risques. Dans notre modèle, nous proposons de prendre en compte le fait que l'attractivité touristique engendre des altérations (ex : usure des matériaux par le passage des personnes, site non adapté pour recevoir du public peut entraîner par exemple une surcharge d'un plancher, modification de la composition de l'air en intérieur pouvant engendrer une altération par exemple de décors peints, destructions intentionnelles). Nous proposons d'attribuer les niveaux de gravité tels que proposés selon le tableau suivant :

Gravité	0	1	2	3
Critère : L'attractivité touristique	Pas touristique	Peu touristique	Moyennement touristique	Très touristique

Tableau 45 : Niveaux de gravité du critère lié à l'attractivité touristique

3.1.1.2.3.4 Influence du vandalisme

Le délabrement lié au vandalisme engendre des destructions intentionnelles (graffiti donc altération des matériaux, objets cassés ou fracturés etc.). C'est pourquoi, dans le cas de notre étude, nous proposons ce critère afin de prendre en compte ce risque. Le risque du vandalisme est vérifié sur le site en regardant si le gestionnaire a mis en place des mesures afin de les limiter. Nous proposons d'attribuer le niveau de gravité selon le tableau ci-dessous :

Gravité	0	1	2	3
Critère : Vandalisme	Absence possible de vandalisme	Possibilité de vandalisme faible	Possibilité de vandalisme moyen	Possibilité de vandalisme fort

Tableau 46 : Niveaux de gravité du critère lié au vandalisme

3.1.1.2.3.5 Influence du changement de fonction du bâti

Le changement d'usage d'un bâti, par exemple un bâti utilisé en tant que bureau se transforme pour stocker des archives, peut engendrer des détériorations si ces changements ne sont pas pris en compte dans un projet de réhabilitation [Icomos 2003]. Le degré de changement de fonction du bâti est pris en considération où l'on fait l'hypothèse que plus sa fonction a changé plus cela aura un impact négatif (le critère aura une gravité importante). Nous proposons d'attribuer le niveau de gravité selon le tableau suivant :

Gravité	0	1	2	3
Critère : Changement d'usage d'un bâti	Absence	Faible	Moyen	Élevé

Tableau 47 : Proposition de gravité du critère lié au changement de fonction du bâti

3.1.1.2.3.6 Influence de l'état des installations / équipements

L'état des installations ou des équipements peut engendrer des altérations. Ce critère concerne un panel d'équipements importants : installations de gaz ou d'électricité, installations d'assainissement, moyens d'accessibilité (si ERP), dispositifs d'alarme, de sécurité contre la foudre, de mise en sécurité en termes de sécurité incendie, etc.

Le risque d'embrasement n'a pas été pris en compte directement dans ce modèle mais bien entendu il est pris en compte indirectement. En effet, ce risque dépend de multiples critères : nature des matériaux employés, dispositifs de sécurité incendie, présence ou non de travaux, stockage des matériaux ou autres,

présence ou non d'encombrement, présence de poussières ou non, état des installations, etc. Nous proposons d'attribuer le niveau de gravité du critère selon le tableau suivant :

Gravité	0	1	2	3
Critère : Etat des installations / équipements	Sécurité	Certains risques	Mauvais état	A refaire

Tableau 48 : Niveaux de gravité du critère lié à l'état des installations / équipements

3.1.1.2.3.7 Influence du changement climatique

D'une manière générale, les conséquences du changement climatique sont : une élévation des températures mondiales de 1,4 à 5,8 C° d'ici 2100, une intensification du cycle hydrologique avec une intensité accrue des événements pluvieux, une élévation du niveau des mers de 0,09 à 0,88 m et une fréquence accentuée des tempêtes.

Dans le modèle de gestion, nous n'avons pas pris en compte ce critère lié au changement climatique. Mais, il nous semble important de le mentionner, car on sait que le patrimoine bâti est ou va être impacté puisqu'il y a une évolution des variables climatiques. [Icomos 2008] a fait une liste non exhaustive des nouvelles problématiques qui impacteront le patrimoine bâti avec : des mouvements de la structure dû au déplacement des fondations porteuses en fonction des sols argileux qui deviendront mouillés ou secs, des nouvelles altérations de la pierre, des altérations engendrées par l'élévation du niveau de la mer impactant principalement les fortifications et les sites côtiers, une accélération de l'altération du patrimoine du XXème siècle notamment les structures de béton ainsi qu'une accélération de l'altération des structures composées de terre. En effet, celles-ci sont constituées d'un matériau de construction éphémère qui a subi très peu de modifications à partir de son extraction, et par conséquent, elle revient plus facilement à ses origines

Le Tableau 49 présente les variables concernées avec leurs évolutions et des exemples d'aléas extrêmes dont la canicule. Celle-ci peut engendrer de nouvelles problématiques de conservation sur un bâti puisqu'avec le temps les températures sont de plus en plus extrêmes (positives et négatives). Les matériaux sont soumis à ces températures extrêmes et donc à des déformations excessives. De ce fait, le Conseil International des Monuments et des Sites a établi des recommandations [Icomos 2008] afin de faire face à leur vulnérabilité.

Variable climatique concernée	Evolutions climatiques retenues	
	Evolutions tendancielles	Exemples d'aléas extrêmes
Température	Augmentation des températures	Augmentation période de sécheresse Augmentation des valeurs extrêmes de température Canicule
Précipitations	Evolution de la pluviométrie	Augmentation des valeurs extrêmes et du nombre de jours de précipitations Diminution du nombre de jours de chutes de neige Inondations
Vent	Evolution des régimes de vent	Vent violent : tempête, tornade et etc.
Climat de houle et niveau marin	Augmentation du niveau de la mer	Submersion temporaire
Niveaux des eaux souterraines	Evolution des niveaux des eaux souterraines	Evolution des niveaux des eaux souterraines Inondations
Evénements extrêmes	-	Cyclones
Biodiversité	Evolution de la biodiversité Augmentation du nombre d'oiseaux migrateurs du fait de l'augmentation de la température Augmentation de la prolifération des algues dans les cours d'eau due à l'augmentation du nombre de jours de canicules	-

Tableau 49 : Synthèse de l'influence du changement climatique sur les variables [Cerema 2015]

3.1.1.3 Indicateur de vulnérabilité

Le caractère vulnérable peut être défini par « qui, par ses insuffisances, ses imperfections, peut donner prise à des attaques »¹⁹. Pour cette définition, nous proposons quatre critères pour exprimer le niveau d'effet prévisible qu'une structure soit endommagée : la prise en compte de la politique de maintenance, son ancienneté, sa protection et sa typologie architecturale. Les niveaux de gravité proposés pour chacun de ces critères sont indiqués dans le tableau ci-dessous :

		Maintenance	Age	Protection	Architecture
Gravité	0	Active	De 1900 à aujourd'hui	Monument classé	Architecture militaire et ouvrage d'art
	1	Moyennement active	De 1789 à 1900	Monument inscrit	Architecture religieuse et publique
	2	Faiblement active	De XVème siècle à 1789	Autres protections (label)	Architecture de jardin et funéraire
	3	Absence de maintenance	Avant le XVème	Monument non protégé	Architecture privée et domestique

Tableau 50 : Niveaux de gravité des critères pour la détermination de l'indicateur de vulnérabilité

3.1.1.3.1 Influence de la politique de maintenance

La politique de maintenance fait partie de l'indicateur de vulnérabilité car si un bâti n'a pas d'entretien, il a une possibilité importante qu'il soit impacté par des altérations. Par exemple, si un élément de la toiture a bougé ou est manquant, du fait de l'absence de suivi cet élément ne sera pas détecté comme manquant et engendrera une infiltration dans la charpente. Cette dernière est composée d'éléments en bois et subira l'impact de l'eau et engendrera un pourrissement de certains éléments pouvant aller jusqu'à la rupture.

Le degré de présence d'une politique de maintenance est pris en considération dans le modèle où l'on fait l'hypothèse que plus un bâti n'a pas de suivi, plus le critère aura une gravité importante.

3.1.1.3.2 Influence de l'ancienneté

L'ancienneté du bâti fait partie de l'indicateur de vulnérabilité. L'ancienneté peut entraîner ou non une vulnérabilité du bâti. Dans certains cas, elle peut favoriser la conservation ou l'entretien de l'édifice. Puisqu'il est possible qu'un château médiéval soit mieux conservé qu'une maçonnerie du XIXe siècle en raison notamment des niveaux de qualité de mise en œuvre et de qualité des matériaux utilisés. De plus, plus un édifice est ancien plus on lui confère de la valeur et plus il sera entretenu (exemple : amphithéâtres romains). Dans les autres cas, elle peut être l'origine des altérations présentes sur les structures. Puisque l'effet du temps n'est pas sans dommage pour les matériaux.

Dans le cas de notre étude, nous avons pris l'hypothèse que plus le bâti est ancien, plus sa vulnérabilité est importante. Nous avons décomposé les époques de construction en quatre gravités ; plus le bâti est ancien plus le critère aura une gravité importante.

¹⁹ Définition du dictionnaire Larousse (www.larousse.fr)

3.1.1.3.3 Influence de la présence ou non d'une protection

La présence ou non d'une protection fait partie de l'indicateur de vulnérabilité. La présence d'une protection peut être synonyme ou non de vulnérabilité puisque parfois un bâti va avoir une protection pour stopper un péril.

Dans le cas de notre étude, nous avons pris l'hypothèse qu'un bâti non protégé aura une vulnérabilité plus importante qu'un bâti protégé puisqu'idéalement lorsqu'un bâti est protégé celui-ci doit être entretenu et restauré. Quatre catégories de gravité sont proposées.

3.1.1.3.4 Influence de la typologie architecturale

La typologie architecturale fait partie de l'indicateur de vulnérabilité. La typologie architecturale peut être synonyme ou non de vulnérabilité. Dans cette étude nous faisons l'hypothèse que la typologie architecturale joue un rôle dans la volonté de conservation du bâti.

Par exemple, est-ce que l'architecture religieuse a eu une volonté d'être mieux conservée que l'architecture domestique ? Dans ce cas certainement que oui. Mais est-ce qu'elle a été mieux conservée que l'architecture militaire ? La réponse est moins évidente.

3.1.1.4 Indicateur socio-économique

L'enjeu socio-économique joue un rôle dans la politique de conservation du bâti. Pour cela, nous proposons un indicateur socio-économique composé de deux critères : l'utilisation du bâti (i.e. ses conséquences au niveau économique) et la valeur patrimoniale pour déterminer son importance. L'indicateur socio-économique a déjà été mis en place par [Setra 2006] et [Taillandier 2013]. Son but est de refléter le niveau d'intérêt que présente le patrimoine d'un point de vue stratégique, politique, économique, social et culturel. Nous proposons de définir les niveaux de gravité suivant le tableau ci-dessous :

		Utilisation	Valeur Patrimoniale
Gravité	0	Patrimoine non utilisé	Absence de protection
	1	Patrimoine utilisé comme lieux publics restreint (ex : habitation)	Autres protections
	2	Patrimoine utilisé comme lieux publics ouvert sans activité économique (ex : mairie)	Monuments inscrits
	3	Patrimoine utilisé comme lieux publics ouvert avec activité économique (ex : lieu touristique payant)	Monuments classés

Tableau 51 : Niveaux de gravité pour les critères de l'indicateur socio-économique

Dans notre étude, les bâtis ont des usages différents (tels que : lieu de culte, lieu de mémoire, lieu touristique, habitation, marché communal, etc.). Comme indiqué précédemment, l'indicateur socio-économique intègre deux critères : son usage et sa valeur patrimoniale. Plus l'indicateur a une valeur élevée, plus le bâti aura un enjeu socio-économique important.

3.1.1.5 Indicateur de coût

Le coût des travaux d'un bâti joue un rôle important dans la politique de conservation. Nous proposons un indicateur de coût ressenti par le gestionnaire et par le maître d'ouvrage. Nous proposons la prise en compte de quatre critères : typologie des travaux à effectuer, possibilité d'obtenir une aide financière, volume concerné des travaux et accessibilité du bâti. Nous proposons de définir les niveaux de gravité suivant le tableau ci-dessous :

		Typologie des travaux	Aide financière	Volume concerné	Accès
Gravité	0	Aucune intervention	Présence d'aide (supérieur à 50%)	Très faible	Facile
	1	Entretien / Mesures de prévention	Peu d'aide	Faible	Normal
	2	Réparation modérée et/ou investigation complémentaire	Très peu d'aide	Moyen	Complicé
	3	Intervention majeure basée sur un diagnostic	Absence d'aide	Grand	Très compliqué

Tableau 52 : Niveaux de gravité des critères de l'indicateur coût

3.1.1.6 Synthèse des familles de critères proposés et problématiques

Cette première section présente les 37 critères du modèle comprenant : les indicateurs (Ind1 à Ind5), les critères (C1 à C16) et les sous-critères (SC1 à SC16). Ces critères sont à évaluer pour chaque bâti.

Ces critères sont évalués soit à l'aide de données collectées in situ (en gris clair sur la Figure 20) soit à l'aide de données accessibles sur des sites gouvernementaux.

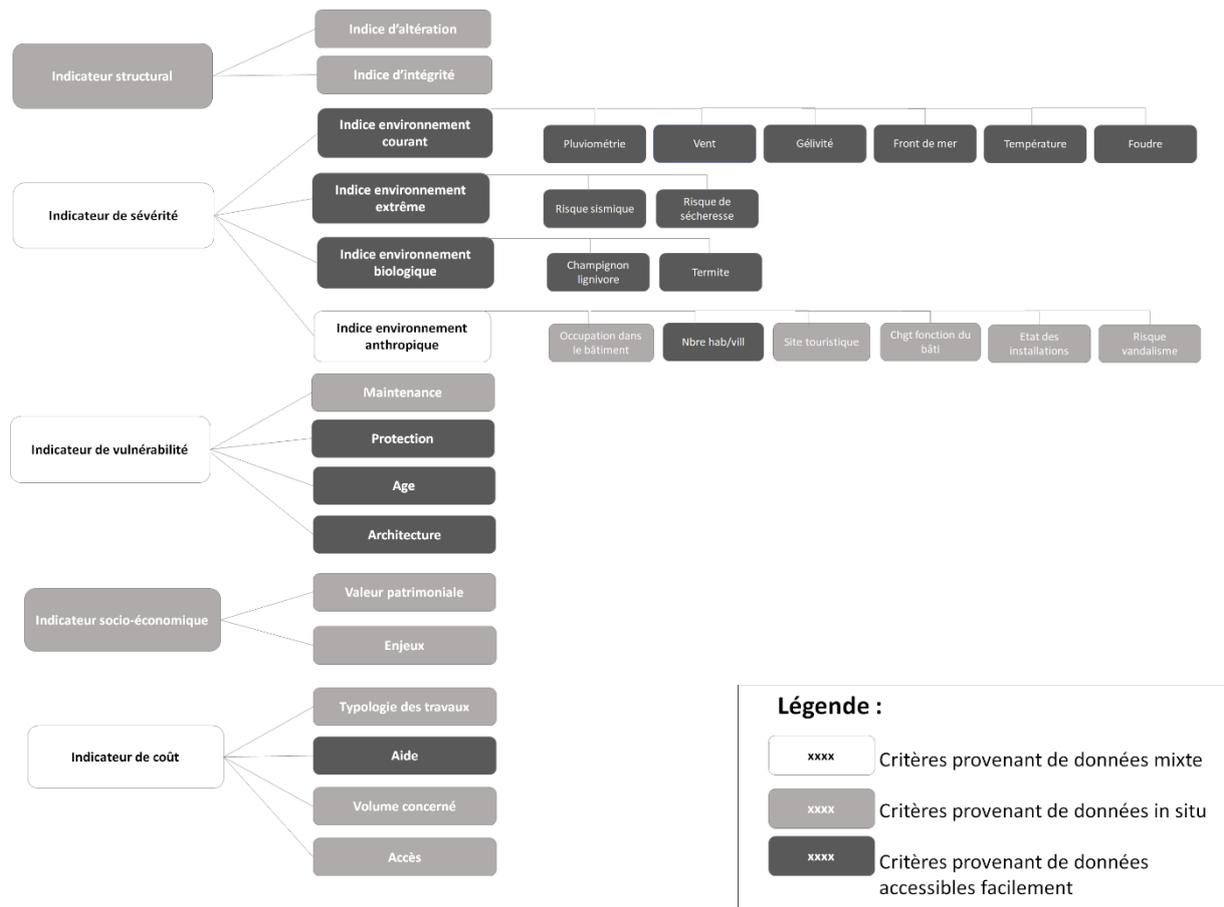


Figure 20 : Synthèse des différents types de données

Tous les critères sont évalués sur la même échelle, mais l'importance relative de chaque indicateur n'est pas prise en compte. C'est pourquoi, nous proposons dans la suite de ce travail, la mise en place de pondération à l'aide d'une méthode d'analyse multicritère hiérarchisée.

3.1.2 Hiérarchisation des critères

3.1.2.1 Notre problématique

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons proposé que les bâtis soient évalués par cinq indicateurs (Ind1 à Ind5) composés de critères (C1 à C16) et de sous critères (SC1 à SC16). Le but de l'ensemble est d'aider le décideur à opérer des choix en termes d'actions de conservations (entretien, réparation ou restauration) intégrant le maximum d'informations.

A cette fin, nous proposons la mise en place d'un outil d'aide à la décision fondé sur une approche multicritère pour évaluer la préférence relative de chaque indicateur/critère/sous critère par les propriétaires (ici, les décideurs) [Roy 1993, Maystre 1994].

Pour la détermination des pondérations nous proposons d'utiliser la méthode Analytic Hierarchy Process (AHP) qui est une méthodologie d'agrégation complète [Saaty 1990]. L'avantage de cette méthode est qu'elle fournit un classement de l'ensemble des stratégies. Cependant, son inconvénient est l'intégration sous une seule forme des critères de nature différente. Par ailleurs, cette méthode présente le risque de compenser une très mauvaise évaluation sur un critère par une très bonne sur un autre. Elle permet de décomposer un problème complexe en un système hiérarchique, dans lequel sont établies des combinaisons binaires à chacun des niveaux de la hiérarchie. Cette méthode a été utilisée dans plusieurs domaines dont une étude sur des bâtiments historiques et culturels d'un centre-ville [Kutut 2014, Dutta 2009]. Son objectif était de déterminer la stratégie de gestion à adopter (conservation du bâti ou sa démolition) en fonction de critères archéologiques, historiques, architecturaux, économiques et sociaux. Afin de nous prémunir des inconvénients de cette méthode, nous avons choisi une même échelle d'évaluation des indicateurs / critères / sous critères et formé une famille cohérente de critères (tous indépendants et non redondants).

3.1.2.2 Mise en place de la méthode AHP

3.1.2.2.1 Etape 1 : Elaboration de la structure hiérarchique du projet

Dans un premier temps, le problème est décomposé en une hiérarchie d'éléments inter-reliés. Dans le cas de notre problème, nous proposons la structure hiérarchique constituée de trois niveaux (les indicateurs, les critères et les sous-critères) selon la Figure 21.

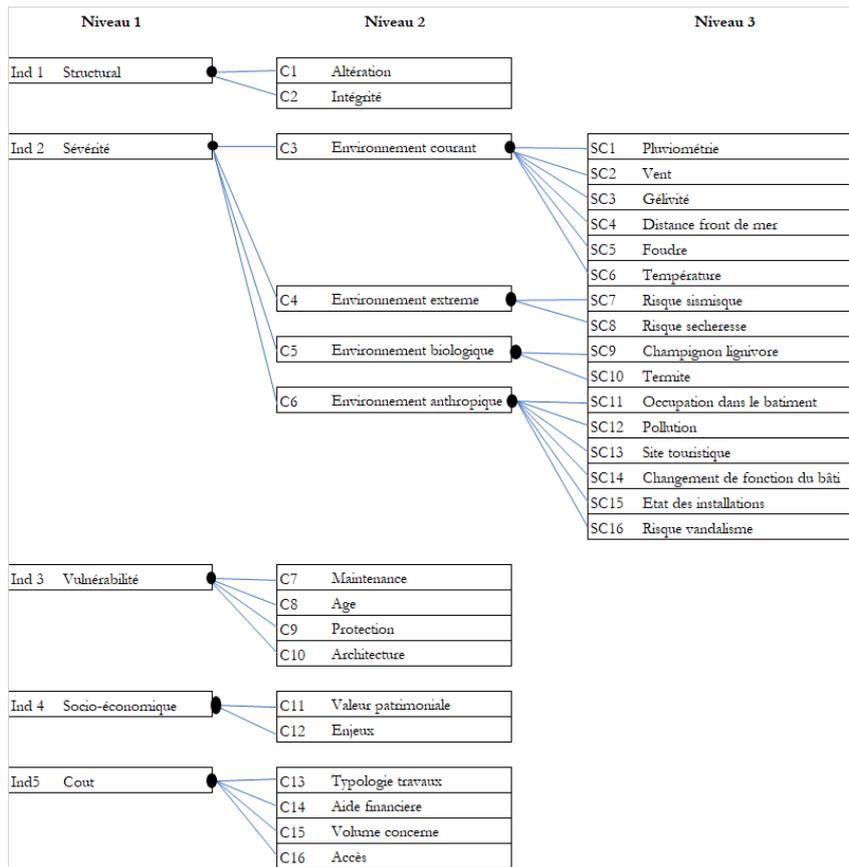


Figure 21 : Représentation graphique

3.1.2.2.2 Etape 2 : Réalisation de la comparaison par paire de critères

Cette étape permet de construire des matrices de comparaisons appelées matrices de jugement. Les valeurs de ces matrices sont obtenues par la transformation des jugements en valeurs numériques. Dans la littérature, l'échelle de Saaty, d'après le Tableau 53, est la plus connue, cependant nous avons décidé d'utiliser une échelle avec seulement cinq degrés d'importances pour simplifier les comparaisons.

Degré d'importance	Définition	Explication
1	Importance égale des deux éléments	Deux éléments contribuent autant à la propriété.
3	Faible importance d'un élément par rapport à un autre.	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent légèrement un élément à un autre
5	Importance forte ou déterminante d'un élément par rapport à un autre.	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent fortement un élément à un autre
7	Importance attestée d'un élément par rapport à un autre.	Un élément est fortement favorisé et sa dominance est attestée dans la pratique.
9	Importance absolue d'un élément par rapport à un autre.	Les preuves favorisant un élément par rapport à un autre sont aussi convaincantes que possible.
2, 4, 6, 8	Valeurs intermédiaires entre deux appréciations voisines	Un compromis est nécessaire entre deux appréciations.
Réciprocité	Si l'élément i se voit attribuer l'un des chiffres précédents lorsqu'elle est comparée à l'élément j, j aura donc la valeur inverse lorsqu'on la compare à i.	

(a)

Echelle	
Degré d'importance	Définition
1/5	Critère A beaucoup moins important que le critère B
1/3	Critère A moins important que le critère B
1	Importance égale des deux éléments
3	Critère A plus important que le critère B
5	Critère A beaucoup plus important que le critère B

(b)

Tableau 53 : Echelle de comparaison de Saaty (a) et échelle de comparaison proposée avec cinq degrés d'importances(b)

Les comparaisons par paires de critères de chaque niveau hiérarchique sont effectuées par rapport aux critères du niveau supérieur. Nous proposons d'expliquer en détail la mise en place des coefficients de pondération pour les indicateurs de premier niveau. Le Tableau 54 compare par paires les indicateurs, où les évaluations sont indiquées à titre d'exemple.

Comparaison par paire des critères : Critère A / critère B	Critères considérés comme importants	Echelle	Evaluation
Ind socio-éco / Ind Coût des travaux	Ind socio-éco / Ind Coût des travaux	Les deux critères ont la même importance	1
Ind socio-éco / Ind Structural	Ind socio-éco	Le critère A est plus important que le critère B	3
Ind Coût des travaux / Ind Structural	Ind Coût des travaux	Le critère A est plus important que le critère B	3
Ind socio-éco / Ind Sev de l'env	Ind socio-éco	Le critère A est beaucoup plus important que le critère B	5
Ind Coût des travaux / Ind Sev de l'env	Ind Coût des travaux	Le critère A est beaucoup plus important que le critère B	5
Ind Structural / Ind Sev de l'env	Ind Structural	Le critère A est plus important que le critère B	3
Ind socio-éco / Ind vulnérabilité	Ind socio-éco / Ind vulnérabilité	Les deux critères ont la même importance	1
Ind Coût des travaux / Ind vulnérabilité	Ind Structural	Le critère A est plus important que le critère B	3
Ind Structural / Ind vulnérabilité	Ind vulnérabilité	Le critère A est moins important que le critère B	1/3
Ind Sev de l'env / Ind vulnérabilité	Ind vulnérabilité	Le critère A est moins important que le critère B	1/3

Tableau 54 : Comparaison des critères du niveau 1

Pour déterminer les coefficients de pondération, neuf matrices de comparaison ont été réalisées, pour chacune d'entre-elle les vecteurs ont été normalisés et les coefficients de pondération ont été déterminés. Le Tableau 55 permet d'obtenir les facteurs de pondération du premier niveau.

Comparaison des critères	Ind1	Ind2	Ind3	Ind4	Ind5
Ind1 : Indicateur Socio-économique	1	1	3	3	1
Ind2 : Indicateur de Coût	1	1	3	5	3
Ind3 : Indicateur structural	1/3	1/3	1	5	1/3
Ind 4 : Indicateur de sévérité de l'environnement	1/3	1/5	1/5	1	1/3
Ind5 : Indicateur de vulnérabilité	1	1/3	3	3	1

Tableau 55 : Matrice de jugements des critères du niveau 1

Par exemple, pour la conception de la matrice correspondant au Tableau 55, on désigne « a_{12} » l'élément de l'évaluation entre l'indicateur socio-économique et l'indicateur de coût. Dans ce cas, nous avons estimé que ces deux indicateurs avaient la même importance. Tandis que pour « a_{13} », nous avons estimé que l'indicateur socio-économique est plus important que l'indicateur structural, sa valeur est donc de 3.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} \\ 1/a_{12} & 1 & a_{23} & a_{24} & a_{25} \\ 1/a_{13} & 1/a_{23} & 1 & a_{34} & a_{35} \\ 1/a_{14} & 1/a_{24} & 1/a_{34} & 1 & a_{45} \\ 1/a_{15} & 1/a_{25} & 1/a_{35} & 1/a_{45} & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

3.1.2.2.2.1 Calcul de la pondération des critères pour chacun des niveaux

Il s'agit ici de calculer l'importance relative de chacun des éléments de la hiérarchie à partir des évaluations obtenues de l'étape précédente. La détermination des priorités des éléments de chaque matrice se fait par la résolution du problème.

Critères	Ind1	Ind2	Ind3	Ind4	Ind5	Somme /lignes	Normalisation du vecteur
Ind1 : Indicateur socio-économique	5,0	4,3	13,7	27,0	7,7	50,0	0,273
Ind2 : Indicateur de coût	7,0	5,0	19,7	33,0	9,7	64,7	0,353
Ind3 : Indicateur structural	1,9	1,7	5,0	10,3	3,0	19,0	0,104
Ind 4 : Indicateur de sévérité de l'env	1,0	0,8	2,9	5,0	1,6	9,7	0,053
Ind5 : Indicateur de vulnérabilité	3,9	3,3	11,0	21,7	5,0	39,9	0,218
					Total	183,2	1

Tableau 56 : Normalisation de la matrice

Cette étape est répétée jusqu'à ce que les deux derniers vecteurs soient identiques et pour l'ensemble des matrices. Dans le cas de la matrice du premier niveau, nous obtenons les cinq coefficients de pondérations dans le Tableau 57. Les résultats montrent que l'indicateur de coût prédomine, il est suivi de l'indicateur socio-économique, puis de l'indicateur de vulnérabilité, de l'indicateur structural et de l'indicateur de sévérité de l'environnement.

Critères :	Pondération du critère
Ind1 : Indicateur socio-économique	0,275
Ind2 : Indicateur de coût	0,355
Ind3 : Indicateur structural	0,106
Ind4 : Indicateur de sévérité de l'environnement	0,055
Ind5 : Indicateur de vulnérabilité	0,209
Somme	1,000

Tableau 57 : Pondération du critère

3.1.2.2.2.2 Calcul du ratio de cohérence

Ce ratio permet de vérifier si la matrice est considérée comme suffisamment cohérente ; il constitue un test d'acceptation des poids des différents critères. Cette étape vise à détecter les incohérences éventuelles dans la comparaison de chaque paire de critères. Le ratio de cohérence est calculé comme suit :

$$RC = \frac{IC}{IA} \quad (8)$$

avec IC , le critère de consistance et IA , le critère de cohérence. Le critère de consistance est calculé comme suit :

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (9)$$

avec λ_{max} , la valeur propre et n le nombre de critères.

Le critère de cohérence est une valeur qui dépend du nombre de critères n d'après le tableau ci-dessous :

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
IA	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48	1,56	1,57	1,59

Tableau 58 : Valeurs du critère de cohérence aléatoire de Saaty [Saaty 1980]

Dans le cas où cette valeur dépasse 10%, les appréciations peuvent exiger certaines révisions [Yurkudu 2004] car les jugements ne sont pas considérés comme cohérents.

Le ratio de cohérence de la matrice est acceptable car il est de 9,2%. Pour le calculer nous avons déterminé le critère de cohérence IA . Nous avons cinq critères n donc d'après le Tableau 58, le critère de cohérence est de 1,12. Nous avons déterminé la valeur propre λ_{max} en calculant chaque λ_{indi} :

$$\lambda_{ind1} = \frac{(1 \times 0,275) + (1 \times 0,355) + (3 \times 0,106) + (3 \times 0,055) + (1 \times 0,209)}{0,275} \quad (10)$$

$$= 4,807$$

$$\lambda_{ind2} = \frac{(1 \times 0,275) + (1 \times 0,355) + (3 \times 0,106) + (5 \times 0,055) + (3 \times 0,209)}{0,355} \quad (11)$$

$$= 5,211$$

$$\lambda_{ind3} = \frac{\left(\frac{1}{3} \times 0,275\right) + \left(\frac{1}{3} \times 0,355\right) + (3 \times 0,106) + (3 \times 0,055) + \left(\frac{1}{3} \times 0,209\right)}{0,106} \quad (12)$$

$$= 6,233$$

$$\lambda_{ind4} = \frac{\left(\frac{1}{3} \times 0,275\right) + \left(\frac{1}{5} \times 0,355\right) + \left(\frac{1}{5} \times 0,106\right) + (3 \times 0,055) + \left(\frac{1}{3} \times 0,209\right)}{0,055} \quad (13)$$

$$= 5,610$$

$$\lambda_{ind5} = \frac{(1 \times 0,275) + \left(\frac{1}{3} \times 0,355\right) + (3 \times 0,106) + (3 \times 0,055) + (1 \times 0,209)}{0,209} \quad (14)$$

$$= 5,193$$

Suite au calcul de chaque λ_{indi} , λ_{max} est calculé :

$$\lambda_{max} = \frac{\lambda_{ind1} + \lambda_{ind2} + \lambda_{ind3} + \lambda_{ind4} + \lambda_{ind5}}{n} = 5,441 \quad (15)$$

Suite au calcul de λ_{max} , le critère de consistance est calculé :

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} = \frac{5,441 - 5}{5 - 1} = 0,103 \quad (16)$$

Enfin le calcul du ratio de cohérence est effectué :

$$RC = \frac{IC}{IA} = \frac{0,103}{1,12} = 9,2 \% \quad (17)$$

3.1.2.2.2.3 Résultat : valeur relative des critères

Les résultats sont synthétisés dans le schéma de la Figure 22. Il permet d'avoir une vue globale sur les coefficients de pondération des indicateurs Ind_i , des critères C_i et des sous-critères SC_i .

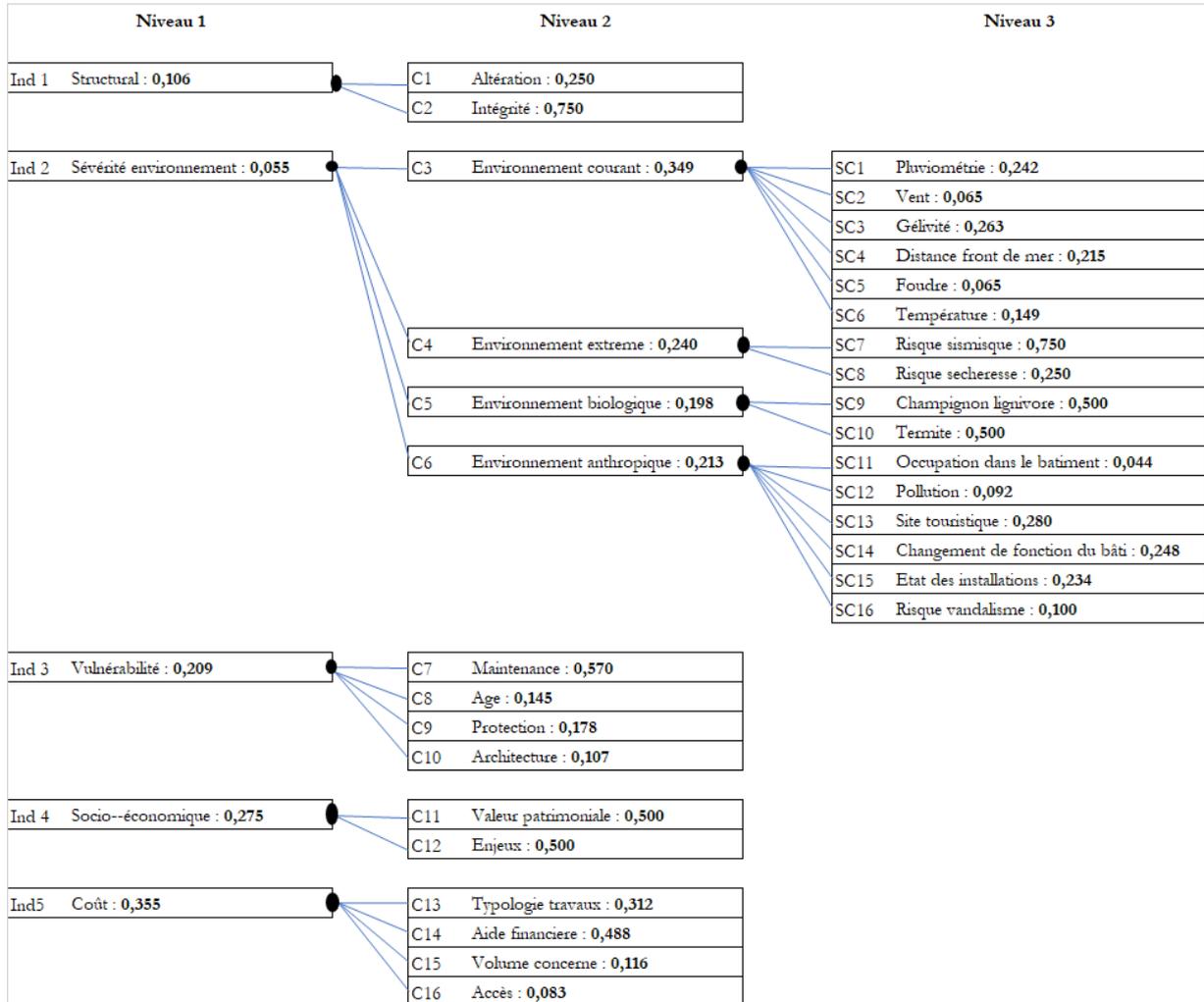


Figure 22 : Présentation des pondérations des critères

3.1.2.2.3 Etape 3 : Vérification des jugements

Pour vérifier les jugements exposés dans la partie précédente, nous avons décidé de valider les pondérations des critères sous la forme d'un sondage à des personnes travaillant dans le domaine du bâti ancien. Des personnes ont été sélectionnées pour représenter l'ensemble des acteurs du patrimoine, néanmoins seulement quatre personnes ont répondu à notre questionnaire.

Nous notons une différence aux niveaux de l'indicateur structural et celui de la sévérité environnementale où leur importance est minorée par le modèle par rapport au résultat du sondage. Au contraire, pour l'indicateur de vulnérabilité son importance est majorée par le modèle. Et les critères C1 et C2 ont à peu près la même pondération pour les résultats du sondage tandis que le modèle donne une importance relative pour le critère d'intégrité C2. Également nous notons quelques divergences autour des critères C11 (utilisation), C12 (enjeux) et C15 (volume concerné) où des différences de pondération sont supérieures à 0,1.

Compte tenu du faible nombre de réponse dans la suite de l'étude nous utiliserons les jugements du modèle. Les résultats sont montrés sur les tableaux et histogrammes ci-dessous.

3.1.2.2.3.1 Résultat concernant les indicateurs

Les résultats concernant les indicateurs sont représentés sur le tableau et l'histogramme ci-dessous.

	Ind1	Ind2	Ind3	Ind4	Ind5
Modèle	0,11	0,05	0,21	0,28	0,36
Sondage	0,22	0,09	0,13	0,25	0,31

Tableau 59 : Comparaison des jugements entre le modèle et le sondage pour les indicateurs

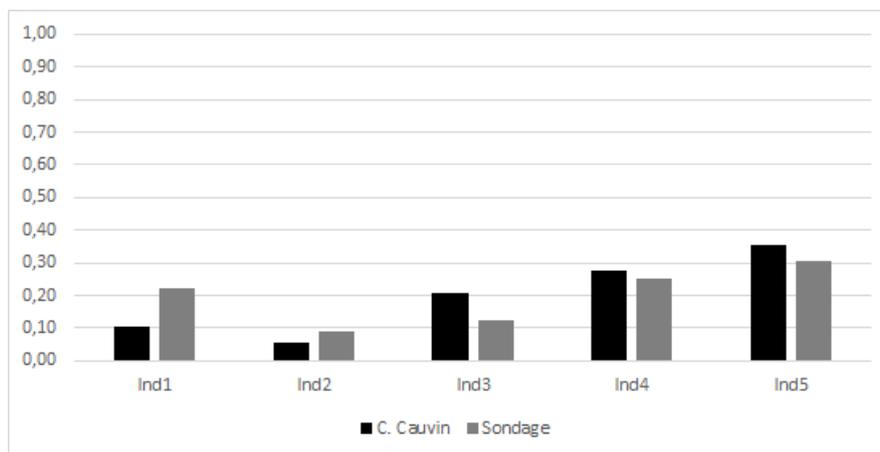


Figure 23 : Comparaison des jugements entre le modèle et le sondage pour les indicateurs

3.1.2.2.3.2 Résultat concernant les critères

Les résultats concernant les critères sont représentés sur le tableau et l'histogramme ci-dessous.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16
Modèle	0,25	0,75	0,35	0,24	0,20	0,21	0,57	0,15	0,18	0,11	0,50	0,50	0,31	0,49	0,12	0,08
Sondage	0,54	0,46	0,31	0,25	0,21	0,22	0,51	0,14	0,26	0,09	0,74	0,26	0,22	0,38	0,23	0,16

Tableau 60 : Comparaison des jugements entre le modèle et le sondage pour les critères

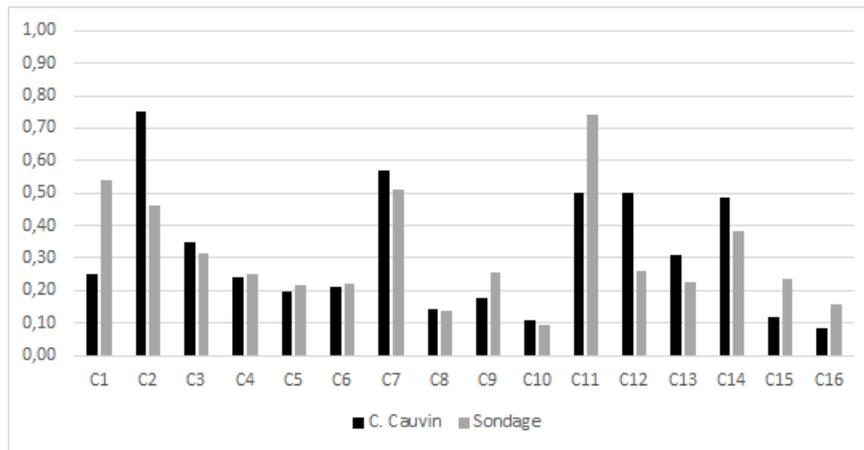


Figure 24 : Comparaison des jugements entre le modèle et le sondage pour les critères

3.1.2.2.3.3 Résultat concernant les sous-critères

Les résultats concernant les sous-critères sont représentés sur le tableau et l'histogramme ci-dessous.

	SC1	SC2	SC3	SC4	SC5	SC6	SC7	SC8	SC9	SC10	SC11	SC12	SC13	SC14	SC15	SC16
Modèle	0,24	0,07	0,26	0,22	0,07	0,15	0,75	0,25	0,50	0,50	0,04	0,09	0,28	0,25	0,23	0,10
Sondage	0,29	0,12	0,18	0,19	0,07	0,16	0,53	0,47	0,50	0,50	0,26	0,06	0,13	0,21	0,16	0,18

Tableau 61 : Comparaison des jugements entre le modèle et le sondage pour les sous-critères

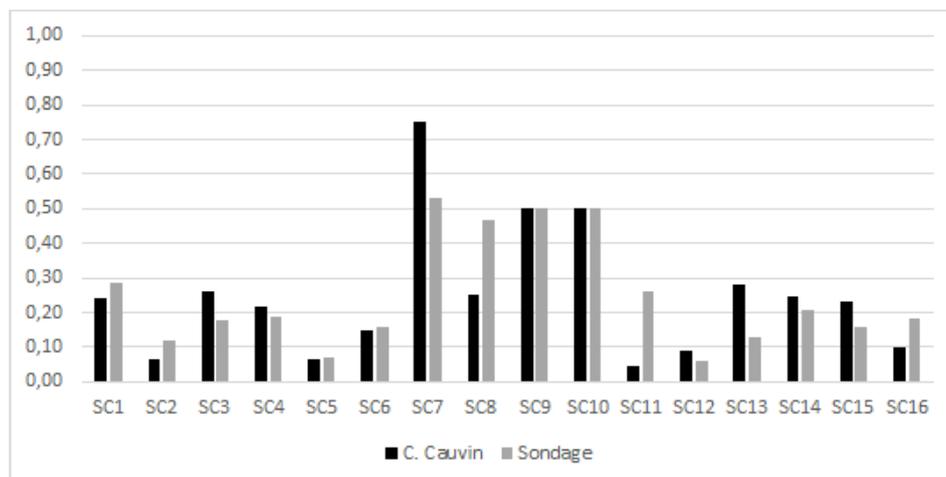


Figure 25 : Comparaison des jugements entre le modèle et le sondage pour les sous-critères

3.1.3 Synthèse de la pondération des critères

Cette section du chapitre présente les critères et leur importance relative. Il se décompose en trois niveaux avec les indicateurs, les critères et les sous-critères. Chacun d'entre eux est caractérisé par une échelle de gravité (proposée dans la section précédente) et par un coefficient de pondération qui peut être adapté en fonction des préférences du maître d'ouvrage. Nous avons utilisé la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) pour déterminer les jugements qui ont été validés à l'aide d'un sondage afin de vérifier que le modèle avait la même tendance que les importances relatives des critères attribuées par les acteurs de la profession.

Cette méthode est simple d'application mais il faut garder à l'esprit les limites suivantes :

- Les critères peuvent se compenser car si les poids sont les mêmes une bonne évaluation sur un critère peut en effet balancer une mauvaise sur un autre ;
- Le mode de calcul des coefficients de pondération s'effectue à partir de préférences subjectives ;
- Plus un critère est situé profondément dans l'arbre moins son influence sur le résultat final sera importante.

Une somme pondérée des évaluations des cinq critères ne permettrait pas de traduire correctement la prise de décision des prioritaires quant à la mise en place des actions de conservation ; c'est la raison pour laquelle nous proposons dans le paragraphe suivant un modèle d'agrégation de ces indicateurs.

3.2 Proposition d'un modèle d'agrégation des indicateurs

Nous proposons l'agrégation des indicateurs selon le logigramme décisionnel de la Figure 26. Dans un premier temps, nous proposons de mettre en place un indicateur de la vitesse d'altération à l'aide de l'indicateur de vulnérabilité et de l'indicateur de sévérité de l'environnement. Dans un deuxième temps, nous utiliserons l'indicateur de vitesse d'altération avec l'indicateur structurelle pour évaluer le risque. Dans un troisième temps, nous modélisons la motivation du maître d'ouvrage et/ou du gestionnaire à l'aide de l'indicateur socio-économique et de l'indicateur de coût. Enfin, la décision du maître d'ouvrage est établie pour programmer les travaux de maintenance.

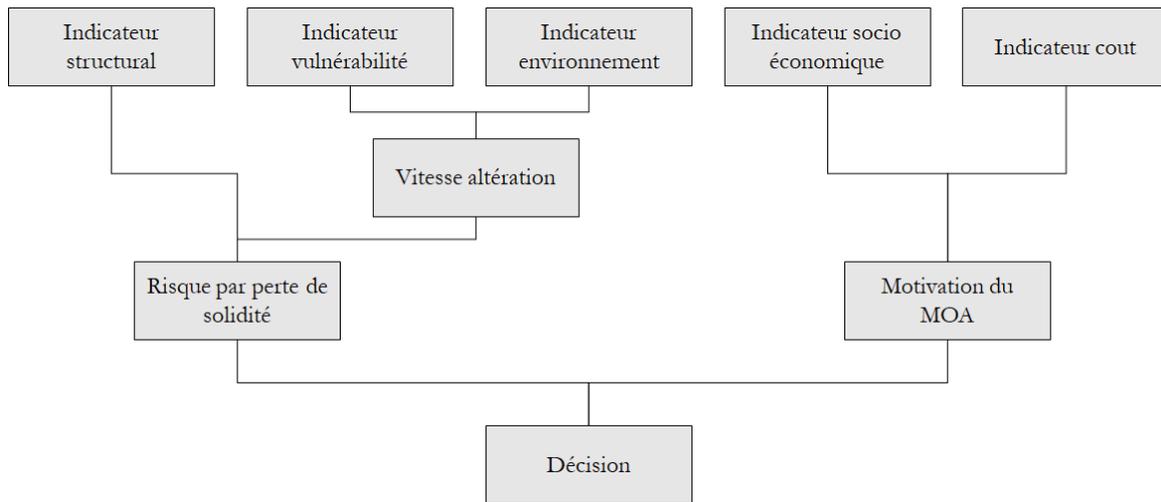


Figure 26 : Logigramme décisionnel pour l'agrégation des résultats

3.2.1 Présentation du modèle

3.2.1.1 Etape 1 : Evaluation la vitesse d'altération

L'évaluation de la vitesse d'altération permet de donner une indication sur la cinétique d'évolution de l'état du patrimoine en fonction de son environnement (qui permet de caractériser l'environnement du bâti) et de sa vulnérabilité. Si le bâtiment est vulnérable et l'environnement est agressif alors la vitesse d'altération sera importante. Le logigramme décisionnel de cette première étape est schématisé à la Figure 27.

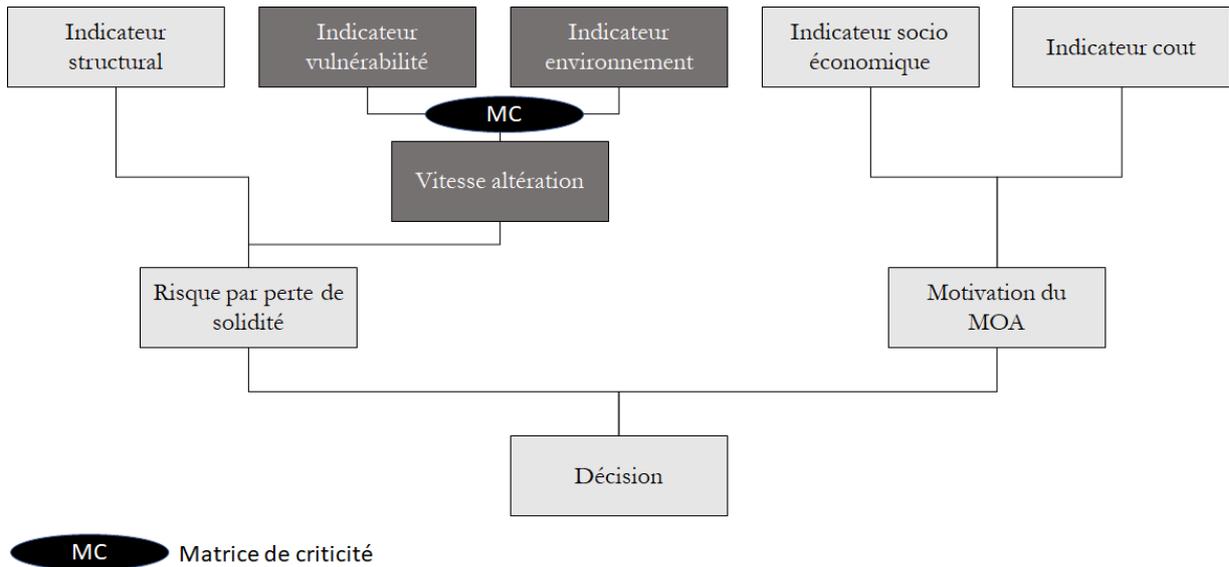


Figure 27 : Logigramme décisionnel pour l'agrégation des résultats – cas de l'évaluation de la vitesse altération

La matrice proposée dans le Tableau 62 permet de déterminer un indicateur de vitesse composé de quatre niveaux (1 nulle, 2 lente, 3 moyenne et 4 rapide).

		Indicateur sévérité de l'environnement (Ind2)			
		Banal (0)	Faible (1)	Assez agressif (2)	Très agressif (3)
Indicateur vulnérabilité (Ind3)	Aucun (0)	1	1	1	1
	Faible (1)	2	2	3	4
	Moyen (2)	3	4	4	4
	Elevé (3)	4	4	4	4

Tableau 62 : Matrice de criticité afin de déterminer un critère lié à la cinétique de dégradation du patrimoine avec (1) rapidité nulle (2) rapidité lente (3) rapidité moyenne et (4) rapidité rapide

3.2.1.2 Etape 2 : Proposition d'une évaluation liée au risque

Suivant la courbe de Farmer de la Figure 28, les risques peuvent être classés en fonction de leur fréquence d'apparition et de leur gravité. Le risque majeur se définit comme la menace d'un événement à fréquence faible ou à faible probabilité et de grande gravité car touchant des enjeux importants. Le risque peut être latent (il n'est pas encore manifeste), apparent (il se manifeste) ou disparu (il ne peut plus se manifester).

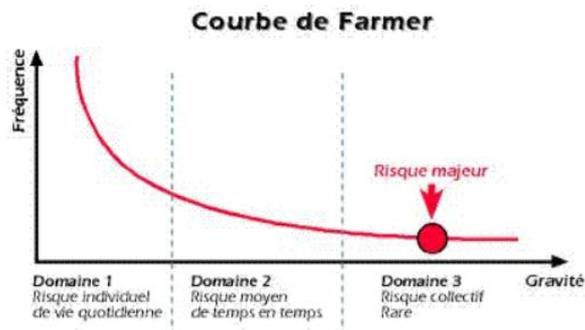


Figure 28 : Courbe de Farmer

Nous présentons l'exemple d'évaluation du risque lié au défaut de solidité de la structure qui peut entraîner dans le cas de la législation française la mise en péril. Pour cela nous proposons une matrice de criticité en utilisant l'indicateur structural et la vitesse d'altération tel que défini à la Figure 29.

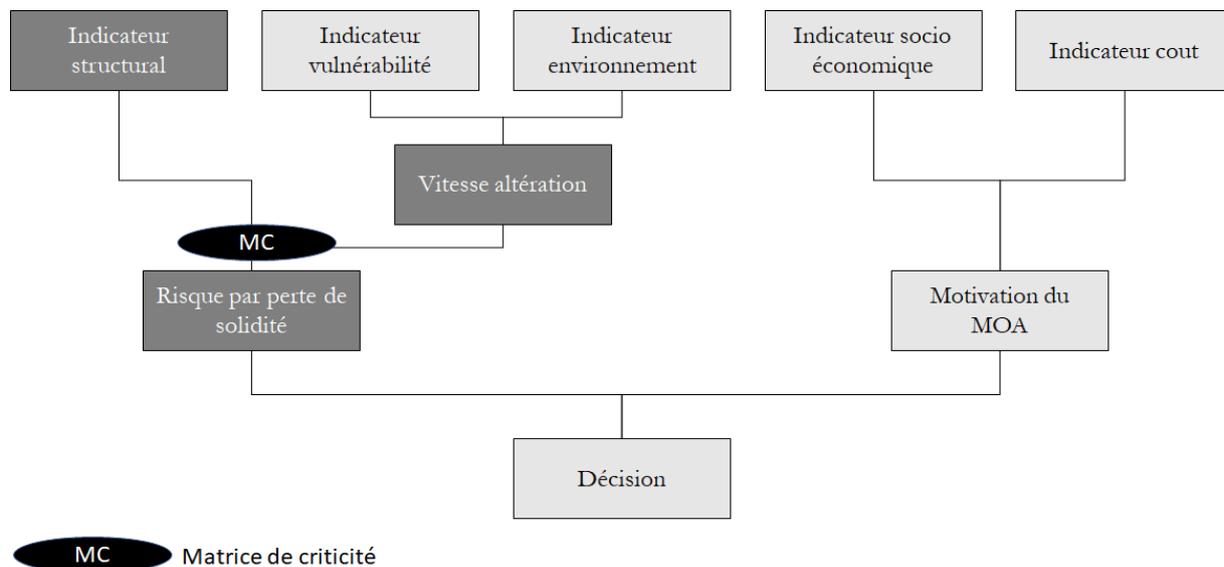


Figure 29 : Logigramme décisionnel pour l'agrégation des résultats – cas de l'évaluation du risque de solidité

Le risque de mise en péril d'un habitat ou d'une structure correspond à un défaut de solidité. Le risque de mise en péril est défini par l'article L511-1 du code de la construction et de l'habitation avec la mise en péril ordinaire ou la mise en péril imminente. Pour définition, la mise en péril ordinaire s'effectue lorsqu'il y a un danger non immédiat, le maire de la commune peut engager une procédure de péril à l'encontre du propriétaire. Tandis que la mise en péril imminente s'effectue lorsqu'il y a un danger grave et/ou imminent, le maire ordonne des mesures provisoires indispensables pour écarter ce péril, dans les conditions prévues à l'article L 511-3. Dans ce cas-là, le tribunal administratif est saisi afin qu'un expert soit chargé dans les 24 heures de constater ou non le péril imminent. À l'issue de ce constat, le rapport conclut soit à l'existence d'un péril imminent, soit à l'existence d'un péril non imminent c'est-à-dire un péril ordinaire.

La matrice proposée, dans le Tableau 63, permet de déterminer le risque de solidité du bâti, décomposé en trois niveaux de gravité (inacceptable, acceptable sous conditions et acceptable).

		Catégorie liée à la vitesse d'altération				Niveaux de risque		Actions requises
		1	2	3	4			
Indicateur structural	0	R1	R1	R1	R1	R3	Inacceptable	Le risque est inacceptable : des mesures immédiates et d'urgence doivent être prises, il correspond à la mise en péril.
	1	R1	R1	R1	R2			
	2	R1	R2	R2	R2			
	3	R2	R2	R2	R3			
						R2	Acceptable sous conditions	Le risque peut être accepté si des actions sont entreprises.
						R1	Acceptable	Le risque peut être accepté cependant l'entretien doit être effectué régulièrement

Tableau 63 : Matrice pour déterminer le risque

3.2.1.3 Etape 3 : Processus décisionnel du maître d'ouvrage et/ou gestionnaire

Les décisions prises, à un moment donné, par le maître d'ouvrage sont déterminantes pour la conservation du patrimoine. Pour aider au processus décisionnel, nous proposons deux matrices : une matrice de criticité pour déterminer la motivation du maître d'ouvrage puis une matrice décisionnelle.

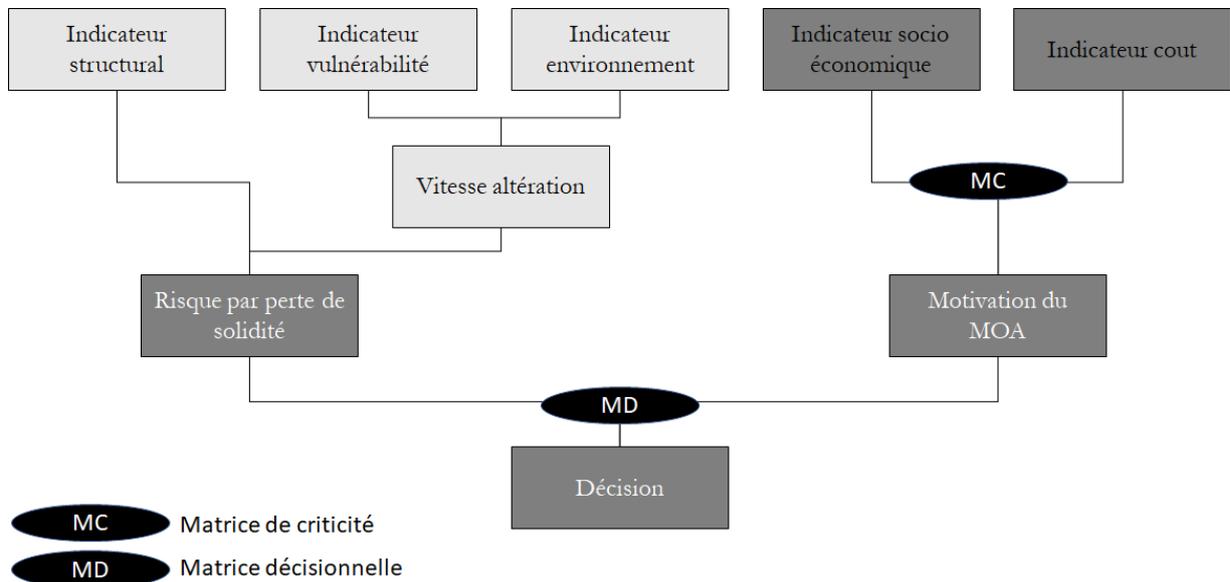


Figure 30 : Mise en place de deux matrices pour aider dans le processus décisionnel

3.2.1.3.1 Evaluation de la motivation

Une matrice d'évaluation de la motivation est proposée à l'aide de l'indicateur de coût ressenti Ind5 et de l'indicateur socio-économique Ind4. Cette matrice propose de déterminer la motivation que le décideur doit avoir. Une échelle à trois niveaux est établie : motivation faible M1, motivation moyenne M2 et motivation forte M3. La matrice de motivation est présentée dans le tableau ci-dessous :

		Ind5 Indicateur de coût			
		0	1	2	3
Ind4 Indicateur socio-	0	M1	M1	M1	M1
	1	M2	M1	M1	M1
	2	M2	M2	M1	M1
	3	M3	M3	M2	M2

Légende :
Niveaux de motivation
M3 Fort
M2 Moyen
M1 Faible

Tableau 64 : Matrice de criticité pour évaluer la motivation dans le processus de décisions

3.2.1.3.2 Modélisation de la décision

Pour la seconde étape, une matrice de décision par le MOA ou le gestionnaire est proposée en prenant en compte la motivation et le risque avec deux sorties : mise en place d'actions ou non. La matrice proposée est dans le Tableau 65.

		Risque		
		R1	R2	R3
Motivation	M1	D0	D0	D1
	M2	D0	D0	D1
	M3	D0	D1	D1

Légende :
 Actions
 D1 Mise en place des actions
 D0 Absence de mise en place d'actions

Tableau 65 : Matrice pour déterminer les actions du décideur

3.2.2 Synthèse du modèle d'agrégation

Cette troisième section présente l'utilisation de l'ensemble des données qui ont été mises en place dans les sections 3.1 et 3.1.2 en proposant un modèle d'agrégation qui se décompose en trois étapes :

- Avec l'évaluation de la vitesse d'altération, à l'aide d'une matrice de criticité utilisant l'indicateur de vulnérabilité et l'indicateur de sévérité de l'environnement ;
- Avec l'évaluation du risque lié à la solidité de la structure du bâti, à l'aide d'une matrice de criticité en utilisant l'évaluation de la vitesse d'altération et l'indicateur structural ;
- Avec l'évaluation de la décision du maître d'ouvrage en prenant en compte l'évaluation du risque et la motivation du propriétaire.

3.3 Détermination de la durée avec des courbes d'altération

En complément du modèle d'agrégation des indicateurs, nous proposons dans ce paragraphe une approche permettant d'intégrer la cinétique de dégradation des bâtis.

Un projet intéressant a été développé par Miyamoto en 1990 [Miyamoto 1991], qui a ensuite été considéré comme une méthode fiable pour prévoir la décroissance, et qui a été appliquée par plusieurs entités publiques et privées.

Dans l'article [Miyamoto 1990] deux typologies de courbes sont tracées, l'une pour la capacité portante et l'autre pour la durabilité de l'ouvrage $S_D(t)$. Les droites de cette dernière sont appelées les courbes d'altérations, pour lequel nous retrouvons le taux d'altération a_d qui prend en compte l'âge de la structure et l'indice d'altération [Tena 2016]. C'est avec ces courbes qu'est estimée la durée de vie.

$$\begin{aligned} S_D(t) &= g(t) = b_d - a_d t^3 \\ a_d &= \frac{d}{p^3} \end{aligned} \quad (18)$$

avec :

S_D : le résultat de la durabilité suite à l'inspection,

$g(t)$: la fonction d'altération en fonction du temps

b_0 : la condition initiale,

a_d : la constante d'altération,

p : âge du bâti,

d : l'indice d'altération.

Nous proposons d'utiliser le taux d'altération afin d'obtenir la prévision en années de la durée de vie restante lorsque le critère d'altération atteindra 3. Pour cela nous faisons l'hypothèse que l'état initial correspondait à l'âge initial du bâti.

3.4 Proposition d'une démarche de détermination des actions de maintenance

En complément du modèle et des courbes d'altération, une base de données des actions de maintenance possibles en fonction du critère d'altération (cf. 3.1.1.1.1) a été proposée.

3.4.1 Hiérarchisation des actions possibles

3.4.1.1 Mise en place de la catégorie « mesures possibles »

Lors de l'application de la démarche de la gestion préventive, chaque désordre est associé à la catégorie d'état k_n et à celle d'urgence $k_{a,n}$ pour le calcul du critère d'altération S_w . Nous proposons d'associer une catégorie intitulée mesures possibles $k_{b,n}$ correspondant à la norme [Afnor 2012]. Quatre mesures sont proposées dans le Tableau 66.

Mesures possibles $k_{b,n}$	
0	Aucune intervention
1	Entretien / Mesures de prévention
2	Réparation modérée et/ou investigation complémentaire
3	Intervention majeure basée sur un diagnostic

Tableau 66 : Quatre niveaux de mesures possibles

Les mesures possibles $k_{b,n}$ ne sont pas automatiquement appliquées en fonction du désordre et de l'urgence ; c'est l'ingénieur expert qui associe les mesures.

3.4.1.2 Hiérarchisation des mesures proposées

Suite à la détermination de la catégorie $k_{b,n}$ pour chaque typologie d'altération et de mesures d'urgence associées, nous proposons un classement en utilisant le produit H de la catégorie liée à l'urgence $k_{a,n}$ et celle liée aux mesures $k_{b,n}$.

$$H = k_{b,n} \cdot k_{a,n} \quad (19)$$

avec :

H : le produit, exprimant la hiérarchisation des actions ; plus sa valeur est élevée plus il sera placé en haut du classement pour mettre en place les actions ;

$k_{b,n}$: la pondération de l'anomalie n en fonction des mesures associées, entre 0 (aucune intervention) et 3 (intervention majeure) [Afnor 2012] ;

$k_{a,n}$: la pondération de l'anomalie n en fonction de son niveau d'urgence, entre 0 (a long terme) et 3 (urgent et immédiat) [Afnor 2012].

3.4.2 Base de données des actions de maintenance

Une base de données des actions de maintenance a été mise en place. Elle se caractérise par les sous-familles d'altération (39 sous familles) par le corps d'état impacté (couverture, charpente, équipements, intérieur et enveloppe extérieur) et par le critère d'altération du corps d'état du bâti. C'est-à-dire pour chaque sous-famille d'altération il y a quatre niveaux de mesures possibles qui sont détaillés. L'ensemble est proposé dans l'Annexe 9 : .

Par exemple lorsqu'une couverture présente de la mousse (sous famille B2 de la famille des colonisations biologiques du Tableau 76), quatre mesures sont possibles et sont détaillées dans le **Erreur ! Source du r envoi introuvable.** L'attribution du niveau de mesure à effectuer sera fonction du critère d'altération.

Niveaux de mesures possibles	Famille : colonisation biologique (B) Mousses et petites plantes (B2)
Aucune intervention	Ne rien faire.
Entretien / Mesures de prévention	Surveillance des matériaux et retirer si possible les mousses et petites plantes.
Réparation modérée et/ou investigation complémentaire	Retirer les colonisations biologiques et traitement à l'aide d'un produit adapté. Faire attention de ne pas abîmer les matériaux de couverture.
Intervention majeure basée sur un diagnostic	Remplacement des matériaux composant la toiture.

Tableau 67 : Détail des mesures possibles pour la sous-famille B2

Synthèse du troisième chapitre

Ce chapitre permet de présenter le modèle d'agrégation proposé dans ce travail. Il est décomposé en trois étapes :

- Etape 1 : la mise en place d'indicateurs (Ind1 à Ind5), des critères (C1 à C16) et de sous critères (SC1 à SC16). L'ensemble permet d'avoir 37 critères évalués sur une échelle à quatre niveaux. Ces évaluations sont soit déterminées à l'aide de données accessibles via des sites gouvernementaux soit à l'aide de la démarche de gestion préventive. Suite à la mise en place de ces 37 critères, nous avons déterminé leurs pondérations afin de traduire leur importance relative ;
- Etape 2 : la proposition d'un modèle d'agrégation permettant d'utiliser l'ensemble des indicateurs. Elle se compose de matrice de criticité pour évaluer la vitesse d'altération, le risque de perte de solidité et la motivation du propriétaire. Une matrice de décision permet ensuite de traduire la décision du maître d'ouvrage ;
- Etape 3 : la proposition d'une démarche de détermination des actions de maintenance et une base de données de ces actions.

L'application de ce modèle d'agrégation est présentée au chapitre suivant.

Chapitre 4 : Présentation du corpus et application de la méthodologie de gestion au patrimoine culturel et historique

Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté les modèles d'agrégations comprenant les 37 critères répartis en trois niveaux. Pour pouvoir appliquer ces modèles, la démarche de gestion préventive décrite dans le deuxième chapitre doit être mise en œuvre. Ce chapitre vise à appliquer la démarche de gestion préventive (anamnèse, diagnostic, thérapie et contrôle) et également la méthodologie HeritageCare.

Ce quatrième chapitre s'articule autour de :

- La présentation du patrimoine culturel et historique sélectionné ;
- L'application de la démarche de gestion préventive en appliquant la méthodologie HeritageCare et en déterminant les critères d'altération.

La figure suivante présente en rouge le contenu de ce chapitre par rapport à la globalité des travaux de thèse.

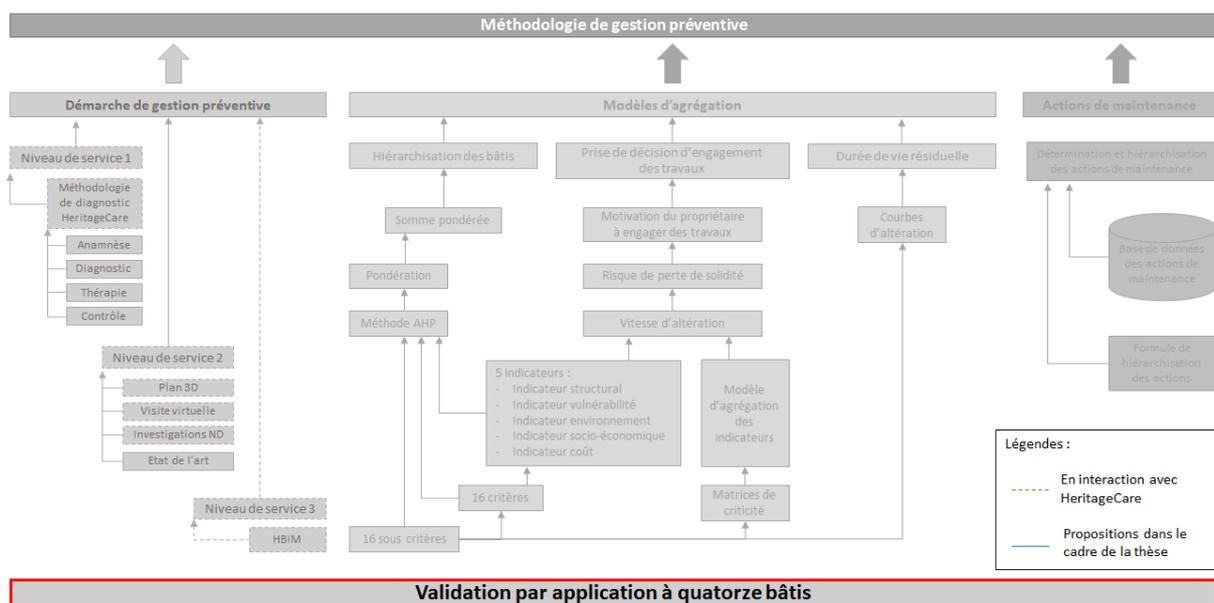


Figure 31 : Contenu de la thèse présenté dans ce chapitre 4

4.1 Présentation générale des bâtis du corpus

4.1.1 Choix du corpus

Le patrimoine que nous avons sélectionné est utilisé dans le cadre du projet HeritageCare. Ce qui nous a contraint à ce que les bâtis soient dans l'espace SUDOE (régions Auvergne-Rhône Alpes, Nouvelle Aquitaine et l'Occitanie). En effet, le projet fait partie du programme Intereg SUDOE qui soutient le développement régional dans le Sud-ouest de l'Europe en finançant des projets transnationaux par le biais du FEDER (Fonds Européen de Développement Régional). Le corpus choisi présente la diversité du patrimoine culturel et/ou historique : du point de vue architectural (architecture religieuse, architecture funéraire, architecture de l'administration ou de la vie publique, architecture militaire, architecture domestique, architecture agricole, architecture industrielle, génie civil et architecture de jardin), du point de vue ancienneté (du haut moyen-âge jusqu'au début du XXème siècle), niveau de protection (sans protection, inscrit, classé), type de propriétaires (publics, privés) et de la constitution (pierre, bois, enduit, béton). Pour la visibilité du projet, nous avons sélectionné un édifice emblématique, le château de Murol, situé dans la région Auvergne-Rhône-Alpes.

Les deux graphes de la Figure 32 représente la diversité du patrimoine choisi en termes de typologie d'architecture (architecture religieuse, funéraire, domestique, industrielle, de jardin et militaire) et en termes d'ancienneté (débutant de la période du Haut-Moyen-Age et finissant au XIXème siècles).

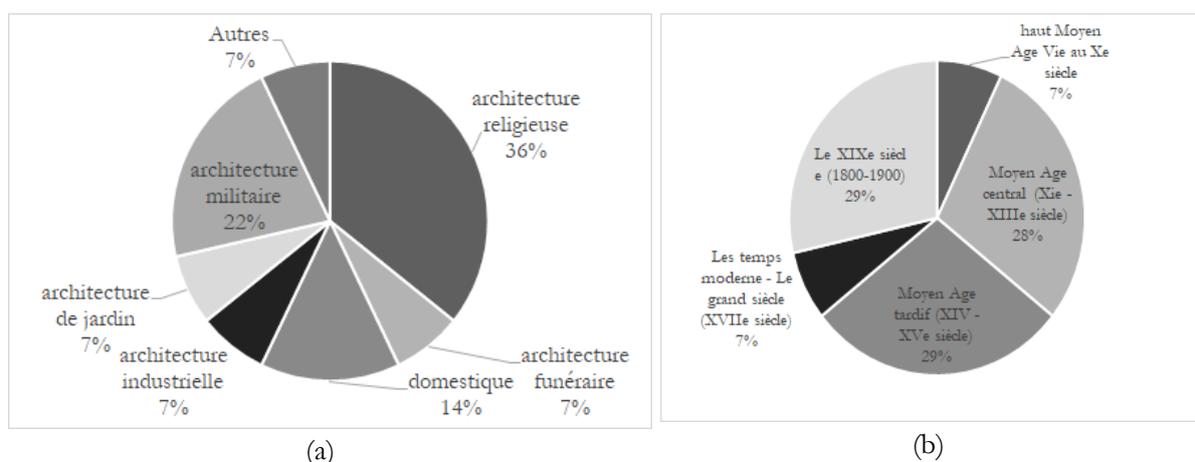


Figure 32 : Diversité de la typologie d'architecture (a) et d'ancienneté (b)

La liste du patrimoine culturel et historique du corpus de la thèse se situe dans le Tableau 68, qui récapitule leur : localisation (ville et département), typologie architecturale (AF architecture funéraire, AM architecture militaire, AD architecture domestique, AR architecture religieuse, AI architecture industrielle, AJ architecture de jardin), type de protection, date de début de construction (HMA Haut Moyen Age, Moyen Age central, MAT Moyen Age tardif, TP17 les Temps modernes XVIIème siècle, TP18 Les Temps modernes XVIIIème siècle et le XIXème siècle).

N°	Nom	Arch.	Prot.	Date	N°	Nom	Arch.	Prot.	date
A	Chapelle funéraire Chambon-sur-Lac (63)	AF	X	HMA	H	Abbaye Saint-Pierre Mozac – (63)	AR	X	MAT
B	Ruines du château fort Murol (63)	AM	X	MAC	I	Notre Dame de Foncourrieu Marcillac-Vallon (12)	AR	X	MAC
C	Porte d'Occident Charroux (03)	AM	X	MAC	J	Église Saint-Blaise et Notre- Dame-des-Malades- Vichy (03)	AR	X	TP17
D	Château de Montrognon Ceyrat (63)	AM	-	MAC	K	Chapelle de l'Hôpital Clermont-Ferrand (63)	AR	X	TP18
E	Ancien prieuré Colombiers (03)	AD	X	MAT	L	Marché Saint-Joseph Clermont-Ferrand (63)	AI	X	19
F	Ancienne église Sainte Marie- Sarlatt (24)	AR	X	MAT	M	Villa Russe Saint Nectaire (63)	AD	X	19
G	Tour de l'horloge Saint-Pouçain-sur-Sioule (03)	AR	X	MAT	N	Kiosque du parc des Bourins Vichy (03)	AJ	X	19

Tableau 68 : Liste des bâtis du corpus

Les quatorze bâtis retenus sont localisés sur la carte suivante.

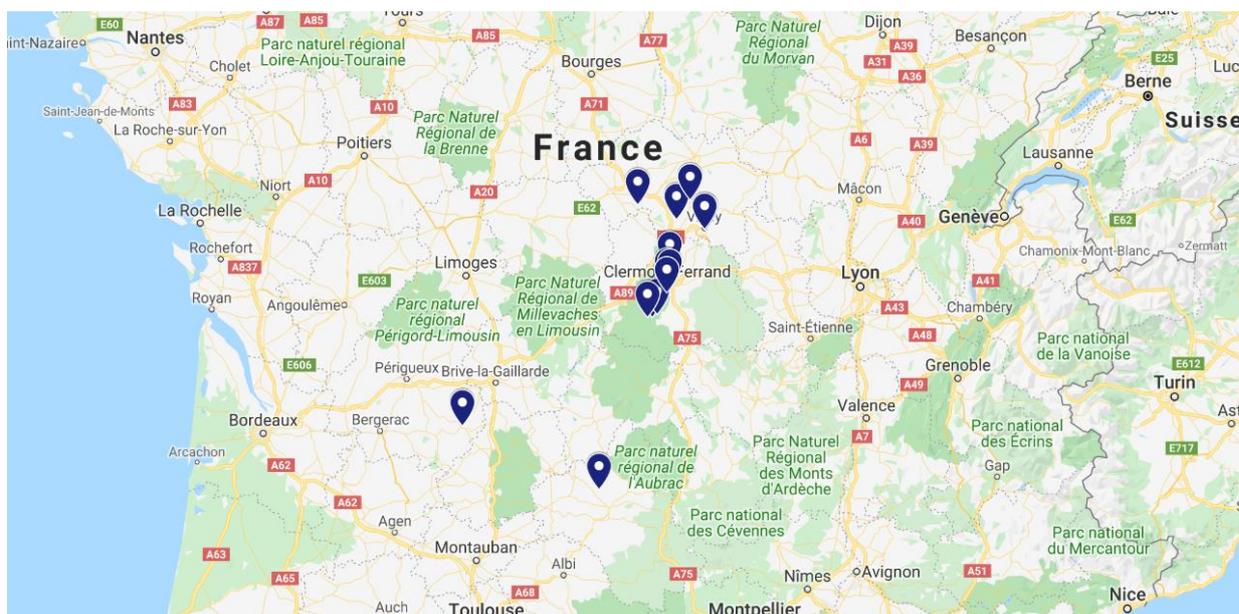


Figure 33 : Localisation des quatorze bâtis– Carte GoogleMap

4.1.2 Présentation générale et gestion d'aujourd'hui

4.1.2.1 Bâti A : Chapelle funéraire de Chambon sur Lac

La chapelle funéraire de Chambon-sur-Lac, propriété de la ville, est une chapelle située dans le cimetière de Chambon-sur-Lac dans le département du Puy-de-Dôme.

La chapelle date du X^{ème} siècle et fait l'objet d'un classement au titre des monuments historiques par la liste de 1862 [Merimee A] sous le numéro PA00091940. Les caractéristiques architecturales de la chapelle sont :

- Sa toiture est constituée principalement de lauzes ;
- Ses murs sont en pierre de taille constitués de roche sédimentaires, avec des décors de style auvergnat sur le fronton de la façade principale (exemple : mosaïque de pierres) [Souney 2006] ;
- Sa structure est constituée d'une rotonde précédée d'une travée orientée à l'ouest.

Lors de la visite dans le cadre de la gestion préventive, elle était en accès libre et aujourd'hui elle a un rôle essentiellement touristique.

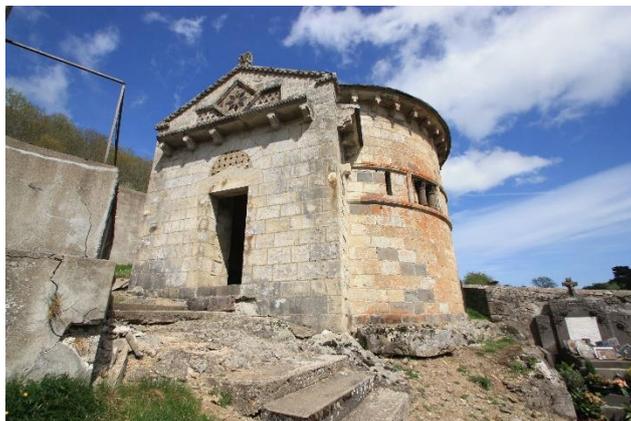


Figure 34 : Vue générale du bâti A

4.1.2.2 Bâti B : Château de Murol

Le château de Murol est situé à Murol dans le département du Puy-de-Dôme. Sa maîtrise d'ouvrage est la ville de Murol, sa gestion est effectuée par une société qui a pour but de gérer et de développer l'attraction touristique. Il est aujourd'hui un monument touristique pour faire découvrir la vie du moyen-âge et il est bien connu pour ses spectacles.

Le château de Murol fut édifié à partir du XIII^{ème} siècle et fait l'objet d'un classement au titre des monuments historiques par la liste de 1889 [Merimee B] sous le numéro PA00092213. Voici quelques caractéristiques architecturales du château :

- Il est situé sur un promontoire basaltique (dominant le village) et donc il est situé en altitude ;
- Il est composé de plusieurs structures datant d'époques différentes et plus ou moins en état de ruine pour certaines : d'une enceinte extérieure (composés de bastions), d'une enceinte intérieure constituée de la salle de garde, du pavillon renaissance et des chapelles ;
- Ses élévations sont composées de pierres de nature magmatique de type roche de Volvic, sa toiture (lorsqu'elle est présente) est constituée de lauzes ;
- De nombreux travaux de restauration ont été effectués depuis sa protection.

Lors de la visite dans le cadre de la gestion préventive, nous avons été accompagnés par monsieur le maire et par les services de la ville.



Figure 35 : Vue générale du bâti B

4.1.2.3 Bâti C : Porte d'Occident

La Porte d'Occident est située à Charroux dans le département de l'Allier et la région Auvergne-Rhône-Alpes. Sa maîtrise d'ouvrage est la ville de Charroux, sa gestion est effectuée directement par la ville. La porte fut édifiée à partir du XIII^{ème} siècle et inscrite au titre des monuments historiques depuis 1929 sous le numéro PA00093047 [Merimee E C].

Voici quelques caractéristiques architecturales de la Porte d'Occident :

- Elle correspond à une ancienne entrée de la ville qui était entourée de murailles ;
- Elle est composée d'une structure verticale rectangulaire en maçonnerie de roche sédimentaire, des structures horizontales en bois (plancher et charpente) et d'une couverture en tuile plate en terre cuite.

Lors de la visite dans le cadre de la gestion préventive, l'accès nous a été donné par les services de la ville.



Figure 36 : Vue générale du bâti C

4.1.2.4 Bâti D : Château de Montrognon

La ruine du château de Montrognon est située à Ceyrat dans le département du Puy-de-Dôme. Sa maîtrise d'ouvrage est la ville de Ceyrat, sa gestion est effectuée directement par la ville.

Le château médiéval fut édifié à partir du XII^{ème} siècle sur un puy volcanique où le sommet est actuellement boisé et il ne présente pas de protections particulières. Ses particularités architecturales sont que maintenant le château est composé seulement d'une tour en pierre de type roche magmatique, il a été partiellement détruit à partir du XVI^{ème} siècles.

Lors de la visite dans le cadre de la gestion préventive, nous n'avons pas eu besoin d'accès particulier puisque le bâti est en accès libre.



Figure 37 : Vue générale du bâti D

4.1.2.5 Bâti E : Ancien prieuré

L'ancien prieuré est accolé à l'église Saint Pierre et Saint Patrocle de la commune de Colombier située dans le département de l'Allier. Sa maîtrise d'ouvrage est effectuée par des propriétaires privés et aujourd'hui elle est utilisée en tant que maison secondaire.

La structure actuelle de l'ancien prieuré date du XV^{ème} siècle. Elle fait l'objet d'une protection au titre des monuments historiques depuis 1943 sous le numéro PA00093067 [Merimee F]. Ses caractéristiques architecturales sont que :

- Le prieuré est composé de trois corps de bâtis accolés ;
- Les structures sont composées de maçonnerie (pierre de taille pour les encadrements et moellons pour le remplissage) et de structure horizontale en bois (plancher et charpente). A partir des observations réalisées in-situ, les discussions avec la propriétaire et les recherches des carrières effectuées aux alentours, nous en avons déduits que les pierres utilisées sont principalement de la roche volcanique (granit) et de la roche sédimentaire (grès bourbonnais).

L'accès nous a été donné par la propriétaire dans le cadre de la visite.



Figure 38 : Vue générale du bâti E – façade donnant sur le jardin

4.1.2.6 Bâti F : Ancienne église Sainte-Marie

L'ancienne église Sainte-Marie est située dans la commune de Sarlat du département de la Dordogne. Sa maîtrise d'ouvrage est la commune. Sa gestion est effectuée directement par les services techniques de la ville et aujourd'hui elle est utilisée en tant que marché couvert et lieux d'activités touristiques (avec l'ascenseur panoramique installé dans la tour en 2000).

Elle fut édifiée entre 1366 et 1507 et elle fait l'objet d'un classement au titre des monuments historiques depuis 1905 sous le numéro PA00082930 [Merimee F]. Ses caractéristiques architecturales sont :

- Qu'elle a connu des cycles de constructions et de reconstructions, aujourd'hui elle n'a plus son rôle initial d'église, elle n'a plus son chœur mais elle est constituée principalement de la nef ;
- Qu'elle est constituée de parois verticales en maçonnerie, d'une toiture en lauze (pierre calcaire), de voûte en pierre, de mur en colombage (mur donnant sur l'ancien cœur) et d'une charpente en bois. Avec les observations faites in-situ, les discussions avec le propriétaire et les recherches des carrières effectuées aux alentours, nous en avons déduits que la pierre utilisée est la pierre de Eyzies.

Lors de la visite dans le cadre de la gestion préventive, nous avons été accompagnés par les services de la ville afin d'accéder à l'intérieur du clocher et dans la charpente.

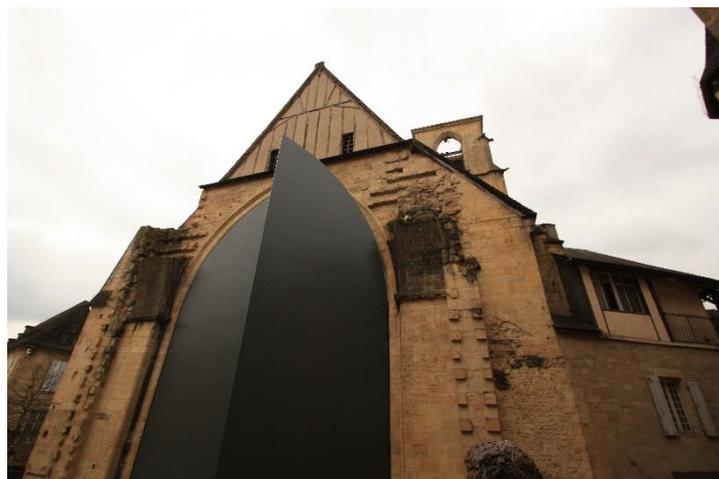


Figure 39 : Vue générale du bâti F – Porte donnant sur l'ancien cœur

4.1.2.7 Bâti G : Tour de l'horloge

La tour de l'horloge, ancien beffroi, est située à Saint-Pourçain-sur-Sioule dans le département de l'Allier. Sa maîtrise d'ouvrage est la ville de Saint-Pourçain sur Sioule, sa gestion est effectuée directement par les services techniques de la ville, elle n'a pas de fonction particulière.

La tour existait en 1456 et l'horloge a été installée en 1487, elle fait l'objet d'une inscription au titre des monuments historiques par arrêté en 1986 sous le numéro PA00093287 [Merimee G]. L'édifice est un ouvrage constitué de maçonnerie pour ses élévations, de bois pour sa charpente et elle est revêtue d'ardoise pour sa toiture. La maçonnerie utilisée est sous forme de moellons issues de roches sédimentaire et magmatique, les encadrements sont constitués de pierre de taille en roche sédimentaire.

Lors de la visite dans le cadre de la gestion préventive, nous avons été accompagnés par les services de la ville afin d'accéder à l'intérieur du clocher et dans la charpente.



Figure 40 : Vue générale du bâti G

4.1.2.8 Bâti H : Abbaye Saint Pierre

L'abbaye Saint Pierre est une abbaye située à Mozac dans le département du Puy de Dôme. Sa maîtrise d'ouvrage est la ville de Mozac, sa gestion est effectuée directement par les services techniques ville et/ou le personnel de l'église, elle n'a pas de fonction autre que religieuse.

L'actuelle église date du milieu du XIIème siècle et a été remaniée au XVème, elle fait l'objet d'un classement au titre des monuments historiques depuis 2016 sous le numéro PA00092209 [Merimee H]. Ses caractéristiques architecturales sont :

- Qu'elle est symbolique de l'art roman auvergnat avec ses chapiteaux du XIIème siècle ;
- Que ses structures verticales sont composées essentiellement de maçonnerie, certaines parties sont ou étaient revêtues d'un enduit, ses structures horizontales sont composées de bois et ou de pierre, son beffroi est en bois ;
- Que l'enduit est probablement composé de plâtre puisque dans le cadre de la gestion préventive des analyses de sels ont été effectués (à l'aide d'un papier pH et de bandelettes de détection du sulfate) dans la mesure où des efflorescences étaient visibles sur l'enduit en partie basse des murs. Les résultats ont montré que le pH des efflorescences était neutre ce qui écarte des sels de types alcalins, et que les sels sont constitués de sulfate. L'hypothèse est liée à la présence de remontées capillaires comme le confirme la présence de franges d'humidité qui peut conduire à la cristallisation

de sels composés de sulfate. Cette hypothèse serait à valider avec des prélèvements et des analyses chimiques en laboratoire ;

- La présence d'un grand nombre de décors peints ;
- Que certaines parties sont de style gothique en raison de la reconstruction partielle consécutive à un tremblement de terre.

Lors de la visite dans le cadre de la gestion préventive, nous avons été accompagnés par les services de la ville afin d'accéder à l'intérieur du clocher, dans la charpente (mais elle restait inaccessible), et son beffroi. Aujourd'hui, le rez de chaussée, est en accès libre suivant les horaires d'ouverture et/de fermeture de l'église.



Figure 41 : Vue générale du bâti H

4.1.2.9 Bâti I : Notre Dame de Foncourrieu

La chapelle de Notre Dame de Foncourrieu est située à Marcillac Vallon dans le département de l'Aveyron. Sa maîtrise d'ouvrage est la ville de Marcillac Vallon, sa gestion est effectuée directement par les services techniques de la ville et/ou son association, elle n'a pas de fonction autre que religieuse.

La chapelle, édifice de pèlerinage, fut édifiée à partir du XIVème siècle, et fait l'objet d'une inscription au titre des monuments historiques par arrêté en 1988 sous le numéro PA00094053 [Merimee I]. Ses caractéristiques architecturales sont :

- Son chœur roman (ancienne chapelle transformée) prolongé par une nef ;
- Le riche décor peint de la voûte de la nef, la voûte du chœur, les voûtes lambrissées ;
- Ses structures verticales sont composées essentiellement de maçonnerie, certaines parties sont ou étaient revêtues d'un enduit, ses structures horizontales sont composées de bois et ou de pierre, son beffroi est en bois. Avec les observations réalisées in-situ, les discussions faites avec le propriétaire et les recherches des carrières effectuées aux alentours, nous en avons déduits que la pierre utilisée est une roche sédimentaire de type grès rouge provenant d'une carrière fermée proche du site. En effet, une carrière fournissant du grès rose est située à moins de cent kilomètres sur la commune de Najac.

Lors de la visite dans le cadre de la gestion préventive, nous avons été accompagnés par un membre de son association, la couverture et la charpente étaient en restauration. La chapelle est uniquement ouverte lors des journées du patrimoine et les journées de pèlerinage et/ou de journées religieuses.



Figure 42 : Vue générale du bâti I

4.1.2.10 Bâti J : Eglise Saint-Blaise et Notre Dame des Malades

L'Eglise Saint-Blaise et l'Eglise Notre Dame des Malades sont deux églises concomitantes. Elles sont situées dans le département de l'Allier. Sa maîtrise d'ouvrage est la ville de Vichy, sa gestion est effectuée directement par les services techniques de la ville. Elles n'ont pas de fonction autres que religieuse mais l'église Notre Dame des Malades est un monument touristique du fait de ses particularités architecturales art déco.

L'église Saint-Blaise est re-construite au XIIème siècle et l'Eglise Notre-Dame-des-Malades est construite entre 1925 et 1931. Elles font l'objet d'une inscription au titre des monuments historiques par arrêté en 1991 sous le numéro PA00093413 [Merimee J]. Les particularités architecturales sont :

- Les deux églises sont accolées, elles communiquent par un déambulatoire ;
- L'Eglise Saint-Blaise est constituée de maçonnerie (roche sédimentaire) pour ses élévations ;
- L'Eglise Notre Dame est constituée de bétons armés et elle est surmontée d'une coupole revêtue de cuivre qui couvre sa nef circulaire. Son décor intérieur, de style art déco, est de matériaux tels que la mosaïque, la marqueterie de bois.

Lors de la visite pour la gestion préventive, nous n'avons pas été accompagnés et donc nous n'avons pas pu accéder à la charpente, ni visualiser de près les toitures. Les deux églises sont accessibles avec les horaires d'ouverture et/de fermeture de l'église.



Figure 43 : Vue générale du bâti J

4.1.2.11 Bâti K : Chapelle de l'hôpital

La chapelle de l'ancien hôpital est située à Clermont-Ferrand dans le département du Puy-de-Dôme. Sa maîtrise d'ouvrage est la ville de Clermont-Ferrand, sa gestion est effectuée directement par les services techniques de la ville. Elle n'a plus de fonction religieuse, elle est utilisée pour des expositions temporaires par la ville.

La chapelle fut édifée à partir de 1657 et elle fait l'objet d'une inscription au titre des monuments historiques par arrêté en 1986 sous le numéro PA00091997 [Merimee K]. Ses caractéristiques architecturales sont :

- Qu'elle occupait l'emplacement d'un hôpital existant auparavant. L'hôpital se présentait comme un ensemble de bâtiments aux dimensions et âges variés, entourant une vaste cour plantée d'arbres ;
- Que ses élévations sont constituées de pierre de taille en roche magmatique (pierre de Volvic) pour sa façade principale, les autres façades sont revêtues d'un enduit composé de plâtre, sa toiture est constituée de pierre de lave ;
- Qu'elle témoigne de l'architecture néo-classique, elle a été édifée sur un plan en croix grecque dont les quatre ailes sont orientées aux quatre points cardinaux. Chacune des quatre parties a reçu une entrée indépendante. La façade principale présente un péristyle ionique. A la jonction des quatre bras de la croix s'élève une coupole sur tambour carré. A l'intérieur, le sommet des murs s'orne d'une mouluration néo-classique ; les quatre pendentifs portent des traces de peinture murale représentant les quatre Evangélistes.

Lors de la visite pour la gestion préventive, nous avons été accompagnés par les services de la ville afin d'accéder à l'intérieur de la chapelle, il n'existe pas d'accès à la charpente. Actuellement elle est ouverte les après-midis dans le cadre des expositions temporaires programmées par la ville.



Figure 44 : Vue générale du bâti K

4.1.2.12 Bâti L : Marché Saint Joseph

Le marché Saint Joseph est situé à Clermont-Ferrand, dans le département du Puy de Dôme. Sa maîtrise d'ouvrage est la ville de Clermont Ferrand, sa gestion est effectuée directement par les services techniques de la ville. Il est toujours utilisé en tant que marché couvert.

Ce marché a été construit en 1891- 1892 par l'atelier de serrurerie André Michelin, un des frères fondateurs de l'usine Michelin et fait l'objet d'une inscription au titre des monuments historiques par arrêté en 2002 sous le numéro PA63000045 [Merimee L]. Ses caractéristiques architecturales sont :

- Qu'il est de style « Baltard », architecture de verre et de fer, de plan carré avec un lanterneau central (sans transformation majeure) ;
- Que ses élévations sont constituées d'un soubassement en roche magmatique, de briques et parois vitrées, et sa charpente est constituée de métal. La roche magmatique utilisée est de la pierre de Volvic.

Lors de la visite dans le cadre de la gestion préventive, nous avons été accompagnés par les services de la ville afin d'accéder à l'intérieur du marché et à son sous-sol. Actuellement le marché Saint-Joseph, est ouvert uniquement une fois par semaine.



Figure 45 : Vue générale du bâti L

4.1.2.13 Bâti M : Villa Russe

La Villa Russe est une maison située à Saint-Nectaire dans le département du Puy-de-Dôme. Sa maîtrise d'ouvrage est effectuée par des propriétaires privés et aujourd'hui elle est utilisée en tant que maison principale. La Villa Russe fut édifiée en 1890 par Jean Giraudon et fait l'objet d'une protection au titre des monuments historiques depuis 2004 sous le numéro PA63000073 [Merimee M].

Ses particularités architecturales sont :

- Que sa toiture, débordante sur ferme en bois, est composée d'ardoises et de bulbes polychromés sur sa partie basse ;
- Que ses menuiseries extérieures sont peintes ;
- Que ses élévations sont constituées de pierre de taille en roche sédimentaire provenant d'une carrière, actuellement fermée, de la commune de Farges proche de Saint-Nectaire ;
- La présence de polychromies sur l'ensemble des façades ;
- Sa proximité avec le flanc de la roche.

Lors de la visite dans le cadre de la gestion préventive, son accès a été donné par les propriétaires.



Figure 46 : Vue générale de la façade principale du bâti M

4.1.2.14 Bâti N : Kiosque

Le kiosque est situé dans le parc des Bourins de Vichy dans le département de l'Allier. Sa maîtrise d'ouvrage est la ville de Vichy, sa gestion est effectuée directement par les services techniques de la ville.

Il fut construit en 1900 par Napoléon III lorsqu'il décida de faire de Vichy une ville parc composée de promenade et de jardin et il fait l'objet d'une inscription au titre des monuments historiques par arrêté en 1986 sous le numéro PA00093345 [Merimee N]. Ses caractéristiques architecturales sont :

- Qu'il présente une architecture dite de fête vu qu'il dispose d'une estrade permettant d'accueillir les orchestres ;
- Que sa base est constituée de maçonnerie enfermant le plancher, des colonnettes supportent la structure en métal de la toiture, la couverture se compose d'un dôme aplati recouvert de plaques de zinc nervurées.

Lors de la visite dans le cadre de la gestion préventive, nous n'avons pas été accompagnés et donc nous n'avons pas pu accéder à la structure interne. Le kiosque est en accès libre.



Figure 47 : Vue générale du bâti N

4.1.3 Synthèse

L'application de la démarche de gestion préventive s'est effectuée sur un corpus de quatorze bâtis hétéroclites avec différentes typologies d'architecture (religieuse, militaire, jardin et etc.), différentes typologies de gestionnaire, différentes structures et différentes localisations. Nous avons tenté d'effectuer un classement en fonction de leur époque de construction en considérant le bâti le plus ancien qui serait le bâti A (datant du Xème siècle) et le plus récent qui serait le bâti N (datant du XIXème siècle).

L'ensemble des informations mentionnées ci-dessus sont résumées dans le tableau ci-dessous :

N°	Nom	Propriétaire	Département	Architecture	Epoque construction	Protection
A	Chapelle funéraire	Public	Puy-de-Dôme (63)	Funéraire	Haut Moyen Age Vie au Xe siècle	Classé
B	Château fort	Public	Puy-de-Dôme (63)	Militaire	Moyen Age central Xie - XIIIe siècle	Classé
C	Porte d'Occident	Public	Allier (3)	Militaire	Moyen Age central Xie - XIIIe siècle	Inscrit
D	Château de Montrognon	Public	Puy-de-Dôme (63)	Militaire	Moyen Age central Xie - XIIIe siècle	Pas de protection
E	Ancien prieuré	Privé	Allier (3)	Domestique	Moyen Age tardif XIV - XVe siècle	Inscrit
F	Ancienne Église Sainte Marie	Public	Dordogne (24)	Religieuse	Moyen Age tardif XIV - XVe siècle	Classé
G	Tour de l'horloge	Public	Allier (3)	Autre	Moyen Age tardif XIV - XVe siècle	Inscrit
H	Abbaye Saint-Pierre	Public	Puy-de-Dôme (63)	Religieuse	Moyen Age tardif XIV - XVe siècle	Classé
I	Notre-Dame de Foncourrieu	Public	Aveyron (12)	Religieuse	Moyen Age central Xie - XIIIe siècle	Inscrit
J	Eglise Saint-Blaise	Public	Allier (3)	Religieuse	Les temps modernes Le grand siècle (XVIIe siècle)	Inscrit
K	Chapelle de l'Hôpital	Public	Puy-de-Dôme (63)	Religieuse	Le XIXe siècle (1800-1900)	Inscrit
L	Marché Saint-Joseph	Public	Puy-de-Dôme (63)	Industrielle	Le XIXe siècle (1800-1900)	Inscrit
M	Villa Russe	Privé	Puy-de-Dôme (63)	Domestique	Le XIXe siècle (1800-1900)	Inscrit
N	Kiosque du parc des Bourins	Public	Allier (3)	Jardin	Le XIXe siècle (1800-1900)	Inscrit

Tableau 69 : Synthèse des bâtis

L'ensemble des différences précédemment mentionnées conduit à relever que les bâtis présentent des matériaux très variés et qu'ils ne sont pas soumis aux mêmes aléas climatiques.

Les paramètres ci-dessous constituent des données d'entrée du modèle d'agrégation.

N°	(1) Pluv (mm)	(2) Tmax	(3) Tmin	(4) Risque sismique	(5) Risque sécheresse	(6) Alt (m)	(7) Nbr hab/ ville	(8) Géivité	(9) Matériaux			
									Pierre	Bois	Béton	Métal
A	580	31,8	-0,8	3 (modérée)	Faible	889	356	D : Gel sévère	X			
B	580	31,8	-0,8	3 (modérée)	Nul	860	568	D : Gel sévère	X	X		
C	780	33,5	-1,4	4 (moyenne)	Moyen	400	397	C : Gel modéré	X	X		
D	580	31,8	-0,8	3 (modérée)	Nul	560	5466	C : Gel modéré	X			
E	780	33,5	-1,4	2 (faible)	Faible	400	319	C : Gel modéré	X	X		
F	901	36,3	-0,6	1 (très faible)	Nul	129	9943	B : Gel faible	X	X		
G	780	33,5	-1,4	3 (modérée)	Moyen	250	5202	C : Gel modéré	X	X		
H	580	31,8	-0,8	3 (modérée)	Faible	360	3604	C : Gel modéré	X	X		
I	860	35	-0,9	2 (faible)	Faible	290	1687	C : Gel modéré	X	X		
J	780	33,5	-1,4	2 (faible)	Faible	268	25899	C : Gel modéré	X		X	X
K	580	31,8	-0,8	3 (modérée)	Fort	365	142948	C : Gel modéré	X			
L	580	31,8	-0,8	3 (modérée)	Fort	365	142948	C : Gel modéré	X			X
M	580	31,8	-0,8	3 (modérée)	Nul	760	735	D : Gel sévère	X	X		
N	780	33,5	-1,4	2 (faible)	Faible	268	25899	C : Gel modéré	X			X

Tableau 70 : Caractéristiques des bâtis avec (1) pluviométrie annuelle en mm annuelle, (2) température maximale relevée en été en °C, (3) Température minimale relevée en hiver en °C, (4) risque sismique, (5) risque de sécheresse (6) altitude de la commune (en m), (7) nombre d'habitant par ville, (8) géivité et (9) matériaux principaux.

Le Tableau 70 illustre que les bâtis de notre corpus ne sont pas soumis aux mêmes paramètres : la pluviométrie annuelle en millimètre (colonne 1), les températures maximales (colonne 2) et les températures minimales (colonne 3), le risque sismique (colonne 4), le risque de sécheresse (colonne 5), l'altitude (colonne 6), le nombre d'habitants par ville (colonne 7), la géivité (colonne 8) et leurs compositions (colonne 9). L'ensemble de ces paramètres montrent l'hétérogénéité de notre corpus.

4.2 Application de la démarche de gestion préventive

4.2.1 Application de la méthodologie HeritageCare

4.2.1.1 Niveau de service 1

La méthodologie StandartCare, c'est-à-dire le niveau de service 1 (SL1), a été appliquée dans le cadre des travaux de thèse. Dans un premier temps, elle a été testée avec l'équipe portugaise puis elle a été appliquée sur le patrimoine sélectionné en France (cf. 4.2.1).

4.2.1.1.1 Validation de la méthodologie avec le consortium

Dans le cadre de la thèse, cette méthodologie a été testée en juillet 2017 sur du patrimoine bâti historique et culturel situé à Guimarães au Portugal avec l'équipe portugaise de l'Université de Minho. Le patrimoine inspecté était : le Palais des Ducs de Bragançe, l'église Notre Dame de l'Oliveira et la maison de la Rua Nova.

Cette expérimentation a permis de valider :

- La phase préparatoire (contacter les propriétaires, obtenir les informations administratives et techniques, organiser la visite) ;
- La phase d'inspection (temps sur place, éléments à regarder, échelle de classement, utilisation de l'atlas, etc.) ;
- La phase de rendu (durée de rédaction, niveau de détails à intégrer, etc.).

4.2.1.1.2 Application de la méthodologie en France

Chaque pays du projet a sélectionné 20 bâtis, englobant les typologies structurales les plus représentatives identifiées en France, pour appliquer le SL1. Une partie des édifices a été sélectionnée par l'Université de Clermont Auvergne (14) et une autre partie a été sélectionnée par l'Université de Limoges (6). Pour chacun des bâtis, la procédure a été appliquée selon les trois phases : avant, pendant et après l'inspection. La durée minimale et maximale de l'application de la méthodologie du niveau de service 1 est synthétisée dans le tableau suivant :

Application de la méthodologie SL1	Durée minimale	Durée maximale
Temps de préparation/bâti (en journée)	0,5	2
Durée intervention sur le site/bâti (en journée)	0,5	3
Déplacement/bâti (en journée)	1	2
Temps rapport version Word/bâti (en journée)	0,5	5
Temps rapport version plateforme /bâti (en journée)	0,5	2
Total (en journée)	3	16

Tableau 71 : Durées minimales et maximales pour bâti de l'application de la méthodologie

4.2.1.1.3 Application

Le déploiement de la démarche de gestion préventive s'est effectué sur les quatorze bâtis présentés dans la section précédente. Son application a débuté en octobre 2017 et s'est finalisée en juillet 2018, elle a pour but d'effectuer un état des lieux à un moment donné du bâti en quatre étapes : anamnèse, diagnostic, thérapie et contrôle. Nous détaillons ici les deux premières étapes qui sont directement de notre ressort.

4.2.1.1.3.1 Anamnèse

L'anamnèse a comme but de préparer l'intervention en rassemblant l'ensemble des informations accessibles. Pour le château de Murol, monument emblématique de la région Auvergne-Rhône-Alpes, nous avons pris contact avec le maître d'ouvrage qui est représenté par la Ville de Murol. Cette prise de contact a initié une première réunion de présentation et de transmission de documents qui a eu lieu le 31 mars 2017. Cette rencontre a permis d'exposer notre mission dans le cadre du projet HeritageCare et de préparer la mission sur place en effectuant une visite du site. Cette dernière a permis de nous rendre compte de son environnement et de sa grandeur afin de localiser les désordres principaux et de se rendre compte des accès. Nous nous sommes rapidement rendu compte que les désordres principaux étaient localisés au niveau de l'enceinte externe.

Suite à cette rencontre, nous sommes allés consulter les documents accessibles à la médiathèque de l'architecture du patrimoine situé à Charenton-Le-Pont afin de pouvoir proposer dans le rapport une synthèse des différents travaux qui ont eu lieu. Cette synthèse n'est pas exhaustive, d'autant plus que nous avons eu accès à des informations qui datent d'après 1889. Cette date correspond à son classement en tant que monument Historique. Suite à la mise en place de sa protection, il a fait l'objet de nombreuses campagnes de restauration pour arrêter sa dégradation. La dernière campagne de restauration date de l'année 2002 où a été effectué : le chemin de ronde, la mise en place d'une charpente (en épicea) et d'une couverture en lauze sur la salle des gardes, la mise en place de gargouilles, la mise en place d'égouts dans la cour. Ces travaux ont été orchestrés par Monsieur Voinchet Architecte en Chef des Monuments Historiques.

Cette synthèse a permis de confirmer que l'enceinte externe n'avait pas subi de campagnes de restauration du fait certainement de sa difficulté d'accès qui était avant obstruée par une forêt d'arbres. La synthèse de la localisation des travaux est listée dans le tableau suivant :

Année	Synthèse des travaux effectués
1889	Classement MH (fin de la dégradation volontaire)
1900	Consolidation des voutes de la double chapelle romane
1902	Consolidation de la base du mur d'enceinte du donjon ; couronnement et pavement des courtines
1905	Courtines et bases du mur d'enceinte
1909	Travaux dans la cour intérieure
1921	Consolidation partie haute du donjon
1925	Reprise des échauguettes dégradées
1929	Consolidation de l'enceinte extérieure et de l'écurie par la pose de ciment grillagé sur le haut des murs
1950	Consolidation de la rampe d'accès, Mise en place d'une chape de ciment sur la toiture d'une chapelle
1953	Travaux sur l'escalier de la porte supérieure
1958	Travaux de conservation des murs du Logis Renaissance
1965	Maçonnerie dans le donjon et sur les courtines, la salle des gardes, le logis et la poterne
1968	Travaux sur le mur de soutènement de la terrasse
1971	Consolidations diverses (avec ciment, chaux, hydrofuge)
1974	Consolidation maçonnerie dans la cour intérieure
1978	Reconstruction mur soutènement esplanade (angle sud-est)
1979	Consolidation bâtiment renaissance et rampe accès
1981	Consolidation du logis gothique
1984	Reprise de l'escalier au pied du pavillon de la Renaissance
1985	Campagne de fouilles sous la cour intérieure qui fit apparaître un réseau complet de récupération des eaux de pluie (tuyaux en terre cuite raccordés à des caniveaux en pierre qui se déverse dans deux citernes enterrées l'une en argile et l'autre en moellons). A la fin des fouilles, les excavations furent remblayées. Suite à ces fouilles des infiltrations importantes sont présentes.
1988	Esplanade ; rampe accès ; mur latéral de l'écurie ; création d'un escalier dans la tour Sud
2002	Restauration de la salle des gardes
2008	Couronnement des courtines et du donjon
2009	Reprise d'une tourelle au-dessus de la rampe d'accès

Tableau 72 : Synthèse de la localisation des travaux effectués depuis le classement du château de Murol répertoriés dans les archives de la médiathèque de l'architecture et du patrimoine

À la suite de la synthèse effectuée, nous avons pu préparer l'intervention sur le site. En vue de l'intervention, le matériel préparé est composé de : planche à dessin, stylo quatre couleurs, mètre ou télémètre laser, lampe torche, boussole, appareil photo, poinçon, paire de jumelle, loupe, petite échelle, équipements de sécurité personnelle (chaussure, casque et gilet jaune).

Dans le cas des bâtis de la thèse, cette première étape a duré entre une demi-journée et deux journées de préparation (sans compter le temps de déplacement). La durée dépend de la visite avant l'intervention, de la quantité d'archives et des échanges avec le propriétaire pour l'organisation. Pour le château de Murol, cette étape a duré deux journées de préparation, puisqu'une réunion a été effectuée avant l'intervention et la quantité d'informations récupérées était importante.

4.2.1.1.3.2 Diagnostic

Le diagnostic est réalisé sur place. En premier temps, chacun des corps d'état est inspecté pour déterminer les modes constructifs et les matériaux utilisés. En deuxième temps, le relevé des altérations est effectué sur les plans ou sur les photos ou sur une tablette.

Chacune d'entre elles est quantifiée (en termes de pourcentage) et hiérarchisée par des critères pour qualifier l'état, les risques en fonction de l'urgence et les recommandations [Afnor 2012], comme détaillé dans le chapitre 3. Le croisement des informations, avec l'étude stratigraphique et celles des pathologies, du bâtiment permet d'émettre des hypothèses et de déterminer des préconisations adaptées. L'atlas des altérations a été utilisé dans le cadre des relevés de l'état des lieux. Comme mentionné précédemment, il est composé de sept familles et de sous-familles d'altérations qui sont associés à des codes, décomposés comme dans le Tableau 76.

Bâti	Dates	Qté en journées
A	23/04/2018	1
B	27/03/2018, 24/04/2018, 27/04/2018	3
C	12/06/2018	0,5
D	13/06/2018	0,5
E	24/10/2017 25/10/2017	2
F	07/02/2018 08/02/2018	2
G	30/10/2017	1
H	04/06/2018 05/06/2018	2
I	18/07/2018 19/07/2018	1,5
J	31/05/2018 14/06/2018	1,5
K	10/10/2017 11/10/2017	2
L	18/10/2017 19/10/2017	1,5
M	25/04/2019	1
N	26/04/2018	0,5

Tableau 73 : Récapitulatif des dates et durée de d'intervention

Dans le cas de notre corpus, cette deuxième étape a duré entre une demi-journée et trois journées d'intervention. Si nous reprenons le château de Murol, les visites pour l'inspection de gestion préventive se sont déroulées les : 27/03/2018, 24/04/2018 et 27/04/2018. Tandis que pour le kiosque du parc des

Bourins l'intervention n'a duré qu'une demi-journée (26/04/2018) puisque celui-ci était facilement accessible et présente une structure de faible volume et une ouverte depuis l'extérieur. L'ensemble des dates et durées des interventions sur les sites est synthétisé dans le Tableau 73.

4.2.1.1.3.3 Rédaction du rapport de diagnostic

La rédaction du rapport suit le plan suivant : les informations administratives, les informations sur le bâti (ex : plan, date et cahier des charges des anciennes restaurations), l'évaluation de l'état, l'évaluation de la conservation préventive, l'énumération de l'ensemble des altérations observées et les recommandations proposées. L'ensemble des données a été inséré dans la plateforme mise en place dans le cadre du projet.

Dans le cas des bâtis de la thèse, cette troisième étape a duré entre une demi-journée et sept journées de rédaction. Par exemple, le rapport de la chapelle de l'hôpital a duré sept journées soit la plus longue durée. Ce bâti souffrait de désordres structuraux pour lesquels une instrumentation des fissures a été faite, une interprétation a été proposée dans le cadre des préconisations. A contrario, le rapport du kiosque du parc des Bourins a été rédigé en une demi-journée puisque la quantité d'informations que nous avions était faible.

4.2.1.2 Niveau de service 2

La méthodologie PlusCare, c'est-à-dire le niveau de service 2 (SL2), a été appliquée dans le cadre des travaux de la thèse. Chaque pays du projet a sélectionné environ 5 bâtis, parmi l'ensemble sélectionné dans le cadre du SL1, pour appliquer le SL2. L'objectif du SL2 est d'effectuer des investigations supplémentaires en vue de comprendre au mieux l'état du bâti. La durée minimale et maximale de l'application de méthodologie du niveau de service 2 est synthétisée dans le tableau ci-dessous :

Application de la méthodologie SL2	Durée minimale	Durée maximale
Temps de préparation/bâti (en journée)	0,5	0,5
Durée intervention sur le site/bâti (en journée)	0,5	1
Déplacement/bâti (en journée)	1	2
Traitement des données/bâti (en journée)	2	5
Intégration données plateforme /bâti (en journée)	0,5	0,5
Total	4,5	9

Tableau 74 : Durée minimale et durée maximale (en journée) par bâti de l'application de la méthodologie

La méthodologie PlusCare a été appliquée en utilisant la technique de la photogrammétrie [Historic England 2017] pour le relevé 3D du bâti (avec le logiciel Metashape) et en créant la visite virtuelle du bâti (avec le logiciel Pano2VR).



Figure 48 : Photogrammétrie d'une façade d'un bâti du corpus – cas du prieuré

Pour certains bâtis, nous avons effectué d'autres typologies d'investigations supplémentaires en fonction des altérations qui avaient été visualisées lors du relevé du niveau de service 1. Les investigations supplémentaires effectuées pour chaque bâti sont détaillées dans le Tableau 75 avec le nom de la technique effectuée et son objectif.

Bâti :	Investigations supplémentaires :
Bâti B	Photogrammétrie de l'extérieur : plan 3D Visite virtuelle : localisation des altérations
Bâti E	Photogrammétrie de l'extérieur : plan 3D Photographie de la toiture avec un drone : plan 3D Création visite virtuelle : localisation des altérations
Bâti H	Création visite virtuelle : localisation des altérations Caméra IR : détermination si présence remontées capillaires Analyse des sels : détermination nature des sels sur enduits intérieur
Bâti I	Suivi de la température/humidité : détermination si atmosphère humide pour les peinture polychromes
Bâti K	Photogrammétrie de l'int et ext : plan 3D Création visite virtuelle : localisation des altérations
Bâti L	Photogrammétrie des façades : plan 3D

Tableau 75 : Détail des investigations supplémentaires

4.2.1.3 Niveau de service 3

La méthodologie TotalCare, c'est-à-dire le niveau de service 3 (SL3), a été appliquée dans le cadre des travaux de la thèse. Chaque pays du projet a sélectionné 1 bâti, parmi l'ensemble retenu dans le cadre du SL2. La plupart du temps, les bâtis anciens ont des géométries complexes, qu'il est difficile de représenter à l'identique à l'aide d'un logiciel de modélisation numérique (développé pour des constructions neuves) [Talon 2017, Talon 2017b]. C'est pourquoi, une bibliothèque d'objets paramétriques et de paramètres spécifiques à la maintenance des bâtis anciens a été développée [Durand 2018]. Cette bibliothèque a été mise en place pour l'ensemble des monuments historiques et appliquée à l'édifice principal du Puy de Dôme sélectionné dans le corpus (le château de Murol). La Figure 49 illustre ces travaux.

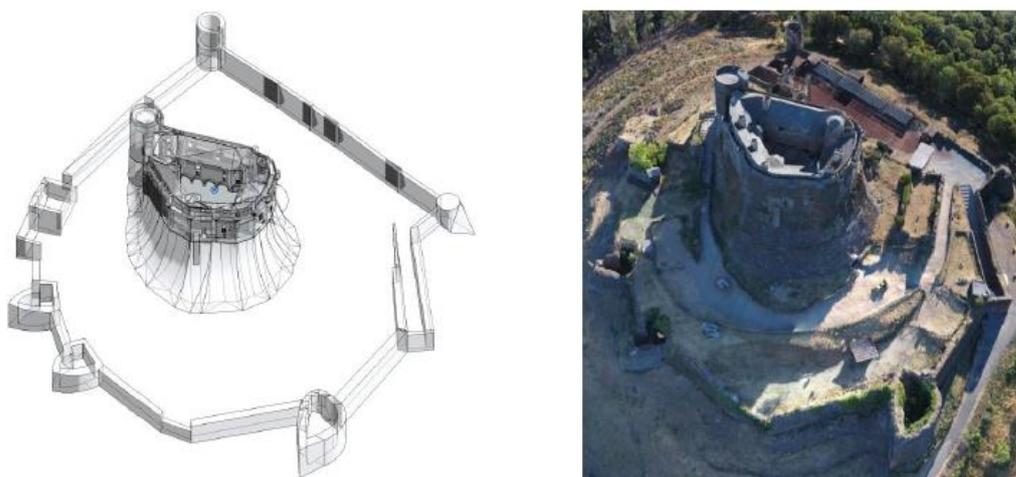


Figure 49 : (a) vue 3D de la maquette numérique via le logiciel REVIT [Durand 2018] (b) vue 3D de la photogrammétrie

4.2.2 Etat général des bâtis

Nous présentons dans cette section les résultats principaux. Les résultats détaillés de chacun des bâtis sont en annexe : chaque bâti a une feuille explicative avec son identité, la valeur de ses indicateurs et des photographies représentant ses principaux désordres.

Nous avons pris le choix de présenter les résultats des bâtis en général, non pas en fonction des typologies d'altération (cf. Tableau 76) mais en fonction des corps d'état : couverture, charpente, évacuations d'eaux pluviales, enveloppe extérieure et enveloppe intérieure. Cette décomposition suit le guide de la méthodologie de gestion préventive.

Colonisation biologique		Altération chromatique et dépôt		Perte de matière		Détachement		Fissure		Déformation		Autre altérations	
Sous famille d'altération	Code	Sous famille d'altération	Code	Sous famille d'altération	Code	Sous famille d'altération	Code	Sous famille d'altération	Code	Sous famille d'altération	Code	Sous famille d'altération	Code
Microorganisme	B1	Croute	AC1	Erosion	PM1	Boursoufflure	D1	Colonnes et murs	F1	Colonnes et murs	DE1	Drainage	AA1
Mousses et petites plantes	B2	Dépôt	AC2	Alvéolisation	PM2	Éclatement	D2	Poutres et sols	F2	Poutres et sols	DE2	Installations	AA2
Plantes	B3	Altération chromatique	AC3	Dégât mécanique	PM3	Délitage	D3	Arches, voutes et dômes	F3	Arches, voutes et dômes	DE3	Autres	AA3
Infestation rongeur	B4	Efflorescence	AC4	Perte de mortier	PM4	Désintégration	D4	Éléments inclinés, fermes et toiture	F4	Éléments inclinés, fermes et toiture	DE4		
Pourriture	B5	Encrustation	AC5	Lacune	PM5	Fragmentation	D5						
		Film	AC6	Pitting	PM6	Détachement de matériaux de revêtement	D6						
		Tâche	AC7	Perforation	PM7	Corrosion	D7						
		Graffiti	AC8	Calciné	PM8	Détachement d'unité	D8						
		Patine	AC9	Perte ou élément cassés	PM9								

Tableau 76 : Liste des familles d'altération avec leurs sous-familles associées

4.2.2.1 Evaluation par bâti

4.2.2.1.1 Critère d'altération

L'indicateur structural par bâti prend en compte le critère d'altération et le critère d'intégrité.

Le Tableau 77 présente les résultats des critères d'altérations déterminés pour chaque corps d'état (voir paragraphe 3.1.1.1.1 du chapitre 2). Certains corps d'état des bâtis n'ont pas pu être inspectés étant donné que nous n'y avons pas eu accès, dans ce cas nous n'avons pas pu déterminer le critère d'altération.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
<i>Critère d'altération / couverture</i>	0,33	0,18	0,20	NA	0,41	0,88	0,20	NA	0,30	NA	0,87	0,27	1,53	NA
<i>Critère d'altération / charpente</i>	NA	NA	0,22	0,00	0,37	0,15	0,20	0,60	0,20	NA	NA	0,20	0,75	NA
<i>Critère d'altération / écoulement des eaux pluviales</i>	0,24	0,30	NA	NA	1,00	0,68	NA	0,30	NA	0,25	0,07	0,20	2,10	NA
<i>Critère d'altération / enveloppe du bâti</i>	0,35	0,52	0,21	0,18	0,12	0,25	0,15	0,25	0,24	0,28	0,22	0,48	0,34	NA
<i>Critère d'altération / intérieur du bâti</i>	0,22	0,28	0,52	0,20	0,30	0,15	0,70	0,57	0,38	0,20	0,69	0,80	0,35	0,08

Tableau 77 : Critère altération par corps d'état et par bâti (NA : non déterminé)

À la suite de la détermination de ces critères d'altération, nous proposons de les catégoriser à l'aide des classifications proposées dans la norme [Afnor 2012] ; l'objectif est d'obtenir des catégories selon le tableau ci-dessous :

C1 Catégories du critère d'altération	Symptômes	Sw Critère d'altération calculé
0	Pas ou très peu de symptôme	< 0,25
1	Symptômes mineurs	0,25 – 0,50
2	Symptômes passablement forts	0,50- 0,75
3	Symptômes majeurs	>0,75

Tableau 78 : Propositions de catégories du critère d'altération en fonction du critère d'altération calculé

Par exemple pour le bâti A, le critère d'altération maximale correspond à celui de l'enveloppe du bâti qui est de 0,35 (voir le Tableau 77). Pour déterminer sa catégorie, nous utilisons le Tableau 78 qui nous permet de déterminer que la catégorie du bâti est de 1 puisque le critère d'altération est situé entre 0,25 et 0,50.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
C1 : Catégorie critère d'altération/bâti	1,00	2,00	2,00	0,00	3,00	3,00	2,00	2,00	1,00	1,00	3,00	3,00	3,00	0,00
Sw : Critère max d'altération/bâti	0,35	0,52	0,52	0,20	1,00	0,88	0,70	0,60	0,38	0,28	0,87	0,80	2,10	0,08

Tableau 79 : Résultat de la détermination de la catégorie du critère d'altération

Les bâtis en meilleurs états sont le château de Montrognon (D) et le kiosque (N). Ils ont tous les deux le critère d'altération catégorisé de 0. Le tableau suivant synthétise leurs informations.

	D	N
Typologie architecture	Architecture militaire	Architecture de jardin
Localisation (département)	Puy-De-Dôme (63)	Allier (3)
Epoque construction	Moyen Age central (XIe - XIIIe siècle)	Le XIXe siècle (1800-1900)
Protection	Pas de protection	Inscrit
Pluviométrie annuelle (mm)	580	780
Delta T (°C)	32,6	34,9
Risque sismique	Zone de sismicité 3 (modérée)	Zone de sismicité 2 (faible)
Risque sécheresse	Nul	Faible
Altitude (m)	560	268
Nbre hab/ville	5466	25899
Gélimité	C : Gel modéré	C : Gel modéré

Tableau 80 : Paramètres pour les bâtis en meilleur état pouvant influencer le critère d'altération

Les bâtis ayant les critères d'altération les plus élevés sont : l'ancien prieuré (E), l'ancienne église sainte marie (F), la chapelle de l'hôpital (K), le marché saint joseph (L) et la Villa Russe (M). Le Tableau 81 liste les paramètres pouvant éventuellement influencer sur le critère d'altération, mais les résultats ne permettent pas de déterminer un paramètre qui pourrait expliquer la raison des critères d'altération élevés. Les bâtis dont le critère d'altération sont les plus élevés n'ont pas :

- De typologie d'architecture particulière puisque les bâtis en question recouvrent un large panel d'architecture avec du type domestique, religieux et industrielle. On note tout de même que trois bâtis sur cinq ont une architecture de type religieuse ;
- De localisation particulière puisque les bâtis sont répartis sur trois départements,
- D'époque de construction particulière ;
- De pluviométrie particulière ;
- De variation de température annuelle particulière ;
- De risque sismique particulier puisqu'il varie du risque faible au risque modéré ;
- De risque de sécheresse particulier puisqu'il varie de faible à fort ;
- Une altitude particulière puisqu'elle varie entre 129m et 760m ;
- Un nombre habitant de leur ville particulier puisqu'il fluctue entre 319 et 142948 ;
- De gélimité particulier puisque les zones recouvrent la zone B et la zone D. On note que celui qui se trouve dans la zone sévère en gélimité présente le critère d'altération calculé le plus important ;
- De roche particulières.

Le tableau suivant synthétise ces informations.

	E	F	K	L	M
Typologie architecture	Architecture domestique	Architecture religieuse	Architecture religieuse	Architecture industrielle	Architecture domestique
Localisation (département)	Allier (3)	Dordogne (24)	Puy-De-Dôme(63)	Puy-De-Dôme(63)	Puy-De-Dôme(63)
Epoque construction	Moyen Age tardif (XIV - XVe siècle)	Moyen Age tardif (XIV - XVe siècle)	Le XIXe siècle (1800-1900)	Le XIXe siècle (1800-1900)	Le XIXe siècle (1800-1900)
Protection	Inscrit	Classé	Inscrit	Inscrit	Inscrit
Pluviométrie annuelle (mm)	780	901	580	580	580
Delta T (°C)	34,9	36,9	32,6	32,6	32,6
Risque sismique	Zone de sismicité 2 (faible)	Zone de sismicité 1 (très faible)	Zone de sismicité 3 (modérée)	Zone de sismicité 3 (modérée)	Zone de sismicité 3 (modérée)
Risque sécheresse	Faible	Nul	Fort	Fort	Nul
Altitude (m)	400	129	365	365	760
Nbre hab/ville	319	9943	142948	142948	735
Géivité	C : Gel modéré	B : Gel faible	C : Gel modéré	C : Gel modéré	D : Gel sévère
Matériaux élévation extérieur	Roche sédimentaire et magmatique	Roche sédimentaire	Roche magmatique	Roche magmatique	Roche magmatique

Tableau 81 : Paramètres pour les bâtis en moins bon état pouvant influencer le critère d'altération

Le Tableau 82 synthétise les sous-familles d'altération rencontrées pour les cinq bâtis et pour chacun des corps d'état (COU : couverture, CHA : charpente, EEP : Equipement pour l'évacuation des eaux pluviales, EXT : enveloppe extérieure, INT : intérieur) ayant le critère d'altération catégorisé maximale. Les résultats détaillés pour chacune des bâtisses se trouvent dans l'Annexe 7 : Etat des lieux.

	E	F	K	L	M
COU	B1, B2, B4, PM5, DE4	B2, PM1	B1, PM4, AC9, PM8, PM1	B1, D7, AA3, AC7	B1, AA1, PM4, B1, D7
CHA	B4, B5, DE4, D7	AC7, D7		D6	B4, B4, F4, DE4, AC7
EEP	B5	B1, B3	D7, AA1	AA3, D7	AA1
EXT	B2, B3, PM1, PM4, F1	B1, B2, B3, AC2, PM1, PM5	B1, B3, 1C1, AC3, AC7	AC4, AC7, AC8, D3, D7, D6	PM1, PM3, D6, D5, D6, F1
INT	F1	AC4	D4, D6, F1	AC7, AC4, D6, PM5, D7, AA3	F1, PM1

Tableau 82 : Synthèse des typologies d'altérations

Ce tableau montre l'intérêt du critère d'altération puisqu'il permet de mettre en évidence les zones où l'altération est importante. Par exemple, les recouvrements biologiques (lichen, mousse) sur la toiture sont synonymes d'un critère d'altération important mais cela ne veut pas dire forcément que le désordre est grave. Pour le cas de la toiture de l'ancienne église Sainte Marie (bâti F), la plupart des lauzes sont recouvertes de mousse, mais cela n'amène pas d'infiltrations à l'intérieur et la charpente qui est en bon état. Tandis que pour la Villa Russe (bâti M), le critère d'altération de la toiture est meilleur, cependant ses désordres visualisés (exemple : éléments manquants) sont plus sérieux, puisqu'ils auront une conséquence directe sur la charpente, mais ont moins d'incidences sur le critère vu que le pourcentage est moins important. Ainsi, le critère d'altération permet de mettre en évidence les altérations qui prennent une proportion importante.

4.2.2.1.2 Critère d'intégrité

À la suite de la détermination des critères d'altération, nous évaluons le critère d'intégrité C_{Ii} à l'aide des pourcentages relevés des désordres structuraux (fissures et déformations) sur les parois verticales c_{PVi} , les parois horizontales c_{PHi} et les charpentes c_{Ci} . Pour rappel, la démarche d'obtention du critère d'intégrité est détaillée dans le paragraphe 3.1.1.1.2.

Le Tableau 83 indique la somme de pourcentage de désordres structuraux pour les parois verticales, les parois horizontales et la charpente. Nous n'avons pas relevé de désordres structuraux sur les parois horizontales, cependant on note que les désordres sur les parois horizontales peuvent être assez facilement cachés par la présence de revêtement (parquet, moquette, faux plafond) et par la présence de meubles.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
c_{PVi}	70	515	210	80	240	40	40	140	100	90	360	0	50	0
c_{Ci}	0	0	0	0	240	0	0	0	120	0	0	0	125	0

Tableau 83 : Calcul du critère d'intégrité à l'aide du critère d'altération

À la suite de la détermination de ces pourcentages, nous établissons des catégories des critères pour des raisons de lisibilité. Nous procédons de la même manière que pour le critère d'altération. La proposition de catégorie liée aux pourcentages est donnée dans le tableau ci-dessous :

	c_{PVi} (%)	c_{Ci} (%)
Démarche d'obtention pour proposer une catégorie	Max : 515 – Min : 0 $\Delta c_{PVi} = 515$ $\frac{\Delta c_{PVi}}{4} = 172$	Max : 0 – Min : 240 $\Delta c_{Ci} = 240$ $\frac{\Delta c_{Ci}}{3} = 80$
Gravité 0	0	0
Gravité 1	0 – 172	0-80
Gravité 2	172 - 344	80-160
Gravité 3	>344	>160

Tableau 84 : Propositions de catégories du critère d'altération

Nous pouvons attribuer les catégories à chacun de ces critères et nous proposons de prendre la valeur maximale pour le critère d'intégrité. Ce qui nous permet de déterminer que trois bâtis présentent la gravité maximale : le château de Murol (bâti B), l'ancien prieuré (bâti E) et la chapelle de l'hôpital (bâti K). Le Tableau 85 synthétise les résultats des catégories.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
c_{PVi} (cat)	1	3	2	1	2	1	1	1	1	1	3	0	1	0
c_{Ci} (cat)	0	0	0	0	3	0	0	0	2	0	0	0	2	0
Max (c_{PVi}; c_{PHi}; c_{Ci})	1	3	2	1	3	1	1	1	2	1	3	0	2	0

Tableau 85 : Résultat de la détermination de la catégorie du critère d'intégrité C_{Ii}

L'indicateur structural prend en compte les critères d'altération et d'intégrité. Le critère d'altération permet de mettre en valeur les altérations qui prennent une superficie importante, tandis que le critère d'intégrité met en valeur les désordres structuraux de type fissures et déformations. Ils permettront pour les prochaines visites de déterminer si les altérations sont stables ou si elles continuent à se développer avec le temps en fonction des actions de conservation mises en place par le maître d'ouvrage.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
Critère d'intégrité C2	1	3	2	1	3	1	1	1	2	1	3	0	2	0
Critère d'altération C1	1	2	0	0	3	3	2	2	1	1	3	3	3	0

Tableau 86 : Critère d'intégrité et critère altération

4.2.2.2 Evaluation par corps d'état

4.2.2.2.1 Les couvertures

Les couvertures ont comme but d'empêcher l'eau d'entrer dans le bâti, en drainant l'eau du toit vers les gouttières et des descentes d'eaux pluviales (lorsqu'elles sont présentes). Elle doit être conçue pour résister aux événements climatiques auxquels un bâti peut être confronté (exemple : lumière directe du soleil, amplitude thermique, vents, grêle, cycles de gélivité, pigeon) et aux altérations éventuelles (exemple : mousse).

Lors de l'état des lieux, l'ensemble des matériaux et des éléments architecturaux ont été pris en considération. Les principaux éléments sont le solin, le faitage, la noue, l'arêtier, les brisures, les cheminées, les aérations et les fenêtres de toit. Les éléments architecturaux sont les cheminées, les lucarnes, les fenêtres de toit, les débords de toiture, les épis de faitage et la protection des murs pignons.

L'inspection des couvertures s'est effectuée par l'extérieur (à l'aide d'une paire de jumelles ou d'un appareil photo avec un téléobjectif) et par l'intérieur (en allant dans les combles). Si nous le pouvions, nous effectuerions la visite de préférence un jour de pluie afin de visualiser les zones problématiques.

4.2.2.2.1.1 Matériaux composant les toitures

Les matériaux utilisés dans le cadre des bâtis de notre corpus sont principalement des matériaux de couverture courant dans le bâti ancien (ardoise, terre cuite, lauze en pierre sédimentaire ou en pierre magmatique, feuille de zinc, feuille de cuivre) et des matériaux courants utilisés pour leur fixation (litage en bois). Les matériaux visualisés sur les bâtis du corpus sont synthétisés dans le tableau suivant :

Bâti :	Matériaux visualisés	Bâti :	Matériaux visualisés
A	Lauze en pierre magmatique	H	Tuile en terre cuite
B	Lauze en pierre magmatique (toiture refaite 2000)	I	Ardoise
C	Tuile plate en terre cuite (toiture refaite en 1982)	J	Eglise en béton : Feuille de cuivre pour la coupole tuile (terre cuite) Eglise en pierre : ardoise pour le clocher
D	Absence de toiture car ruine	K	Pierre de lave et coupole en zinc
E	Tuile plate en terre cuite	L	Tuile en terre cuite
F	Lauze (pierre sédimentaire)	M	Ardoise
G	Ardoise	N	Zinc

Tableau 87 : Synthèse des matériaux observés

4.2.2.2.1.2 Etat des lieux

L'état des couvertures a pu être vérifié sur onze bâtis, les toitures des quatre bâtis (D, H, J et N) n'ont pas pu être visualisées. Pour les autres toitures nous avons pu déterminer leur critère d'altération. Les toitures, dont l'état est le plus préoccupant, sont celles de l'ancienne église Sainte Marie (bâti F), de la chapelle de l'Hôpital (bâti K) et celle de la Villa Russe (bâti M). Les résultats du critère d'altération sont dans le tableau suivant :

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
Critère d'altération / couverture (Calculé)	0,33	0,18	0,20	X	0,41	0,88	0,20	X	0,30	X	0,87	0,27	1,53	X
Critère altération / couverture (Catégorie)	1	0	0	X	1	3	0	X	1	X	3	1	3	X
Critère état / couverture (Jugement en catégorie)	1	1	0	X	2	3	1	X	1	X	3	0	3	X
Famille altération majoritaire	CB	CB	D	-	CB	CB	PM	-	CB	AC	PM	AC - D	CB - PM	-

Tableau 88 : Résultat de l'état des lieux de la couverture

La toiture de l'ancienne église Sainte-Marie (bâti F), en lauze de pierre sédimentaire, présente principalement des colonisations biologiques telle que de la mousse (présente sur 75% de la toiture) et la présence de pertes de matières (impactant 25 % de la toiture) en raison de l'effritement du matériau. D'après les informations récoltées, la toiture aurait déjà subi des démoussages mais le jour de l'inspection la mousse recouvrait encore l'ensemble de la toiture. La pierre utilisée en tant que couverture aurait subi un traitement qui a pu favoriser l'évolution de sa porosité et qui a pu œuvrer en faveur de l'augmentation du développement de la colonisation biologique. Ce phénomène est sans doute à rapprocher de l'importante pluviométrie qui affecte la ville de Sarlat (901 mm par an de l'ensemble des bâtis du corpus) et qui peut être un facteur aggravant le développement de colonisation biologique.

La toiture de la chapelle de l'hôpital (bâti K) est une toiture en pierre de lave, probablement de la pierre de Volvic, qui présente principalement des pertes de matière. En effet, la toiture a été restaurée il y a quelques années en jointoyant les pierres à l'aide d'un mastic de type silicone. Aujourd'hui ce mastic est altéré et n'assure plus sa fonction d'étanchéité, l'intérieur de l'église est parsemé de tâches d'humidité au niveau des voûtes. D'après notre inspection effectuée à l'aide de jumelles, nous avons estimé que 20% de la surface de la toiture en pierre de lave présentait des microorganismes, 40% présentait des pertes de matière (du fait de l'altération des joints) et donc sur 40% de la surface de la toiture nous n'avons pas détecté de désordres spécifiques. La charpente n'a pu être visualisée mais elle est probablement impactée. Nous présentons le calcul de son critère d'altération dans le tableau suivant :

	Couverture	
Critère d'altération max / élément impacté	0,87	
Élément impacté	Couverture - pierre de lave	
Code altération	B1	PM4
% de la surface de la toiture impactée	20	40
Catégorie état	1	2
Catégorie risque	1	3
Critère d'altération / élément impacté	$\frac{[(0,2.1.1)+(0,4.2.3)]}{3} = 0,87$	

Tableau 89 : Critère d'altération de la toiture de la chapelle de l'ancien hôpital

La toiture de la Villa Russe (bâti M) est une toiture en ardoise qui présente principalement des détachements, des pertes de matière et d'autres dommages. Cette couverture date, probablement, de la construction de la Villa Russe et n'a pas subi de rénovation. Elle souffre principalement d'ardoises manquantes et/ou déplacées qui engendrent des infiltrations par l'intérieur. Lors du relevé sur la charpente, nous avons mis en évidence la présence de mouvements d'éléments en bois qui ont pu engendrer des déplacements des matériaux composant la toiture.

D'après l'histogramme, représentant la répartition des familles d'altération en fonction du critère d'altération (Figure 50), nous notons que : les colonisations biologiques sont les désordres majoritaires sur les toitures visualisées. Les microorganismes (B1) et les mousses (B2) sont les altérations les plus récurrentes sur l'ensemble de notre corpus.

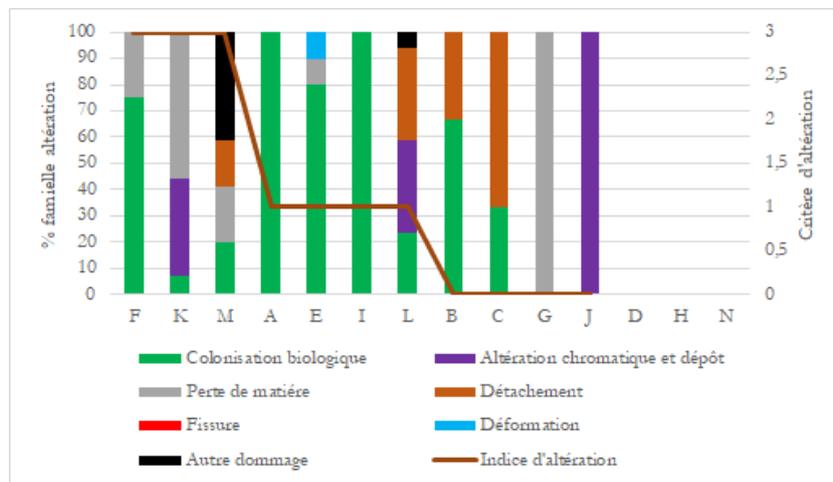


Figure 50 : Pourcentage des familles d'altérations et critère d'altération de la couverture

D'après l'histogramme de la Figure 51, les résultats ne permettent pas de montrer que la quantité (en pourcentage) des désordres présents dépendent de la pluviométrie. Ce qui permet peut-être de dire que ces désordres ne dépendent pas de la pluviométrie mais des caractéristiques physiques des matériaux employés (i.e. : composition, porosités) et/ou des actions de conservation mis en place par le gestionnaire (i.e. : démoussage, hydrofugation, etc.). Dans le cadre de cette étude, nous n'avons pas assez d'échantillons pour investiguer ces hypothèses.

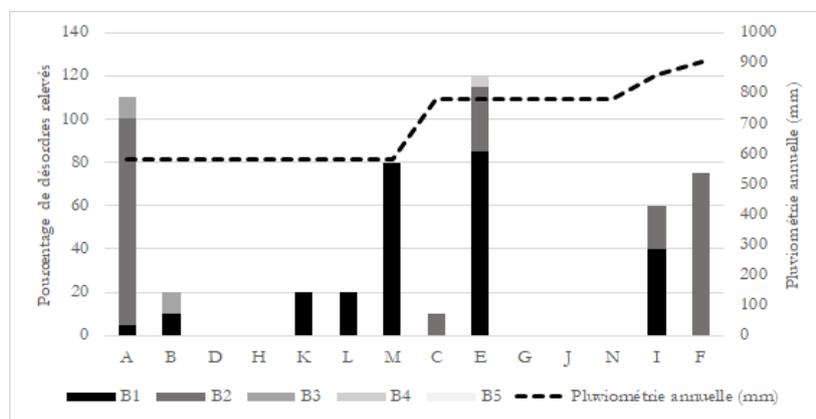


Figure 51 : Pourcentage des sous-familles d'altérations de la colonisation biologique et la pluviométrie annuelle

4.2.2.2 Charpentes

Les charpentes sur les bâtis anciens peuvent être de toute nature (ex : bois massif, lamellés-collés, en métal ou en béton). Ce n'est pas parce que le bâti a été construit à une époque où l'on utilisait le bois que la charpente actuelle est encore constituée de ce même matériau. La structure d'un édifice est rythmée par des cycles de destruction/reconstruction volontaire (ex : agrandissement) ou involontaire (ex : incendie). L'inspection des charpentes s'effectue principalement par l'intérieur (dans les combles) mais des hypothèses peuvent être faites avec l'inspection de la couverture et la visualisation si possible de chevrons et de pannes

sous le rebord des toitures. L'ensemble de la procédure de la gestion préventive de la charpente a été appliqué sur les bâtis sur lesquels nous avons pu accéder à leur charpente. L'état des lieux des charpentes a pu être effectuée sur huit bâtis, les charpentes des bâtis J, K, A, B, D n'ont pas pu être visualisées ou n'étaient pas accessibles.

4.2.2.2.1 Matériaux composant les charpentes

Dans le cas des charpentes visualisées des bâtis de notre corpus, elles étaient essentiellement des charpentes en bois massif. Elles sont construites pour franchir la distance de mur à mur et portent la toiture.

La forme la plus simple et la plus courante, est celle du triangle isocèle, les arbalétriers forment les deux côtés du triangle, l'entrait sa base et le poinçon sa hauteur. De part et d'autre du poinçon, deux pièces obliques, les contrefiches, assemblées dans le poinçon et la sous-face des arbalétriers, raidissent l'angle et reportent sur le poinçon une partie des charges de l'arbalétrier. Les pannes relient les fermes entre elles et supportent les chevrons. Elles sont placées perpendiculairement aux fermes et posées sur la pente des arbalétriers, où on cale des coins de bois, les échantignoles. Les pannes faitières sont posées sur les sommets des poinçons et triangulées avec la ferme par des contrefiches obliques raidissant l'angle qu'elles forment avec le poinçon. Les pannes sablières, posées sur l'épaisseur du mur gouttereau relient entre eux les deux angles inférieurs des triangles de fermes. Les distances entre les fermes et les pignons sont franchies par les pannes porteuses (i.e. les chevrons portent le débord de la toiture).

Les matériaux visualisés sont décrits dans le tableau suivant :

Bâti :	Charpente	Bâti :	Charpente
A	Absence de charpente Hypothèse : coupole qui sert de toiture	H	Charpente en bois massif
B	Charpente effectuée en épicéa en même temps que la toiture dans les années 2000	I	Charpente en bois massif
C	Charpente en bois massif avec élément plus récent en bois équarri	J	Charpente non accessible
D	Absence de charpente	K	Charpente non accessible
E	Charpente en bois massif	L	« Charpente » en métal
F	Charpente en bois massif (bois équarri)	M	Charpente en bois massif
G	Charpente en bois massif	N	« Charpente » en métal

Tableau 90 : Information concernant la nature et l'accessibilité des charpentes

4.2.2.2.2 Etat des lieux

Pour les charpentes accessibles, nous avons pu déterminer le critère d'altération. D'après le Tableau 91 et la Figure 52, nous pouvons déduire que la charpente la plus préoccupante correspond à celle de la Villa Russe (bâti M) et que les familles d'altération les plus présentes sont les colonisations biologiques et les altérations chromatiques.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
Critère d'altération / charpente (calculé)	X	X	0,22	X	0,37	0,15	0,20	0,60	0,20	X	X	0,20	0,75	X
Critère altération / charpente (catégorie)	X	X	0	X	1	0	0	2	0	X	X	0	3	X
Critère état / charpente (jugement en catégorie)	X	X	1	X	2	1	1	1	2	X	X	1	3	X
Famille altération majoritaire	-	-	CB	-	D	AC	AC	CB	De	-	-	D	CB	-

Tableau 91 : Résultat de l'état des lieux de la couverture

La charpente ayant le critère d'altération le plus élevé correspond à celle de la Villa Russe (bâti M), en effet lors de l'inspection, des désordres sanitaires (ex : insectes à larves xylophage, tâche sombre, présence de sciure) et structuraux (fissures, déplacement) ont été relevés. De plus, le mauvais état de la toiture favorise l'altération du bois en créant des zones de pourrissement et/ou des zones d'assombrissement.

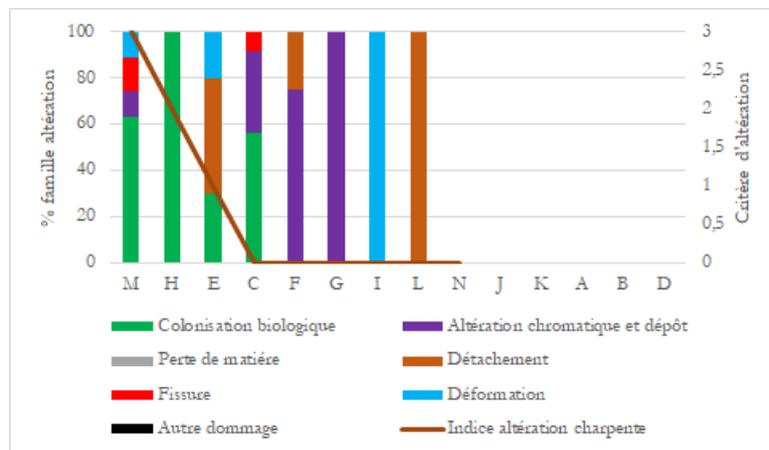


Figure 52 : Pourcentage des familles d'altérations et critère d'altération de la charpente

La famille des colonisations biologiques est l'une des familles les plus récurrentes sur les charpentes visualisées avec les sous-familles d'altération appelées les « infestations par les insectes à larves xylophage (B4) » et la présence de « pourriture (B5) ». La figure suivante met en évidence les désordres B4 et B5.

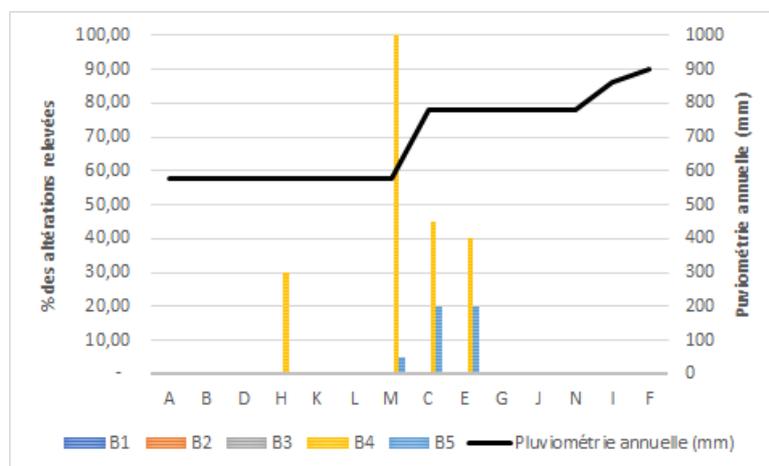


Figure 53 : Pourcentage des sous-familles d'altérations de la colonisation biologique en fonction de la pluviométrie annuelle (mm) et des bâtis

La pluviométrie annuelle ne permet pas de créer un lien avec les typologies d'altération de la famille colonisation biologique. Cependant la Figure 54 met en évidence la présence de la sous-famille « tâche » (AC7) de la famille des altérations chromatiques (AC) qui mettaient en évidence la présence de fuites dans la toiture.

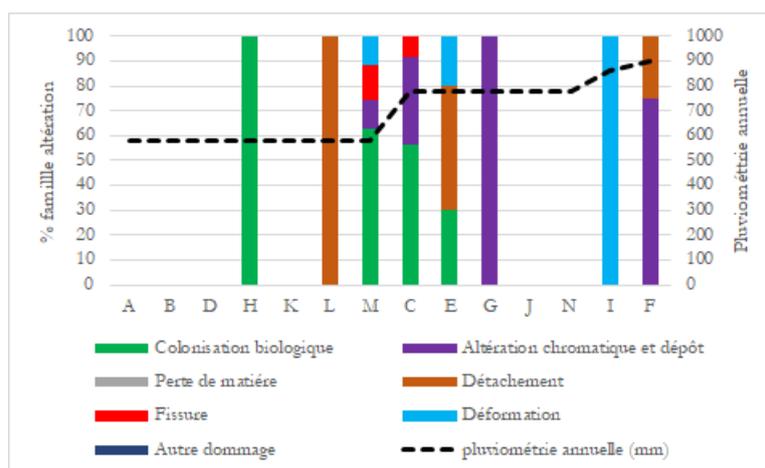


Figure 54 : Pourcentage des familles d'altérations en fonction de la pluviométrie annuelle (mm) et des bâtis

4.2.2.2.3 Evacuations des eaux pluviales

Les gouttières et les descentes pluviales constituent une partie importante du système d'évacuation de l'eau d'un bâti, dirigeant stratégiquement toute l'eau accumulée par la pluie, la glace et la neige vers des zones spécifiques autour de la base du bâti. Les descentes peuvent être extérieures, fixées aux angles des façades, ou placées à l'intérieur du bâti. Une fois l'eau évacuée du toit et collectée dans les regards, elle peut être évacuée de 3 manières différentes : acheminée vers un réseau collectif, épandue dans le jardin ou sur la voie publique (réseau individuel) ou stockée dans un récupérateur d'eau de pluie pour être réutilisée. Lorsque la construction ne peut être reliée à un réseau d'assainissement collectif, l'eau est alors épandue dans le jardin.

Dans le cas des bâtis inspectés, les équipements pour les évacuations des eaux pluviales ont été inspectés en suivant la méthodologie de la gestion préventive dont le but était d'effectuer l'état des lieux, tel que présenté au Tableau 92, pour détecter les défauts et ou les désordres associés à ces équipements.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
Critère d'altération / évacuations (Calculé)	0,24	0,30	X	X	1,00	0,68	X	0,30	X	0,25	0,07	0,20	2,10	0,24
Critère altération / évacuations (Catégorie)	0	1	X	X	3	2	X	1	X	1	0	0	3	0
Critère état / évacuations (Jugement en catégorie)	1	3	X	X	1	3	X	1	X	1	1	2	3	1
Famille altération majoritaire	CB - D	CB	-	-	CB	CB	-	PM	-	autres	-	autres	autres	N

Tableau 92 : Résultat de l'état des lieux des évacuations d'eaux pluviales

D'après la Figure 55, les évacuations d'eaux les plus préoccupantes sont celles situées sur l'ancien prieuré (bâti E) et celles situées sur la Villa Russe (bâti M). L'ancien prieuré souffre de ces évacuations d'eaux pluviales étant donné que la toiture a été conçue pour ne pas en avoir mais du fait de sa vieillesse, les rebords de toiture ne jouent plus leur rôle puisque l'eau touche l'extrémité des chevrons et la panne sablière est impactée. Contrairement à l'ancien prieuré, la Villa Russe présente des équipements pour l'évacuation des eaux de pluie, cependant celles-ci sont en très mauvais état et n'assurent plus leur rôle.

Les défauts visualisés sont principalement de l'obstruction des canalisations par des colonisations biologiques (feuilles, plantes) qui engendraient des ruissellements sur l'enveloppe extérieure et/ou sur des éléments de charpente.

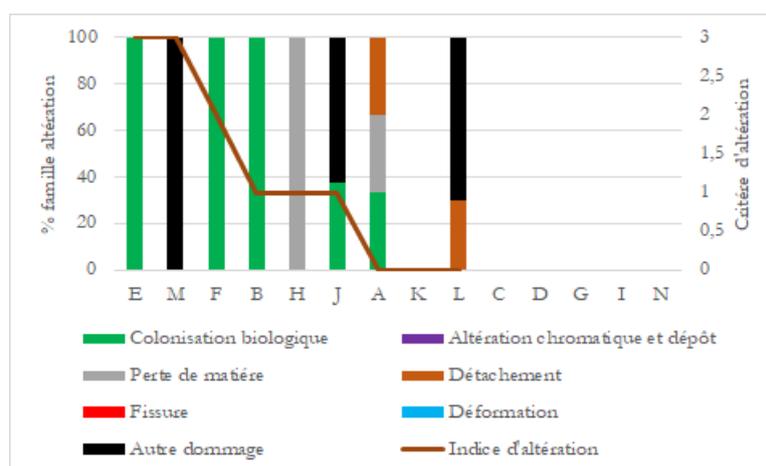


Figure 55 : Pourcentage des familles d'altérations et le critère d'altération des évacuations d'eaux pluviales en fonction des bâtis

4.2.2.2.4 Enveloppes extérieures

Les enveloppes extérieures intègrent les matériaux de construction des façades mais également d'éléments architecturaux tels que les menuiseries, les portes, les escaliers, les auvents, les balcons, les volets et divers éléments décoratifs. Nous nous limitons ici aux désordres liés aux matériaux constitutifs des façades.

4.2.2.2.4.1 Matériaux constitutifs des façades

Dans le cas des façades des bâtis anciens, il existe différentes typologies qui peuvent être rencontrées comme des murs en maçonnerie en pierre de taille, des murs en pan de bois revêtus ou non d'enduits, des murs en béton, des murs en bois, des murs en briques et des murs en moellons. Les façades en maçonnerie, principalement rencontrées dans la cadre de notre corpus, concernent des murs composés de mortier et de pierre naturelle.

Les pierres naturelles utilisées pour la construction peuvent provenir de trois grandes familles de roches existantes : les roches magmatiques (ex : pierre de Volvic utilisé lors de la construction de la cathédrale de Clermont-Ferrand), les roches métamorphiques (exemple : marbre de carrare utilisé par les sculpteurs) et les roches sédimentaires (ex : calcaire de type Saint-Maximin très connu pour les façades haussmanniennes de Paris).

Chacune des enveloppes extérieures a été inspectés pour déterminer la composition des murs parfois accompagné ou non d'un petit prélèvement pour déterminer la nature du matériau. Les matériaux constitutifs des enveloppes des bâtis de notre corpus sont principalement composés de roche provenant de carrières situées à proximité. Par exemple, la chapelle de l'Hôpital (bâti K) située à Clermont-Ferrand est composée de pierres de taille d'une pierre magmatique certainement la pierre de Volvic, son lieu d'extraction est situé à 12 km de Clermont-Ferrand. Cette pierre est connue pour sa couleur gris foncé et ses caractéristiques mécaniques : masse volumique apparente 2100 à 2400 kg/m³, porosité de 22,4% et résistance à la compression de 57 MPa [PRO ROC 2007].

Les altérations principales relevées sur cette pierre de lave sont principalement la présence de petites plantes qui poussent dans des zones non protégées, la présence de zone d'assombrissement dû à des remontées capillaires et la présence de petites altérations telles que des fragments (probablement dû à des chocs). La synthèse des observations se trouve dans le tableau suivant :

Bâti :	Composition des façades	Nature des matériaux	Bâti :	Composition des façades	Nature des matériaux
A	Murs en maçonnerie : pierre de taille	Roche sédimentaire	H	Murs en maçonnerie	Roche volcanique
B	Murs en maçonnerie : pierre de taille et moellons – Pierre sèche	Roche magmatique	I	Murs en maçonnerie (grès rose de Noyac)	Roche sédimentaire
C	Murs en maçonnerie : pierre de taille	Roche sédimentaire	J	Murs en béton et maçonnerie de pierre	Béton pour l'église la plus récente et roche sédimentaire pour l'église la plus ancienne
D	Murs en maçonnerie de moellons	Roche magmatique	K	Murs en maçonnerie de pierre : pierre de taille aile principale et maçonnerie de moellons enduits autres ailes	Roche magmatique
E	Murs en maçonnerie et moellons	Roche sédimentaire (grès du bourbonnais) et roche volcanique (granit)	L	Soubassement en pierre, remplissage en brique et structure métallique	Roche volcanique
F	Murs en maçonnerie pierre de taille et colombage	Maçonnerie de de roche sédimentaire (pierre des Eyzies)	M	Murs en maçonnerie, pierre de taille aux encadrements	Roche magmatique (pierre de Farges)
G	Murs en maçonnerie	Moellons (roche sédimentaire et magmatique) et pierre de taille aux encadrements	N	Soubassement en roche nature inconnue et élévation structure métal	Roche nature inconnue

Tableau 93 : Informations concernant les principaux matériaux utilisés sur les enveloppes extérieures

4.2.2.4.2 Etat des lieux

Les résultats concernant l'état des lieux de l'enveloppe extérieure (EXT) sont résumés dans le Tableau 94. Le critère d'altération calculé varie entre 0,12 (pour le bâti E) et 0,52 (pour le bâti B). Les principales familles d'altération rencontrées sont les colonisations biologiques, les pertes de matières et les altérations chromatiques.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
Critère d'altération / EXT (calculé)	0,35	0,52	0,21	0,18	0,12	0,25	0,15	0,25	0,24	0,28	0,22	0,48	0,34	X
Critère altération / évacuations (catégorie)	1	2	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	X
Critère état / EXT (jugement en catégorie)	1	3	2	1	2	1	2	1	2	2	3	2	2	X
Famille altération majoritaire	CB	CB	CB	CB	CB	CB	PM	PM	PM	CB	PM	AC	D	CB

Tableau 94 : Résultat de l'état des lieux des enveloppes extérieures

D'après la Figure 56, on peut déterminer que l'enveloppe extérieure la plus altérée est celle du château de Murol (bâti B). En effet, les façades des enceintes extérieures du château de Murol souffrent de nombreux problèmes dont la présence de colonisations biologiques qui engendrent des poussées et donc des déformations des maçonneries. Cependant, ces façades extérieures ne concernent pas l'ensemble du château mais seulement celle de l'enceinte extérieure. Dans un second temps, la figure permet de montrer les altérations les plus fréquentes : les colonisations biologiques, les fissures, les détachements et les pertes de matières.

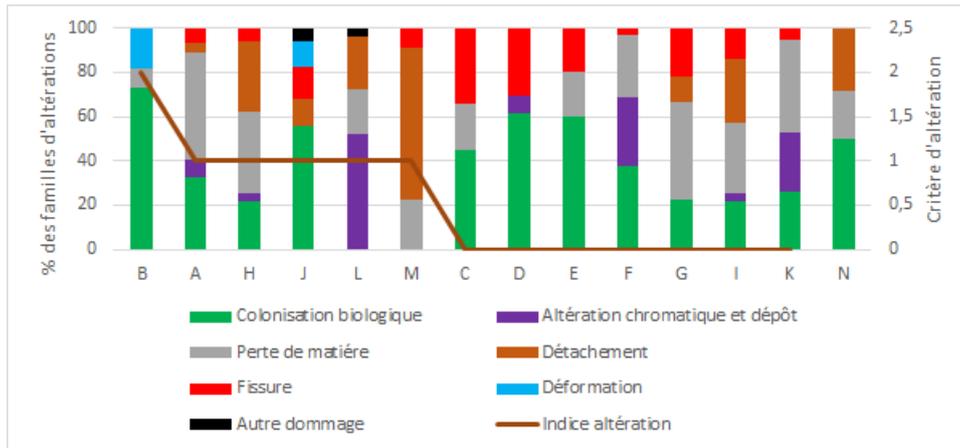


Figure 56 : Pourcentage des familles d'altérations et le critère d'altération des enveloppes extérieures en fonction des bâtis

Les colonisations biologiques les plus retrouvées sur les parois externes sont les microorganismes (ex : les algues), les mousses et les petites plantes. La Figure 57 ne permet pas de créer un lien entre la pluviométrie et la quantité des altérations relevées.

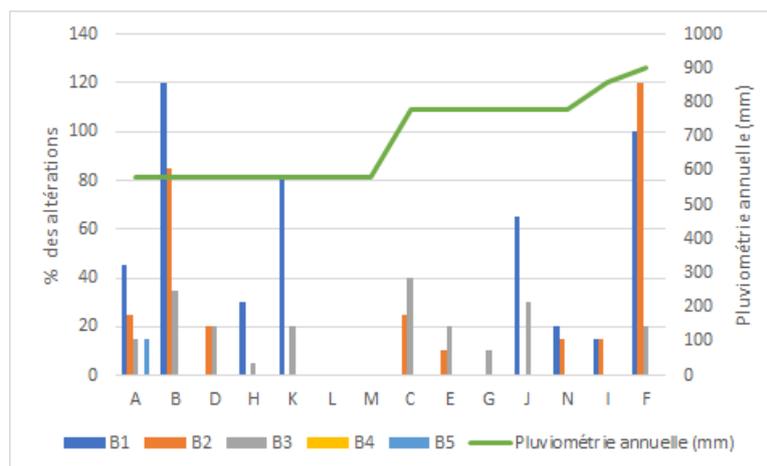


Figure 57 : Pourcentage des altérations relevées et pluviométrie annuelle en fonction des bâtis

Les fissures de type F1 relevées sur les enveloppes extérieures peuvent être des conséquences d'un défaut de la structure (exemple : défaut de capacité portante, altération des maçonneries) et des conséquences liées à l'environnement de la structure. Pour cette dernière hypothèse, nous avons tracé deux graphes représentant le pourcentage de fissures relevées sur les parois en fonction de deux paramètres qui peuvent engendrer des désordres de types structuraux tels que des fissures. Ces deux paramètres sont celui lié aux risques sismiques et celui lié aux risques de sécheresse (paragraphe 3.1.1.2.1 du chapitre 3).

Le bâti présentant un pourcentage de fissures le plus élevé est la Porte d'Occident situé à Charroux. D'après la Figure 58, elle est située dans une zone de sismicité ayant une gravité de 3 et le risque de sécheresse ayant une gravité de 2.

La Porte d'Occident est une structure rectangulaire qui comporte sur chacune de ces faces des fissures verticales qui ont été colmatées à l'aide d'un mortier hydraulique. Lors de l'état des lieux, nous avons préconisé dans un premier temps une étude structurale avec la mise en place de jauges en

ouverture/fermeture et en cisaillement, afin de vérifier qu'elles ne sont plus évolutives. Puis dans un deuxième temps, nous proposons d'effectuer une étude de renforcement puisque la structure n'a pas été renforcée et le bâti est toujours situé dans un risque sismique important.

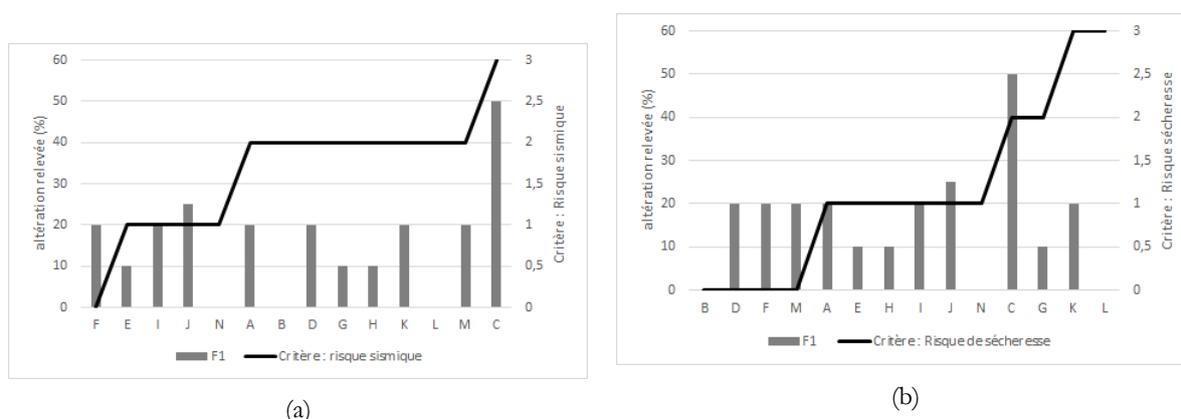


Figure 58 : Pourcentage des altérations relevées en fonction du critère lié au risque sismique (a) et en fonction du critère lié au risque de sécheresse (b)

La famille d'altération « perte de matière » regroupe neuf sous-familles, mais d'après la Figure 59, les altérations touchant les bâtis du corpus sont l'érosion PM1, l'alvéolisation PM2, les dégâts mécaniques PM3, les pertes de mortiers PM4 et les lacunes PM5. Ces altérations peuvent être la conséquence de l'action d'intempéries (i.e. : pluie, gélivité, vent), ou d'actions humaines (i.e. : pollution, mauvais nettoyage) qui engendrent ces altérations. Les figures suivantes ne permettent pas d'identifier un lien entre la quantité d'altérations des bâtis de notre corpus et les aléas tels que la pluviométrie et la gélivité.

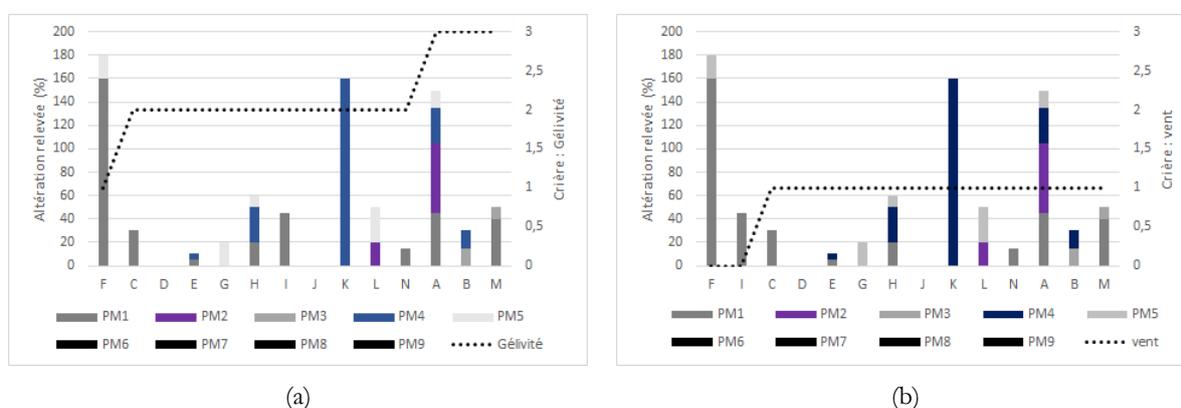


Figure 59 : Pourcentage des altérations de la famille perte de matière relevé en fonction du critère lié à la gélivité (a) et du critère lié au vent (b)

4.2.2.2.5 Intérieur des bâtis

L'intérieur des bâtis est composé de matériaux d'élévation verticale, des matériaux constituant les planchers ainsi que des fondations et de tout le reste (escalier, menuiserie, portes). Cette partie est la plus compliquée dans un état des lieux étant donné que l'ensemble est dense et souvent la présence de revêtements et des problèmes d'accès ne permettent pas de voir correctement les altérations. Il est important de visiter, si possible, la cave du bâti parce que cela donne rapidement une idée de l'état des fondations, le rez de chaussée, un niveau supérieur et les combles.

D'après la Figure 60, on peut déterminer l'intérieur le plus préoccupant qui correspond à celui de la chapelle de l'ancien hôpital (bâti L) puisqu'il a le critère d'altération le plus important.

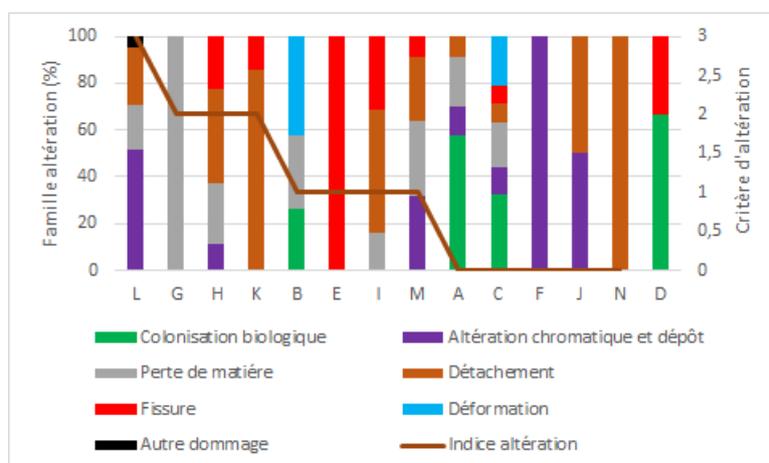


Figure 60 : Pourcentage des familles d'altérations et critère d'altération de l'intérieur de chaque bâti

En effet, il présente des altérations chromatiques et des détachements qui entraînent une perte des décors et donc une perte d'informations. Ces altérations sont la conséquence des défauts de la toiture qui engendrent des ruissellements d'eau et des tâches sur l'ensemble des décors. Dans le rapport de l'état des lieux remis au maître d'ouvrage, nous avons proposé à la suite de la réfection de la toiture des travaux de restauration sur ces décors : assèchement naturelle des maçonneries et décors, consolidation des enduits existants, restauration et réfection des enduits réalisés au mortier de chaux et enfin restauration des décors peints. Également, nous préconisons une mise en sécurité immédiate sur l'ensemble des voûtes vu que les décors se détachent en plaques.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
Critère d'altération / intérieur (calculé)	0,22	0,28	0,17	0,20	0,30	0,15	0,70	0,57	0,38	0,20	0,69	0,80	0,35	0,08
Critère altération / intérieur (catégorie)	0	1	0	0	1	0	2	2	1	0	2	3	1	0
Critère état / intérieur (jugement en catégorie)	1	1	1	1	0	1	1	3	2	2	1	3	1	1
Famille altération majoritaire	CB	De	CB	CB	F	AC	PM	D	D	AC-D	D	PM	AC-PM	D

Tableau 95 : Etat des lieux des intérieurs

Nous avons également détecté un assombrissement des pierres à la base des façades extérieures, ces assombrissements semblaient engendrés une altération de l'épiderme de la pierre. Ils correspondent à des remontées capillaires impactant l'épaisseur du mur, vu qu'à l'intérieur de l'édifice il a été visualisé une altération de l'enduit en partie basse des murs et des efflorescences blanches sur le sol.

Dans un premier temps, nous avons conseillé de réparer l'ensemble des descentes d'eaux pluviales pour éviter que l'eau ruisselle sur la maçonnerie et dans un second temps nous proposons que le maître d'ouvrage fasse intervenir un bureau d'études pour effectuer un diagnostic humidité.

De plus, le bâti présente des fissures structurales sur les voûtes et les pignons. Les fissures situées sur les voûtes ont été qualifiées d'anciennes [ACA 2015] cependant l'effet de l'eau provenant de la toiture doit être arrêté. Des fissures ont été instrumentées sur les murs pignons et ont montré une évolution en ouverture de 0,1 à 0,2 mm environ. Sauf pour une fissure instrumentée sur l'aile Est, qui est la plus problématique

puisqu'elle a un comportement évolutif en ouverture (0,5 mm en ouverture et 2 mm en désaffleurement). Nous avons préconisé, entre autres, que le phénomène soit confirmé par la reprise des mesures.

4.2.3 Synthèse

Les résultats ci-dessus mettent en évidence les corps d'état des bâtis les moins et les plus dégradés associés aux altérations. Nous avons présenté les résultats de cinq corps d'état des bâtis sur lesquels l'état des lieux a été effectué et a montré que le critère d'altération calculé variait entre 0,07 pour l'écoulement des eaux pluviales de la chapelle de l'hôpital (bâti K) et 2,10 pour l'écoulement des eaux pluviales de la Villa Russe (bâti M).

Chaque corps d'état a été caractérisé par le critère d'altération calculé et le critère d'altération catégorisé qui permet de déterminer rapidement les bâtis les moins ou les plus dégradés pour chacun des corps d'état. Les résultats sont synthétisés dans le tableau suivant :

	Critère altération calculé le moins important	Critère altération calculé le plus important
Couverture	Château de Murol (Bâti B)	Chapelle de l'Hôpital (Bâti K)
	Remarque : la toiture inspectée est celle de la salle de garde. Les autres toitures (dont celle d'une chapelle) n'ont pas pu être visualisées.	Remarque : sa toiture est recouverte de pierres de lave où l'étanchéité entre les pierres est assurée par un mastic. Celui-ci se détache, la toiture n'est plus étanche.
Charpente	Ancienne église Ste Marie (Bâti F)	Villa Russe (Bâti M)
		Remarque : des désordres structuraux et des attaques récentes d'insectes à larves xylophages sont présents.
Enveloppe extérieure	Ancien prieuré (Bâti E)	Enceinte externe du château de Murol (Bâti B)
	Remarque : l'ancien prieuré ne souffre pas de désordres spécifiques à part que les fissures situées à l'intérieur dans les combles n'ont pas été visualisées à l'extérieur du fait de la présence de colonisation biologique et du fait de la maçonnerie hétérogène.	Remarque : elle souffre de problèmes de colonisations biologiques qui engendrent des chutes de matériaux ; elle souffre également de problèmes structuraux (déformations, chutes) qui sont mis en évidence par critère d'intégrité élevé.
Intérieur	Kiosque (Bâti N)	Marché Saint Joseph
	Remarque : Le kiosque est globalement en bon état. Sa structure est ouverte sur l'extérieur. Lors de l'inspection principalement le plancher et la structure métallique en partie haute ont été visualisés et classés dans la catégorie intérieure.	Remarque : son sous-sol est recouvert de nombreux déchets qui favorisent le risque de propagation de feu. Par ailleurs, il existe également un problème d'étanchéité entre le rez-de-chaussée et le sous-sol parce que des traces de calcite sont présentes. Le plancher avait été consolidé par un béton projeté sur les voûtes. Il faudrait s'assurer que le dallage en béton du rez de chaussée soit étanche car après le marché hebdomadaire, le nettoyage est fait à grandes eaux

Tableau 96 : Détermination des corps d'état les moins ou les plus dégradés en fonction du critère d'altération

L'histogramme de la Figure 61 correspond à la somme des critères d'altération. Cet histogramme ne permet pas une comparaison directe des bâtis puisque la plupart des bâtis n'ont pas cinq critères d'altérations (certaines zones n'étaient pas accessibles lors de l'intervention ou n'existent pas).

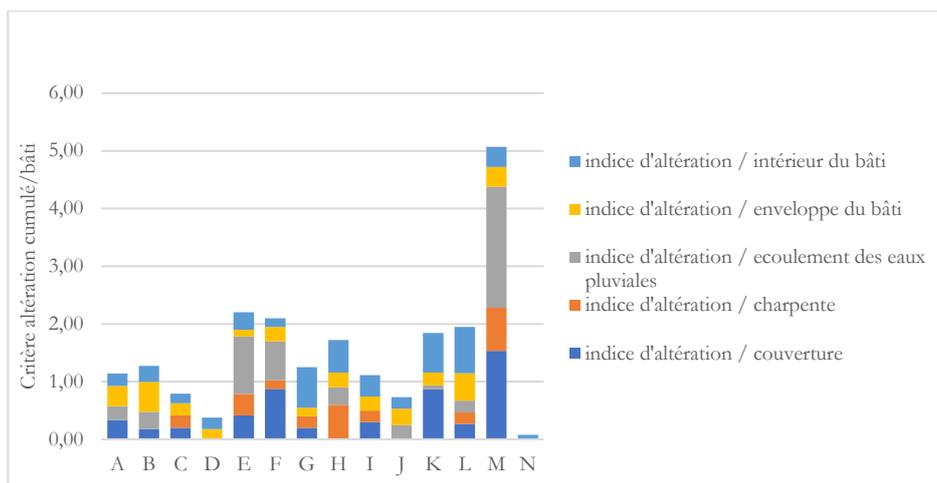


Figure 61 : Histogramme représentant le critère d'altération cumulé en fonction des bâtis

Suite à la détermination de ces critères d'altération, nous avons proposé de les catégoriser à l'aide des classifications proposées dans le Tableau 78.

Nous proposons de représenter les résultats sous forme de graphe radar pour la Villa Russe (bâti M). Le graphe de la Figure 62 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** met en évidence que les trois corps d'état suivants ont une influence les uns sur les autres : couverture, charpente et écoulements. En effet si la toiture est en mauvais état, il y a un risque plus important que la charpente soit touchée ou si les écoulements d'eaux pluviales sont en mauvais état, il y a un risque également que l'eau réussisse à rentrer dans le bâti et à dégrader les matériaux.

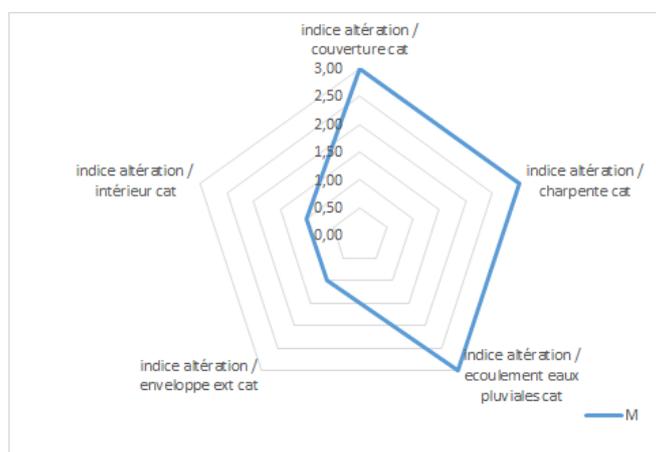


Figure 62 : Critères d'altérations des cinq corps d'état du bâti M

Les altérations les plus présentes sont les colonisations biologiques (33%) représentées avec les mousses et les micro-organismes, elles sont retrouvées sur presque l'ensemble des bâtis de notre corpus. La tendance montrerait que les bâtis les plus anciens sont plus revêtus (en pourcentage de surface) de colonisation biologique d'après la Figure 63.

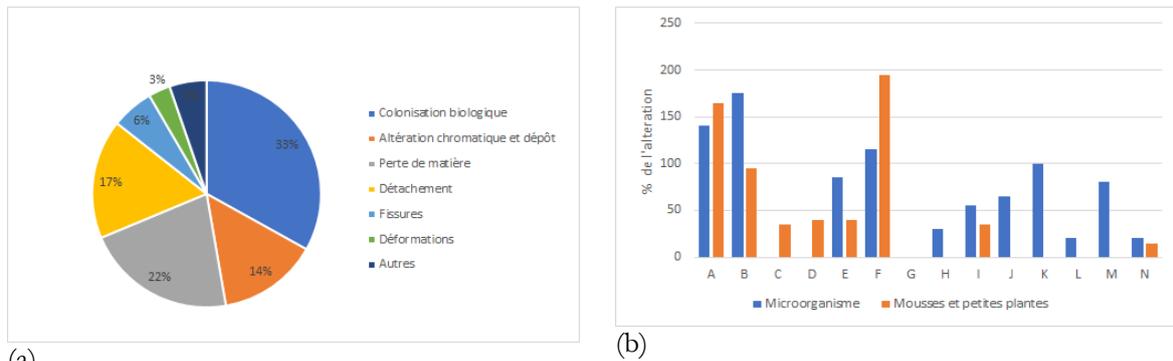


Figure 63 : (a) Pourcentage de chaque famille d'altération (b) Répartition des deux sous-familles d'altérations les plus répandues

Notre corpus n'a pas permis de créer un lien entre la quantité des altérations relevés et les aléas tel que la pluviométrie, cela est peut-être dû à l'hétérogénéité des bâtis et/ou des matériaux. Il serait intéressant d'essayer de mettre en évidence un lien entre les typologies de matériaux utilisés et les altérations (selon leur famille et/ou leur quantité).

Par ailleurs, dans ce chapitre nous n'avons pas mentionné l'ancienneté du bâti vu qu'il n'est plus dans son état originel, il a subi des travaux, des remplacements, des nettoyages, etc. Pour aborder l'ancienneté, il faudrait un historique exhaustif des travaux effectués sur les différents matériaux composant les corps d'état. Les documents retrouvés par les recherches documentaires effectuées avant intervention ne permettent pas d'avoir un détail exhaustif de l'ensemble des travaux effectués depuis leur construction.

Synthèse du quatrième chapitre

La démarche de gestion préventive a été appliquée sur un corpus composé de 14 bâtis hétéroclites. L'illustration et l'application de la méthodologie se sont décomposés en deux parties :

- Présentation du corpus : l'ensemble du travail effectué s'est basé sur ce corpus, il est composé de quatorze bâtis hétérogènes. Chacun des bâtis est présenté brièvement avec son utilisation et sa gestion actuelle ;
- Application de la démarche de gestion préventive sur l'ensemble du corpus. Chacun des bâtis et des corps d'état a été caractérisé par un critère d'altération caractérisé lui-même par ses altérations. Nous aurions voulu mettre en évidence un lien entre des facteurs externes tel que la pluviométrie et son altération, mais ce lien n'a pas été mis en valeur probablement parce que nous n'avons pas assez d'échantillons.

La démarche de gestion préventive a été appliquée sur les quatorze bâtis, les principaux résultats sont synthétisés dans le tableau suivant :

	Sw couverture	Sw charpente	Sw équipement	Sw extérieur	Sw intérieur	C1	C2
A	0,33		0,24	0,35 (max)	0,22	2	1
B	0,18		0,30	0,52 (max)	0,28	2	3
C	0,20	0,22		0,21	0,52 (max)	2	2
D				0,18	0,20 (max)	0	1
E	0,41	0,37	1,00 (max)	0,12	0,30	3	3
F	0,88 (max)	0,15	0,68	0,25	0,15	3	1
G	0,20	0,20		0,15	0,70 (max)	2	1
H		0,60 (max)	0,30	0,25	0,57	2	1
I	0,30	0,20		0,24	0,38 (max)	1	2
J			0,25	0,28 (max)	0,20	1	1
K	0,87 (max)		0,07	0,22	0,69	3	3
L	0,27	0,20	0,20	0,48	0,80 (max)	3	0
M	1,53	0,75	2,10 (max)	0,34	0,35	3	2
N					0,15 (max)	0	0

Tableau 97 : Synthèse de l'application de la démarche de gestion préventive

Chapitre 5 : Application des modèles d'agrégation

Introduction

Dans le chapitre précédent la démarche de gestion préventive (anamnèse, diagnostic, thérapie et contrôle) a été appliquée. Ce cinquième chapitre vise à appliquer les modèles d'agrégation.

Ce cinquième chapitre s'articule autour des quatre étapes :

- Evaluation des critères sur un bâti ;
- Proposition d'une hiérarchisation des bâtis ;
- Application du modèle d'agrégation des indicateurs ;
- Détermination de la durée de vie résiduelle ;
- Proposition et hiérarchisation d'actions de maintenance.

La Figure 64 présente en rouge le contenu de ce chapitre par rapport à la globalité des travaux de thèse.

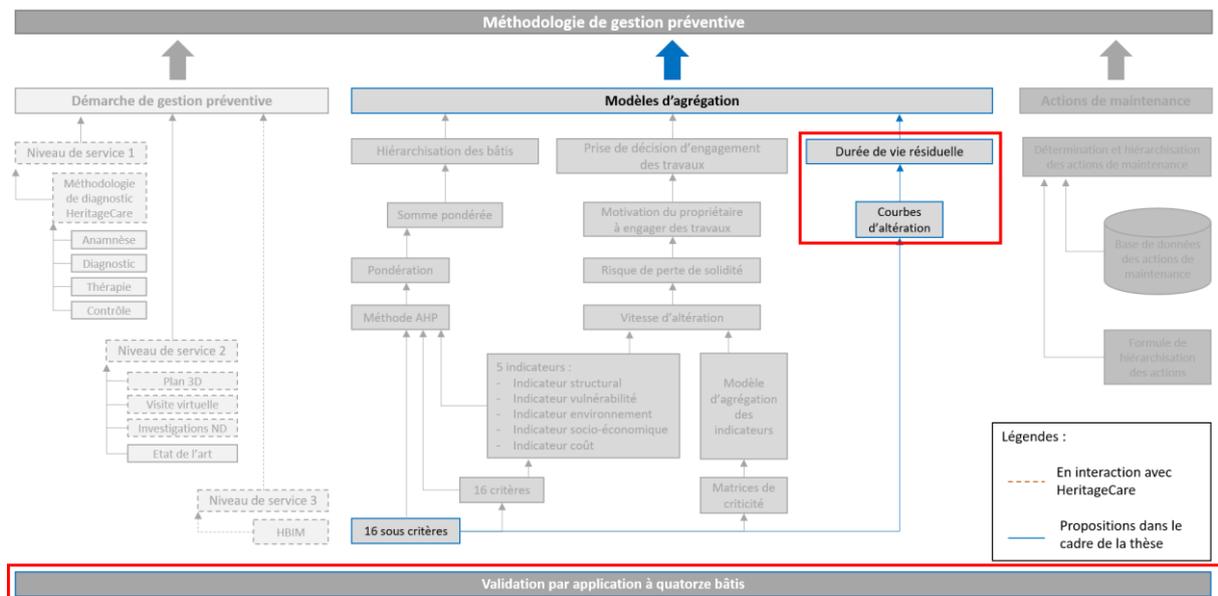


Figure 64 : Contenu de la thèse présenté dans ce chapitre 4

5.1 Evaluation des critères

Pour chacun des bâtis de notre corpus, nous avons évalué les critères et nous avons utilisé les résultats précédemment déterminés du critère d'altération et du critère d'intégrité. A titre d'exemple, l'évaluation des critères pour le bâti A est détaillée dans le tableau suivant :

	Données brutes pour le bâti A	Transformation en gravité pour le bâti A
Indicateur structurale		
Critère d'altération	S_w couverture = 0,33 S_w charpente = NA (non déterminé puisque nous n'avons pas eu accès) S_w EEP = 0,24 S_w enveloppe = 0,35 S_w intérieur = 0,22 Donc S_w bâti = max (0,33 ; 0,24, 0,35, 0,22) = 0,35	C1 = 1 (Tableau 78)
Critère d'intégrité	I_{PVA} = 70% I_{PHA} = 0% I_{CA} = 0% Donc I_{SA} = max (70 ; 0 ; 0) = 0	C2 = 1 (Tableau 84)
Indicateur de sévérité de l'environnement		
Pluviométrie	Data ²⁰ : dans la région Auvergne-Rhône-Alpes les centrales météo sont à Vichy, Clermont-Ferrand, Le Puy, Aurillac, Montélimar, et Bourg-Saint-Maurice. La station météo France la plus proche de Saint Nectaire est celle de Clermont-Ferrand. Donc la pluviométrie annuelle est de 578,8mm.	SC1 = 2 (Tableau 34)
Vent	D'après la carte des vents de la Figure 12 : Carte de France découpée en quatre zones d'intensité [Afnor 2005] Figure 12, le bâti A est situé dans les régions de type 2.	SC2 = 1 (Tableau 35)
Gel/Dégel	D'après la carte de la Figure 13, le bâti A est situé en zone de gel sévère (zone D).	SC3 = 1 (Tableau 36)
Distance du front de mer	Le bâti A est situé à environ 200 km d'un front de mer.	SC4 = 0 (Tableau 37)
Foudroiement	Le bâti A est situé en zone modérée de la carte de la Figure 15.	SC5 = 2 (Paragraphe « Influence de l'impact de la foudre »)
Température	D'après le paragraphe « Influence de la variation de la température », la station météorologique de météo France la plus proche du bâti A est celle de Clermont-Ferrand. Les températures accessibles sont : Tmax en juillet 26.5°C, Tmin - 0.1°C. Le delta de température est donc de 26.6°C.	Le delta de température est de 26.6°C donc la gravité est de 2 (Tableau 40) SC6 = 2
Risque sismique	D'après le paragraphe « Influence du risque sismique » et la carte de la Figure 17 le bâti A est située en zone modérée.	SC7 = 2 (Tableau 41)
Risque sécheresse	D'après le paragraphe « Influence du risque de sécheresse » et des données situées sur le site http://www.georisques.gouv.fr/ : l'aléa est considéré comme faible.	SC8 = 1 (Tableau 42)

²⁰ <http://www.meteofrance.com/climat/france/auvergne-rhone-alpes/regin10/normale>

	Données brutes pour le bâti A	Transformation en gravité pour le bâti A
Indicateur de sévérité de l'environnement (suite)		
Champignon lignivore	D'après le paragraphe « Influence des champignons lignivores » et la carte de la Figure 18, le bâti A situé dans le département 63, ce dernier présente 5 à 15% des chantiers déclarés comme infectés.	SC9 = 2
Termite	D'après le paragraphe « Influence des termites » et la carte de la Figure 19, le pourcentage d'infestation est inconnu.	SC10 = 0
Occupation dans le bâtiment	D'après le paragraphe « Influence de l'occupation du bâti », le bâti n'est pas habité.	SC11 = 0 (Tableau 43)
Pollution	D'après le paragraphe « Influence de la pollution atmosphérique », le nombre d'habitants est de 356.	SC12 = 0 (Tableau 44)
Site touristique	D'après le paragraphe « Influence de l'attractivité touristique du site », le bâti A est peu touristique.	SC13 = 1 (Tableau 45)
Changement de fonction du bâti	D'après le paragraphe « Influence du changement de fonction du bâti », le bâti a peu changé de fonction puisqu'il est devenu un bâti faiblement touristique.	SC14 = 1 (Tableau 47)
Etat des installations	D'après le paragraphe « Influence de l'état des installations / équipements », le bâti ne présente pas d'installations spécifiques (absence d'électricité et d'arrivée d'eau) donc il est considéré comme étant en sécurité.	SC15 = 0 (Tableau 48)
Risque au vandalisme	D'après le paragraphe « Influence du vandalisme », le bâti reste très facilement accessible par le cimetière qui est ouvert en journée et le bâti est également ouvert la journée. Cependant la densité de population est faible donc nous proposons que le risque de vandalisme soit faible.	SC16 = 1 (Tableau 46)
Indicateur de vulnérabilité		
Maintenance	D'après le paragraphe « Influence de la politique de maintenance », la maintenance du bâti est moyennement active. Le bâti est la plupart du temps accessible et il est propre à l'intérieur. Une personne doit passer régulièrement pour nettoyer.	C7 = 1 (Tableau 50)
Ancienneté	D'après le paragraphe « Influence de l'ancienneté » le bâti date de l'époque du haut Moyen Age (VIe au Xe siècle).	C8 = 3 (Tableau 50)
Protection	D'après le paragraphe « Influence de la présence ou non d'une protection » le bâti présente une protection au titre des monuments historiques.	C9 = 0 (Tableau 50)
Typologie architecture	D'après le paragraphe « Influence de la typologie architecturale », le bâti est un monument funéraire.	C10 = 2 (Tableau 50)
Indicateur socio-économique		
Enjeux	D'après le paragraphe « Indicateur socio-économique », le bâti est utilisé comme lieu public ouvert sans activité économique puisque il est ouvert au tourisme mais sa visite est gratuite.	C11 = 2 (Tableau 51)
Valeur patrimoniale	D'après le paragraphe « Indicateur socio-économique », le bâti est classé.	C12 = 3 (Tableau 51)

	Données brutes pour le bâti A	Transformation en gravité pour le bâti A
Indicateur de coût		
Typologie des travaux	D'après le paragraphe « Indicateur de coût », les préconisations proposées sont des réparation modérée et/ou des investigations complémentaires. Car principalement nous avons préconisé dans le rapport 1/Vérifier lors des jours de pluie qu'il n'y a pas d'infiltrations dans la coupole 2/Diagnostic humidité 3/ Diagnostic des fissures	C13 = 2 (Tableau 52)
Aide financière	D'après le paragraphe « Indicateur de coût », comme le bâti est classé, il peut avoir de l'aide de l'Etat supérieure à 50%	C14 = 0 (Tableau 52)
Volume concerné	D'après le paragraphe « Indicateur de coût », le volume concerné est faible car la structure est composée d'une seule pièce cylindrique et d'un accès.	C15 = 1 (Tableau 52)
Accès	D'après le paragraphe « Indicateur de coût », l'accès peut être compliqué puisque le bâti est situé à Saint Nectaire (environ une heure de Clermont-Ferrand) et il est situé dans un cimetière avec un terrain non plat et des pierres tombales tout autour.	C16 = 2 (Tableau 52)

Tableau 98 : Détail de l'évaluation de la gravité des critères pour le bâti A

Les résultats des évaluations de tous les bâtis sont situés dans le tableau suivant :

		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
Ind1	Indicateur structural														
C1	Critère d'altération	1	2	2	0	3	3	2	2	1	1	3	3	3	0
C2	Critère intégrité	1	3	2	1	3	1	1	1	2	1	3	0	2	0
Ind2	Indicateur de sévérité de l'environnement														
C3	Critère environnement courant	2	2	2	2	2	1	2	2	1	2	2	2	2	2
SC1	Pluviométrie annuelle (en mm)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
SC2	Vent	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1
SC3	Gel/dégel	3	3	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	3	2
SC4	Distance du front de mer	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SC5	Foudroiement	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2
SC6	Température	2	2	2	2	2	1	2	2	1	2	2	2	2	2
C4	Critère environnement extrême														
SC7	Risque sismique	2	2	3	2	1	0	2	2	1	1	2	2	2	1
SC8	Risque sécheresse	1	0	2	0	1	0	2	1	1	1	3	3	0	1
C5	Critère environnement biologique														
SC9	Champignon lignivore	2	2	2	2	2	1	2	2	1	2	2	2	2	2
SC10	Termite	0	0	0	0	0	2	0	0	2	0	0	0	0	0
C6	Critère environnement anthropique														
SC11	Occupation dans le bâtiment	0	2	1	1	2	1	0	0	1	1	0	1	3	0
SC12	Pollution	0	0	0	1	0	1	1	1	1	2	3	3	0	2
SC13	Site touristique	1	3	0	1	0	3	0	1	1	2	1	1	0	1
SC14	Changement de fonction du bâti	1	3	0	0	2	3	2	0	0	0	3	0	0	0
SC15	État des installations	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SC16	Risque au vandalisme	1	1	1	2	0	1	1	1	1	1	1	1	0	2
Ind3	Indicateur de vulnérabilité (Ind3)														
C7	Maintenance	1	2	1	1	1	3	1	2	1	1	1	1	1	1
C8	Ancienneté	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	1	1	1	1
C9	Protection	0	0	1	3	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1
C10	Typologie architecture	2	0	0	0	3	1	1	1	1	1	1	1	3	2
Ind4	Indicateur socio-économique														
C11	Enjeux	2	3	0	2	1	3	0	2	2	2	3	3	1	2
C12	valeur patrimoniale	3	3	2	0	2	3	2	3	2	2	2	2	2	2
Ind5	Indicateur de coût														
C12	Typologie des travaux	2	3	1	1	3	1	2	2	3	3	3	2	3	0
C13	Aide financière	0	0	1	3	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1
C14	Volume concerné	1	3	1	0	2	1	1	3	2	0	2	2	2	0
C15	Accès	2	2	0	3	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1

Tableau 99 : Evaluation des critères pour l'ensemble des bâtis

5.2 Hiérarchisation des bâtis

5.2.1 Hiérarchisation sans pondération

Dans une première approche, nous ne considérons pas les pondérations (importances relatives accordées à chaque critère) afin de pouvoir voir dans un second temps leur impact sur le classement des bâtis.

Les critères correspondent à la moyenne des valeurs prises par ses sous-critères et les indicateurs sont égaux à la moyenne des valeurs prises par ses critères constitutifs, tel que détaillé ci-après et illustré sur le bâti A.

Les équations sont les suivantes :

Equations générales :	Equations pour le bâti A :
$Ind1 = \frac{C1 + C2}{2}$	$Ind1 = \frac{1 + 1}{2} = 1,0$
$Ind2 = \frac{C3 + C4 + C5 + C6}{4}$	$Ind2 = \frac{1,7 + 1,5 + 1,0 + 0,5}{4} = 1,2$
avec :	avec :
$C3 = \frac{SC1 + SC2 + SC3 + SC4 + SC5 + SC6}{6}$	$C3 = \frac{2 + 1 + 3 + 0 + 0 + 2}{6} = 1,7$
$C4 = \frac{SC7 + SC8}{2}$	$C4 = \frac{2 + 1}{2} = 1,5$
$C5 = \frac{SC9 + SC10}{2}$	$C5 = \frac{2 + 0}{2} = 1,0$
$C6 = \frac{SC11 + SC12 + SC13 + SC14 + SC15 + SC16}{6}$	$C6 = \frac{0 + 0 + 1 + 1 + 0 + 1}{6} = 0,5$
$Ind3 = \frac{C7 + C8 + C9 + C10}{4}$	$Ind3 = \frac{1 + 3 + 0 + 2}{4} = 1,5$
$Ind4 = \frac{C11 + C12}{2}$	$Ind4 = \frac{2 + 3}{2} = 2,5$
$Ind5 = \frac{C13 + C14 + C15 + C16}{4}$	$Ind5 = \frac{2 + 0 + 1 + 2}{4} = 1,3$

Les résultats de ces équations sont présentés ci-dessous.

		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
Ind1	Indicateur structural	1,0	2,5	2,0	0,5	3,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,0	3,0	1,5	2,5	0,0
C1	Critère d'altération	1	2	2	0	3	3	2	2	1	1	3	3	3	0
C2	Critère intégrité	1	3	2	1	3	1	1	1	2	1	3	0	2	0
Ind2	Indicateur de sévérité de l'environnement	1,2	1,3	1,4	1,1	1,0	1,0	1,3	1,1	1,1	1,1	1,6	1,5	1,0	1,1
C3	Critère environnement courant	2	2	2	2	2	1	2	2	1	2	2	2	2	2
SC1	Pluviométrie annuelle (en mm)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
SC2	Vent	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1
SC3	Gel/dégel	3	3	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	3	2
SC4	Distance du front de mer	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SC5	Foudroiement	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2
SC6	Température	2	2	2	2	2	1	2	2	1	2	2	2	2	2
C4	Critère environnement extrême	1,5	1,0	2,5	1,0	1,0	0,0	2,0	1,5	1,0	1,0	2,5	2,5	1,0	1,0
SC7	Risque sismique	2	2	3	2	1	0	2	2	1	1	2	2	2	1
SC8	Risque sécheresse	1	0	2	0	1	0	2	1	1	1	3	3	0	1
C5	Critère environnement biologique	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
SC9	Champignon lignivore	2	2	2	2	2	1	2	2	1	2	2	2	2	2
SC10	Termite	0	0	0	0	0	2	0	0	2	0	0	0	0	0
C6	Critère environnement anthropique	0,5	1,5	0,5	0,8	0,7	1,5	0,7	0,5	0,7	1,0	1,3	1,0	0,5	0,8
SC11	Occupation dans le bâtiment	0	2	1	1	2	1	0	0	1	1	0	1	3	0
SC12	Pollution	0	0	0	1	0	1	1	1	1	2	3	3	0	2
SC13	Site touristique	1	3	0	1	0	3	0	1	1	2	1	1	0	1
SC14	Changement de fonction du bâti	1	3	0	0	2	3	2	0	0	0	3	0	0	0
SC15	État des installations	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SC16	Risque au vandalisme	1	1	1	2	0	1	1	1	1	1	1	1	0	2
Ind3	Indicateur de vulnérabilité (Ind3)	1,5	1,3	1,3	1,8	2,0	1,8	1,5	1,5	1,5	1,3	1,0	1,0	1,5	1,3
C7	Maintenance	1	2	1	1	1	3	1	2	1	1	1	1	1	1
C8	Ancienneté	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	1	1	1	1
C9	Protection	0	0	1	3	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1
C10	Typologie architecture	2	0	0	0	3	1	1	1	1	1	1	1	3	2
Ind4	Indicateur socio-économique	2,5	3,0	1,0	1,0	1,5	3,0	1,0	2,5	2,0	2,0	2,5	2,5	1,5	2,0
C11	Enjeux	2	3	0	2	1	3	0	2	2	2	3	3	1	2
C12	valeur patrimoniale	3	3	2	0	2	3	2	3	2	2	2	2	2	2
Ind5	Indicateur de coût	1,3	2,0	0,8	1,8	1,5	0,5	1,0	1,3	1,8	1,0	1,5	1,3	1,8	0,5
C12	Typologie des travaux	2	3	1	1	3	1	2	2	3	3	3	2	3	0
C13	Aide financière	0	0	1	3	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1
C14	Volume concerné	1	3	1	0	2	1	1	3	2	0	2	2	2	0
C15	Accès	2	2	0	3	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1

Tableau 100 : Première méthode de traitement sans les pondérations

La Figure 65 présente sous forme d'histogramme les valeurs prises par les indicateurs pour les 14 bâtis. Les bâtis sont classés par valeurs décroissantes, le bâti B est le premier tandis que le bâti N est le dernier. Cette

première hiérarchisation utilise les cinq indicateurs avec la même importance. Cependant dans la réalité un gestionnaire sera plus préoccupé par l'entretien de son bâti pour générer une activité économique plus importante que par son état structural. C'est pourquoi dans le paragraphe suivant nous illustrons la mise en place de coefficients de pondérations.

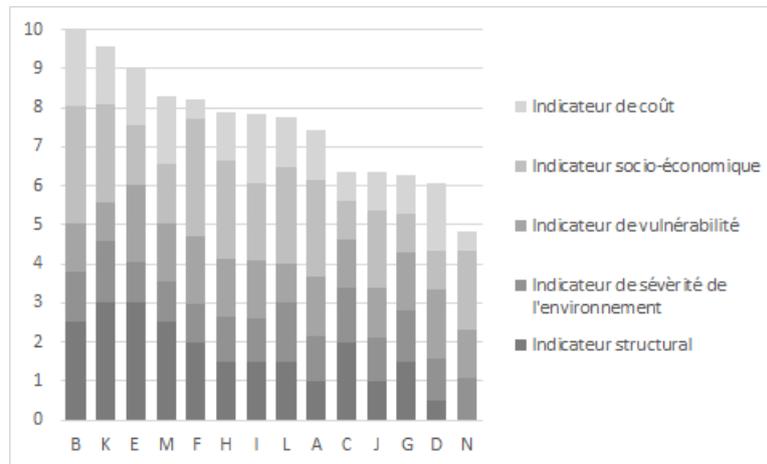


Figure 65 : Histogramme présentant les résultats des indicateurs obtenus (en ordonnée) en fonction des bâtis (en abscisse)

5.2.2 Hiérarchisation avec pondération

Nous intégrons pour cette deuxième approche les pondérations obtenues en appliquant la méthode AHP (cf. Chapitre 3). Les valeurs des critères sont obtenues en faisant la somme pondérée des valeurs prises par ses sous critères. De même, les indicateurs sont obtenus par la somme pondérée des valeurs de ses critères.

5.2.2.1 Etape 1 : détermination de Ind1

L'indicateur structural est composé du critère d'altération ayant un poids de 0,250 et du critère d'intégrité ayant un poids de 0,750 tel qu'il est défini à la figure suivante :



Figure 66 : Rappel de la représentation graphique de l'indicateur 1

Par exemple, l'indicateur structural pour le bâti A, est obtenu par l'équation suivante :

$$Ind1_i = (0,250 \times 1) + (0,750 \times 1) = 1,000 \quad (20)$$

Les résultats de l'indicateur structural sont les suivants :

Ind1	Indicateur structural	w	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
C1	Critère d'altération	0,250	1	2	2	0	3	3	2	2	1	1	3	3	3	0
C2	Critère intégrité	0,750	1	3	2	1	3	1	1	1	2	1	3	0	2	0
	Somme pondérée	1	1,000	2,750	2,000	0,750	3,000	1,500	1,250	1,250	1,750	1,000	3,000	0,750	2,250	0,000

Tableau 101 : Résultats de l'indicateur structural avec la somme pondérée

L'histogramme de la Figure 67 permet de visualiser les bâtis ayant l'indicateur structural le moins bon (c'est-à-dire le plus élevé), ils correspondent aux bâtis E et K. Il permet également de visualiser les bâtis ayant l'indicateur structural le meilleur (c'est-à-dire le moins élevé), ils correspondent aux bâtis D et M.

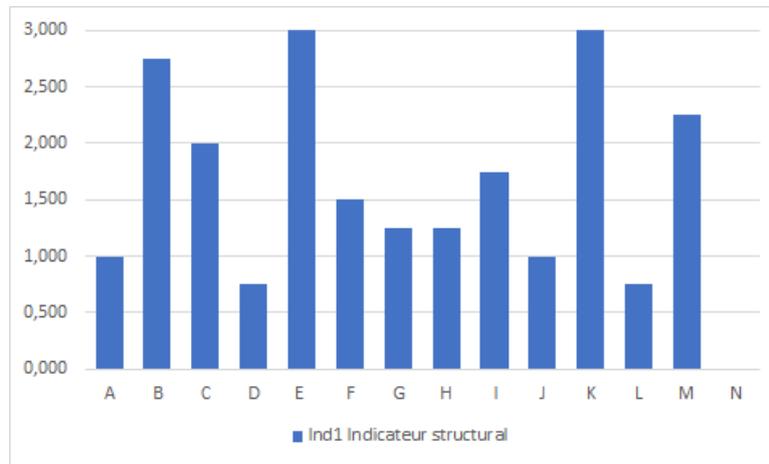


Figure 67 : Résultat de l'indicateur structural en ordonnée en fonction des bâtis en abscisse

5.2.2.2 Etape 2 : détermination de Ind2

L'indicateur de sévérité de l'environnement, tel qu'il est défini à la Figure 68, est composé de critères et de sous critères.

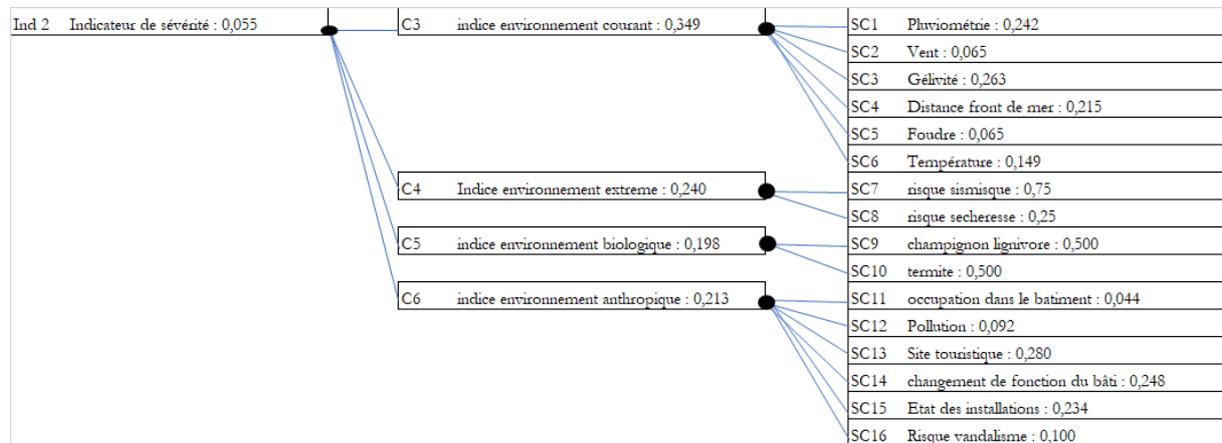


Figure 68 : Rappel de la représentation graphique de l'indicateur 2

5.2.2.2.1 Détermination de C3

Le critère C3 est calculé comme suite :

$$C3 = SC1 \times w_{SC1} + SC2 \times w_{SC2} + SC3 \times w_{SC3} + SC4 \times w_{SC4} + SC5 \times w_{SC5} + SC6 \times w_{SC6} \quad (21)$$

Par exemple pour le bâti A, nous avons effectué le calcul suivant :

$$2 \times 0,242 + 1 \times 0,065 + 3 \times 0,263 + 0 \times 0,215 + 2 \times 0,065 + 2 \times 0,149 = 1,767 \quad (22)$$

Cette opération est répétée pour chaque bâti. Les résultats sont dans le Tableau 102.

C3	Critère environnement courant	w	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
SC1	Pluviométrie annuelle	0,242	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
SC2	Vent	0,065	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1
SC3	Gel/dégel	0,263	3	3	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	3	2
SC4	Distance du front de mer	0,215	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SC5	Foudroiement	0,065	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2
SC6	Température	0,149	2	2	2	2	2	1	2	2	1	2	2	2	2	2
Somme des poids /somme pondérée		1	1,767	1,767	1,504	1,504	1,504	0,962	1,504	1,504	1,290	1,504	1,504	1,504	1,767	1,504

Tableau 102 : Résultats de C3 en intégrant les pondérations

5.2.2.2.2 Détermination de C4

Pour déterminer C4, nous procédons de la même manière que pour déterminer C3. Nous obtenons les résultats suivants :

C4	Critère environnement extrême	w	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
SC7	Risque sismique	0,750	2	2	3	2	1	0	2	2	1	1	2	2	2	1
SC8	Risque sécheresse	0,250	1	0	2	0	1	0	2	1	1	1	3	3	0	1
Somme des poids /somme pondérée		1	1,750	1,500	2,750	1,500	1,000	0,000	2,000	1,750	1,000	1,000	2,250	2,250	1,500	1,000

Tableau 103 : Résultats de C4 avec la somme pondérée

5.2.2.2.3 Détermination de C5

Pour déterminer C5, nous procédons de la même manière que pour déterminer C3. Nous obtenons les résultats suivants :

		w	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
SC9	Champignon lignivore	0,500	2	2	2	2	2	1	2	2	1	2	2	2	2	2
SC10	Termite	0,500	0	0	0	0	0	2	0	0	2	0	0	0	0	0
Somme pondérée		1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,500	1,000	1,000	1,500	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Tableau 104 : Résultats de C5 avec la somme pondérée

5.2.2.2.4 Détermination de C6

Pour déterminer C6, nous procédons de la même manière que pour déterminer C3. Nous obtenons les résultats suivants :

C6	Critère environnement anthropique	Poids	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
SC11	Occupation dans le bâtiment	0,044	0	2	1	1	2	1	0	0	1	1	0	1	3	0
SC12	Pollution	0,092	0	0	0	1	0	1	1	1	1	2	3	3	0	2
SC13	Site touristique	0,280	1	3	0	1	0	3	0	1	1	2	1	1	0	1
SC14	Changement de fonction du bâti	0,248	1	3	0	0	2	3	2	0	0	0	3	0	0	0
SC15	État des installations	0,234	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SC16	Risque au vandalisme	0,100	1	1	1	2	0	1	1	1	1	1	1	1	0	2
Somme des poids /somme pondérée		1	0,629	1,775	0,379	0,618	0,586	1,823	0,689	0,473	0,517	0,890	1,403	0,702	0,133	0,665

Tableau 105 : Résultats de C6 avec la somme pondérée

5.2.2.2.5 Détermination de Ind2

Suite à la détermination de C3, C4, C5 et C6 nous pouvons déterminer Ind2, selon la somme pondérée suivante :

$$\text{Ind2} = C3 \times w_{C3} + C4 \times w_{C4} + C5 \times w_{C5} + C6 \times w_{C6} \quad (23)$$

Par exemple pour le bâti A, nous avons effectué le calcul suivant :

$$1,767 \times 0,349 + 1,750 \times 0,240 + 1,000 \times 0,198 + 0,239 \times 0,213 = 1,368 \quad (24)$$

Puis cette opération est répétée pour chaque bâti. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Ind2	w	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
C3 Indice env courant	0,349	1,767	1,767	1,504	1,504	1,504	0,962	1,504	1,504	1,290	1,504	1,504	1,504	1,767	1,504
C4 Indice env extrême	0,240	1,750	1,500	2,750	1,500	1,000	0,000	2,000	1,750	1,000	1,000	2,250	2,250	1,500	1,000
C5 Indice env biologique	0,198	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,500	1,000	1,000	1,500	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
C6 Indice env anthropique	0,213	0,629	1,775	0,379	0,618	0,586	1,823	0,689	0,473	0,517	0,890	1,403	0,702	0,133	0,665
Somme pondérée	1,000	1,368	1,553	1,463	1,214	1,088	1,021	1,350	1,243	1,097	1,152	1,562	1,412	1,203	1,105

Tableau 106 : Résultats de l'Ind2 avec la somme pondérée

La Figure 69 permet de visualiser le bâti ayant un environnement le plus hostile correspondant aux bâti K suivi du bâti B, et le bâti ayant un environnement moins hostile : le bâti F.

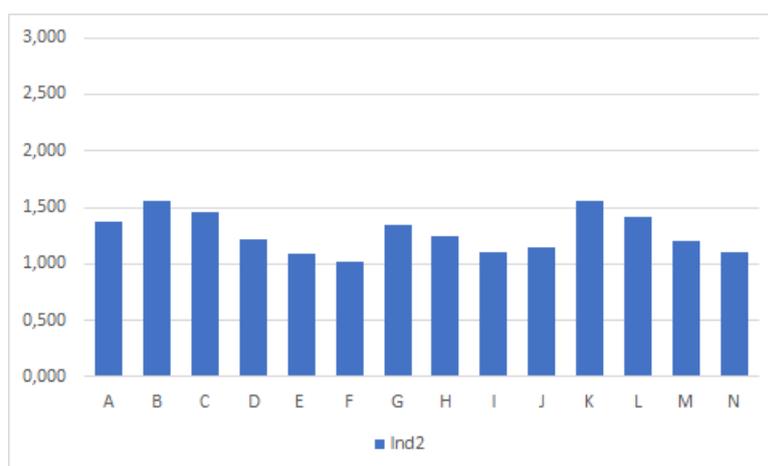


Figure 69 : Histogramme représentant Ind2 en fonction des bâtis

5.2.2.3 Etape 3 : détermination de Ind3

Pour rappel l'indicateur de vulnérabilité, tel qu'il est défini à la Figure 70, est composé de quatre critères : la maintenance, l'ancienneté du bâti, sa protection et sa typologie d'architecture.

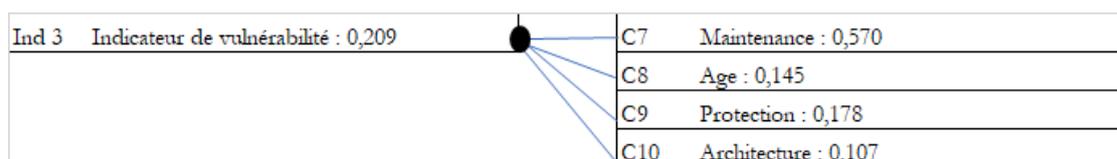


Figure 70 : Rappel de la représentation graphique de l'indicateur 3

Pour déterminer Ind3 nous procédons de la même manière que pour déterminer les indicateurs 1 et 2. Nous obtenons les résultats suivants :

Ind3			A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
C7	Maintenance	0,570	1	2	1	1	1	3	1	2	1	1	1	1	1	1
C8	Ancienneté	0,145	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	1	1	1	1
C9	Protection	0,178	0	0	1	3	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1
C10	Typologie architecture	0,107	2	0	0	0	3	1	1	1	1	1	1	1	3	2
Somme pondérée		1,000	1,220	1,576	1,184	1,540	1,505	2,253	1,291	1,683	1,291	1,145	1,000	1,000	1,214	1,107

Tableau 107 : Résultats de Ind3 avec la somme pondérée

La Figure 71 permet de visualiser le bâti les plus vulnérables, il correspond au bâti F et les bâtis les moins vulnérables : les bâtis K et L.

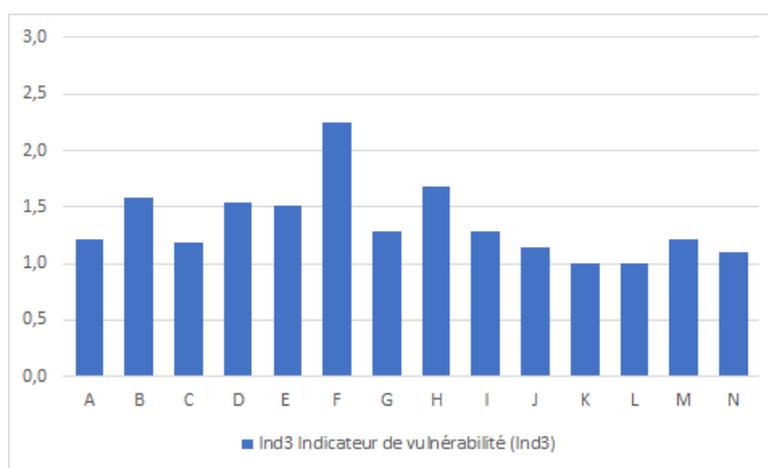


Figure 71 : Histogramme représentant Ind3 en fonction des bâtis

5.2.2.4 Etape 4 : détermination de Ind4

Pour rappel l'indicateur socio-économique, tel qu'il est défini à la Figure 72, est composé de deux critères : valeur patrimoniale et enjeux.

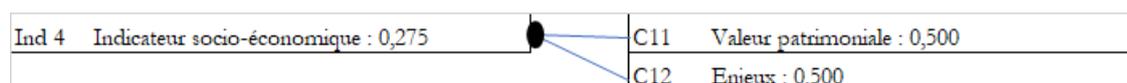


Figure 72 : Rappel de la représentation graphique de l'indicateur 4

Pour déterminer Ind4, nous procédons de la même manière que pour déterminer Ind1 et Ind2. Nous obtenons les résultats suivants :

Ind4	Indicateur socio-économique	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	
C11	Enjeux	0,500	2	3	0	2	1	3	0	2	2	3	3	1	2	
C12	valeur patrimoniale	0,500	3	3	2	0	2	3	2	3	2	2	2	2	2	
	Somme pondérée	1,000	2,500	3,000	1,000	1,000	1,500	3,000	1,000	2,500	2,000	2,000	2,500	2,500	1,500	2,000

Tableau 108 : Résultats de Ind4 avec la somme pondérée

La Figure 73 permet de visualiser les bâtis ayant un rôle socioéconomique important correspondant aux bâtis B et E ; et inversement avec les bâtis C, D et G.

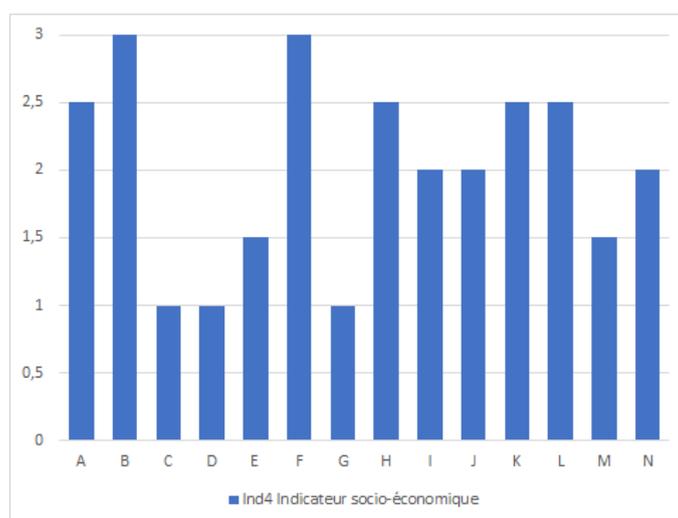


Figure 73 : Résultat de l'Ind4 en ordonnée en fonction des bâtis en abscisse

5.2.2.5 Etape 5 : détermination de Ind5

Pour rappel, l'indicateur coût, tel qu'il est défini à la Figure 74, est composé de quatre critères : typologie des travaux, aide financière, volume concerné par les travaux et accès.

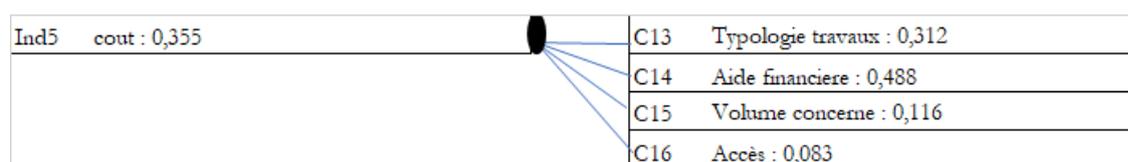


Figure 74 : Rappel de la représentation graphique de l'indicateur 5

Pour déterminer Ind5, nous procédons de la même manière que pour déterminer les indicateurs 1 et 2. Nous obtenons les résultats du Tableau 109.

Ind5		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	
C13	Typologie des travaux	0,312	2	3	1	1	3	1	2	2	3	3	3	2	3	0
C14	Aide financière	0,488	0	0	1	3	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1
C15	Volume concerné	0,116	1	3	1	0	2	1	1	3	2	0	2	2	2	0
C16	Accès	0,083	2	2	0	3	0	0	0	1	0	0	0	1	1	
	Somme pondérée	1,000	0,907	1,452	0,917	2,027	1,657	0,428	1,229	0,973	1,740	1,424	1,657	1,345	1,740	0,572

Tableau 109 : Résultats de Ind5 avec la somme pondérée

L'histogramme de la Figure 75 permet de visualiser les bâtis qui engendrent un coût important pour les propriétaires, ils correspondent aux bâtis D et inversement avec le bâti F.

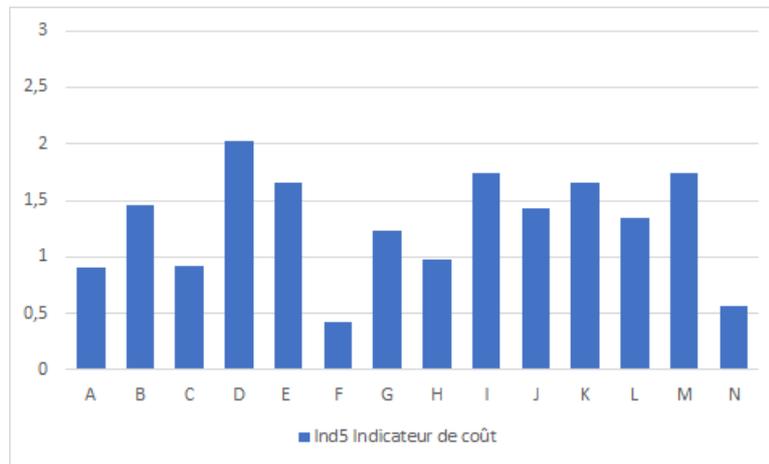


Figure 75 : Histogramme représentant Ind5 en ordonnée en fonction des bâtis en abscisse

5.2.3 Proposition d'une hiérarchisation

Nous hiérarchisons les bâtis à l'aide de la somme pondérée des valeurs prises par les cinq indicateurs. Notre modèle est composé de cinq indicateurs auxquels sont associées des pondérations. La somme de ces pondérations est égale à un.

$$\begin{aligned}
 w_{Ind1} + w_{Ind2} + w_{Ind3} + w_{Ind4} + w_{Ind5} &= 1 \\
 0,106 + 0,055 + 0,209 + 0,275 + 0,355 &= 1
 \end{aligned}
 \tag{25}$$

Par exemple, la somme pondérée pour le bâti A est :

$$\begin{aligned}
 \text{Somme pondérée du bâti A} \\
 &= Ind1 \times w_{Ind1} + Ind2 \times w_{Ind2} + Ind3 \times w_{Ind3} + Ind4 \times w_{Ind4} \\
 &\quad + Ind5 \times w_{Ind5}
 \end{aligned}
 \tag{26}$$

$$1,000 \times 0,106 + 1,368 \times 0,055 + 1,220 \times 0,209 + 2,500 \times 0,275 + 0,907 \times 0,355 = 1,446
 \tag{27}$$

Les résultats pour l'ensemble des bâtis sont dans le Tableau 110.

	w	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
Ind1	0,106	1,000	2,750	2,000	0,750	3,000	1,500	1,250	1,250	1,750	1,000	3,000	0,750	2,250	0,000
Ind2	0,055	1,368	1,553	1,463	1,214	1,088	1,021	1,350	1,243	1,097	1,152	1,562	1,412	1,203	1,105
Ind3	0,209	1,220	1,576	1,184	1,540	1,505	2,253	1,291	1,683	1,291	1,145	1,000	1,000	1,214	1,107
Ind4	0,275	2,500	3,000	1,000	1,000	1,500	3,000	1,000	2,500	2,000	2,000	2,500	2,500	1,500	2,000
Ind5	0,355	0,907	1,452	0,917	2,027	1,657	0,428	1,229	0,973	1,740	1,424	1,657	1,345	1,740	0,572
Somme pondérée	1,000	1,446	2,047	1,140	1,463	1,693	1,663	1,188	1,586	1,684	1,465	1,889	1,532	1,589	1,045

Tableau 110 : Résultats somme pondérée

Le Tableau 111 permet de comparer les deux hiérarchisations avec ou sans prise en compte des pondérations.

Hiérarchisation par valeurs décroissantes sans prise en compte des pondérations		Hiérarchisation par valeurs décroissantes avec prise en compte des pondérations	
2,020	B (Château de Murol)	2,047	B (Château de Murol)
1,920	K (Chapelle de l'hôpital)	1,889	K (Chapelle de l'hôpital)
1,800	E (Ancien Prieuré)	1,693	E (Ancien Prieuré)
1,660	M (Villa Russe)	1,684	I (Notre Dame de Foncourrieu)
1,660	F (Ancienne église Sainte-Marie)	1,663	F (Ancienne église Sainte-Marie)
1,580	H (Abbaye Saint-Pierre)	1,589	M (Villa Russe)
1,580	I (Notre Dame de Foncourrieu)	1,586	H (Abbaye Saint-Pierre)
1,560	L (Marché St Joseph)	1,532	L (Marché St Joseph)
1,500	A (Chapelle Funéraire)	1,465	J (Eglise Saint-Blaise et ND des malades)
1,300	C (Porte d'Occident)	1,463	D (Château de Montrognon)
1,280	J (Eglise Saint-Blaise et ND des malades)	1,446	A (Chapelle Funéraire)
1,260	G (Tour de l'horloge)	1,188	G (Tour de l'horloge)
1,240	D (Château de Montrognon)	1,140	C (Porte d'Occident)
0,980	N (Kiosque du Parc des Bourins)	1,045	N (Kiosque du Parc des Bourins)

Tableau 111 : Comparaison des résultats avec ou sans prise en compte des pondérations

La hiérarchisation est semblable pour les bâtis B, K, E, F, L, G et N. Malgré ces divergences de hiérarchisation, il est possible d'identifier trois groupes de bâtis : B, K, E (les bâtis en plus mauvais état) d'une part, M, F, H, I et L (les bâtis en état intermédiaire) d'autre part et enfin A, C, J, G, D et N (les bâtis dans le meilleur état).

Il est à noter, ce qui correspond à l'un des inconvénients de la somme pondérée lorsqu'il y a de nombreux critères, que la valeur de hiérarchisation (somme pondérée) varie de 1,045 à 2,047 ; ce qui est relativement faible. C'est la raison pour laquelle nous avons développé le modèle d'agrégation des indicateurs dont l'application est présentée dans le paragraphe suivant.

Néanmoins, s'il fallait choisir, l'application de la somme pondérée a révélé que l'alternative la plus appropriée pour le lancement d'un programme de conservation et/ou restauration est l'alternative B qui correspond au château de Murol.

5.3 Modèle d'agrégation des indicateurs

5.3.1 Evaluation de la vitesse d'altération

Dans le paragraphe 3.2.1.1, nous avons proposé d'évaluer la vitesse d'altération en utilisant une matrice de criticité composé de l'indicateur de vulnérabilité et de l'indicateur de sévérité de l'environnement.

Par exemple pour le bâti A, nous avons un indicateur de sévérité de l'environnement de 1,368 nous proposons de lui attribuer la catégorie 1 (étant donné que sa valeur se situe entre 1 et 1,5). De la même façon, l'indicateur de vulnérabilité est de 1,220. Nous proposons de lui attribuer la catégorie 1. D'après notre matrice de criticité du Tableau 112, la vitesse d'altération est lente.

		Indicateur sévérité de l'environnement (Ind2)			
		Banal (0)	Faible (1)	Assez agressif (2)	Très agressif (3)
Indicateur vulnérabilité (Ind3)	Aucun (0)	1	2	1	1
	Faible (1)	3	4	3	4
	Moyen (2)	3	4	4	4
	Elevé (3)	4	4	4	4

Tableau 112 : Matrice de criticité pour déterminer l'évaluation de la vitesse d'altération pour le bâti A : lente

Les résultats de la détermination de la catégorie de la vitesse d'altération montrent cinq bâtis ayant une catégorie de vitesse dite « rapide » : B (château de Murol), D (château de Montrognon), E (ancien prieuré), F (ancienne église), H(abbaye de Mozac). Le Tableau 113 présente les résultats d'évaluation de la vitesse d'altération.

		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
Ind2	Indicateur de sévérité de l'environnement	1,368	1,553	1,463	1,214	1,088	1,021	1,350	1,243	1,097	1,152	1,562	1,412	1,203	1,105
Ind2	Catégorie - Indicateur de sévérité de l'environnement	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1
Ind3	Indicateur de vulnérabilité	1,220	1,576	1,184	1,540	1,505	2,253	1,291	1,683	1,291	1,145	1,000	1,000	1,214	1,107
Ind3	Catégorie - Indicateur de vulnérabilité	1	2	1	2	2	2	1	2	1	1	1	1	1	1
	Evaluation de la vitesse d'altération	2	4	2	4	4	4	2	4	2	2	3	2	2	2

Tableau 113 : Résultat de l'évaluation de la vitesse d'altération

5.3.2 Evaluation du risque de perte de solidité

Dans le paragraphe 3.2.1.2 nous avons proposé d'évaluer le risque de perte de solidité en utilisant une matrice de criticité composée de l'indicateur structural et de l'évaluation de la vitesse d'altération précédemment déterminée.

Par exemple pour le bâti A, nous avons un indicateur structural de 1 ; nous proposons de lui attribuer la catégorie 1. L'évaluation de la vitesse d'altération a été déterminée comme lente. D'après notre matrice de criticité du Tableau 114, le niveau de risque est acceptable.

		Catégorie liée à la vitesse d'altération			
		1	2	3	4
Indicateur structural	0	R1	R1	R1	R1
	1	R1	R1	R2	R2
	2	R1	R2	R2	R2
	3	R2	R2	R2	R3

(a)

Niveaux de risque		Actions requises
R3	Inacceptable	Le risque est inacceptable : des mesures immédiates et d'urgence doivent être prises, il correspond à la mise en péril.
R2	Acceptable sous conditions	Le risque peut être accepté si des actions sont entreprises.
R1	Acceptable	Le risque peut être accepté cependant l'entretien doit être effectué régulièrement

(b)

Tableau 114 : Matrice pour déterminer le risque cas du bâti A- Evaluation de R1

Les résultats du Tableau 115 montrent que deux bâtis présentent des risques intolérables : bâti B (château de Murol) et bâti E (Ancien prieuré situé à Colombiers). Le Tableau 115 présente les résultats de l'évaluation du risque de perte de solidité.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
Indicateur structural (Ind1)	1,000	2,750	2,000	0,750	3,000	1,500	1,250	1,250	1,750	1,000	3,000	0,750	2,250	0,000
Indicateur structural (Ind1) arrondi à l'unité	1	3	2	1	3	2	1	1	2	1	3	1	2	0
Evaluation de la vitesse d'altération	2	4	2	4	4	4	2	4	2	2	3	2	2	2
Evaluation du risque	R1	R3	R2	R2	R3	R2	R1	R2	R2	R1	R2	R1	R2	R1

Tableau 115 : Evaluation du risque de perte de solidité

5.3.3 Evaluation de la motivation du maître d'ouvrage

Dans le paragraphe 3.2.1.3, nous avons proposé d'évaluer la motivation du maître d'ouvrage à lancer des actions de conservation et de restauration sur son patrimoine bâti. En premier lieu, une matrice de criticité a été proposée afin de déterminer sa motivation en utilisant l'indicateur de coût et l'indicateur socio-économique.

Par exemple pour le bâti A, nous avons un indicateur socio-économique de 2,500 ; nous proposons de lui attribuer la catégorie 3. Nous avons un indicateur de coût de 0,907 nous proposons de lui attribuer la catégorie de 1. D'après la matrice de criticité du Tableau 116, l'évaluation de la motivation de maître d'ouvrage a été considérée comme forte.

		Ind5 Indicateur de coût			
		0	1	2	3
Ind4 Indicateur socio-économique	0	M1	M3	M1	M1
	1	M2	M3	M1	M1
	2	M2	M3	M1	M1
	3	M3	M2	M2	M2

Légende :

Niveaux de motivation

M3 Fort
M2 Moyen
M1 Faible

Tableau 116 : Matrice pour évaluer la motivation dans le processus de décisions – cas du bâti A

Le Tableau 117 présente les résultats de l'évaluation de la motivation du décideur. Les résultats montrent que cinq bâtis présentent une motivation forte par leur propriétaire : A, B, F, H et L.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
Indicateur socio-économique (Ind4)	2,500	3,000	1,000	1,000	1,500	3,000	1,000	2,500	2,000	2,000	2,500	2,500	1,500	2,000
Indicateur socio-économique (Ind4) – arrondi à l'unité	3	3	1	1	2	3	1	3	2	2	3	3	2	2
Indicateur de coût (Ind5)	0,907	1,452	0,917	2,027	1,657	0,428	1,229	0,973	1,740	1,424	1,657	1,345	1,740	0,572
Indicateur de coût (Ind5) arrondi à l'unité	1	1	1	2	2	0	1	1	2	1	2	1	2	1
Evaluation de la motivation du MOA	M3	M3	M1	M1	M1	M3	M1	M3	M1	M2	M1	M3	M1	M2

Tableau 117 : Evaluation de la motivation du décideur

En deuxième temps, une matrice décisionnelle a été proposée pour modéliser la décision du propriétaire à lancer les travaux ou non. Cette dernière matrice comprend l'évaluation de la motivation (déterminée précédemment) et l'évaluation du risque (déterminé dans le paragraphe précédent). Par exemple pour le bâti A, nous avons évalué la motivation du propriétaire comme forte et nous avons évalué le risque à acceptable. D'après la matrice de décision du Tableau 118, l'évaluation de décision du maître d'ouvrage a été considérée comme nulle.

		Risque		
		R1	R2	R3
Motivation	M1		D0	D1
	M2		D0	D1
	M3		D0	D1

Légende :
 Actions
 D1 Mise en place des actions
 D0 Absence de mise en place d'actions

Tableau 118 : Matrice pour déterminer les actions du décideur – cas du bâti A

Les résultats montrent que quatre bâtis devraient avoir des actions de conservation et de restauration, ce sont les bâtis B, E, F, et H. Le Tableau 119 présente les résultats de la modélisation de la décision du décideur.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
Evaluation de la motivation du MOA	M3	M3	M1	M1	M1	M3	M1	M3	M1	M2	M1	M3	M1	M2
Evaluation du risque	R1	R3	R2	R2	R3	R2	R1	R2	R2	R1	R2	R1	R2	R1
Evaluation de la décision	D0	D1	D0	D0	D1	D1	D0	D1	D0	D0	D0	D0	D0	D0

Tableau 119 : Evaluation de la décision du décideur

5.4 Détermination de la durée de vie résiduelle

Nous proposons d'utiliser le taux d'altération, suivant le paragraphe 3.3, afin d'obtenir la prévision en années où le critère d'altération atteindra 3 correspondant à la fin de vie du bâti. Pour cela nous avons fait l'hypothèse que l'état initial correspondait à l'âge initial du bâti. Les courbes d'altération ont été tracées en utilisant l'estimation de l'âge du bâti. Nous avons utilisé les catégories que nous avons mises en place pour l'estimation de l'âge et le critère d'altération déterminé en 2018.

Par exemple, pour le bâti A, nous avons fait l'hypothèse que sa date de début de construction était le X^{ème} siècle, c'est-à-dire l'époque du Haut Moyen-Age car elle est délimitée entre le VI^{ème} et le X^{ème} siècle. Dans ce cas-là, la chapelle funéraire aurait une ancienneté de 1019 ans.

L'estimation de l'âge des bâtis est donnée dans le tableau suivant :

Bâti	Siècle de construction retrouvée dans la recherche documentaire	Epoque du début de construction approximative	Estimation de l'âge du bâti
A	X ^{ème} siècle	Haut Moyen-Age (VI ^{ème} – X ^{ème} siècle)	1000
B	XIII ^{ème} siècle	Moyen Age central (XI ^e - XIII ^e siècle)	800
C	XIII ^{ème} siècle	Moyen Age central (XI ^e - XIII ^e siècle)	800
D	XII ^{ème} siècle	Moyen Age central (XI ^e - XIII ^e siècle)	800
E	XV ^{ème} siècle	Moyen Age tardif (XIV - XV ^e siècle)	600
F	XIV ^{ème} siècle	Moyen Age tardif (XIV - XV ^e siècle)	600
G	XV ^{ème} siècle	Moyen Age tardif (XIV - XV ^e siècle)	600
H	XV ^{ème} siècle	Moyen Age tardif (XIV - XV ^e siècle)	600
I	XII ^{ème} siècle	Moyen Age central (XI ^e - XIII ^e siècle)	800
J	XVII ^e siècle	Les temps moderne - Le grand siècle (XVII ^e siècle)	300
K	XIX ^e siècle	Le XIX ^e siècle (1800-1900)	100
L	XIX ^e siècle	Le XIX ^e siècle (1800-1900)	100
M	XIX ^e siècle	Le XIX ^e siècle (1800-1900)	100
N	XIX ^e siècle	Le XIX ^e siècle (1800-1900)	100

Tableau 120 : Estimation âge des bâtis

Suite à cette estimation, nous faisons l'hypothèse qu'à l'âge initial leur critère d'altération était nul. Nous pouvons calculer leur taux d'altération a_i pour chacun des bâtis en utilisant l'estimation de l'âge p_i et le critère d'altération S_w . La formule proposée est la suivante :

$$a_i = \frac{S_{wi}}{p_i^3} \quad (28)$$

Par exemple pour le bâti A, nous avons un critère d'altération nul à sa construction t_o , un critère d'altération de 0,35 à t_{2018} et une ancienneté de 1000 ans. Donc nous pouvons calculer le taux d'altération :

$$a_A = \frac{S_{wA}}{p_A^3} = \frac{0,35}{1019^3} = 3,3 \cdot 10^{-10} \quad (29)$$

Suite à la détermination du taux d'altération, nous proposons l'année où le critère d'altération est à son niveau le plus élevé c'est-à-dire 3 ; nous l'appelons t_{fA} . Nous appliquons cette équation :

$$p_A = \left(\frac{S_{wA}}{a_A} \right)^{1/3} = \left(\frac{3}{3,3 \cdot 10^{-10}} \right)^{1/3} = 2085 \quad (30)$$

Dans Tableau 121 nous avons calculé le critère d'altération tous les cent ans. En prenant l'hypothèse que le bâti vient d'être construit, son ancienneté (t) est de zéro, l'année est 1000 et son critère d'altération de zéro.

t	Année	Sw
0	999	0
100	1099	0
200	1199	0,003
300	1299	0,009
400	1399	0,021
500	1499	0,041
600	1599	0,071
700	1699	0,113
800	1799	0,169
900	1899	0,241
1000	1999	0,331
1019	2018	0,35
1100	2099	0,44
1200	2199	0,572
1300	2299	0,727
1400	2399	0,908
1500	2499	1,116
1600	2599	1,355
1700	2699	1,625
1800	2799	1,929
1900	2899	2,269
2000	2999	2,646
2085	3084	3

Tableau 121 : Données pour tracer la courbe d'altération pour le bâti A

Ces données permettent de tracer la courbe d'altération du bâti A (Figure 76).

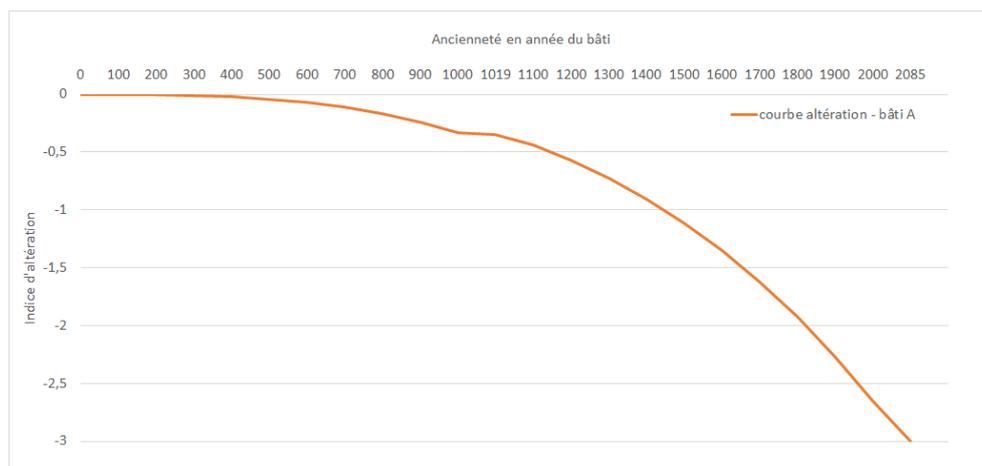


Figure 76 : Courbe d'altération pour le bâti A

L'ensemble de ces étapes sont répétées afin d'obtenir pour chacun des bâtis la durée restante en année avant que leur critère d'altération atteigne trois.

Le tableau suivant synthétise l'ensemble des résultats.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
Estimation âge	1019	819	819	819	619	619	619	619	819	319	119	119	119	119
Critère altération t_0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Critère altération t_{2018}	0,35	0,52	0,22	0,20	1,00	0,88	0,70	0,60	0,38	0,28	0,87	0,80	2,10	0,08
Taux altération ($\times 10^{-10}/\text{an}$)	3	10	4	4	42	37	30	25	6,8	87	5100	4700	12000	450
Prévision de l'année où $S_w=3$	3084	2668	3166	3219	2292	2332	2404	2457	2837	2220	2079	2084	2033	2306
Durée restante en année	1065	649	1147	1200	273	313	385	438	818	201	60	65	14	287

Tableau 122 : Prédiction de l'évolution du critère d'altération

Les courbes d'altération en fonction de l'âge du bâti sont illustrées sur la figure suivante :

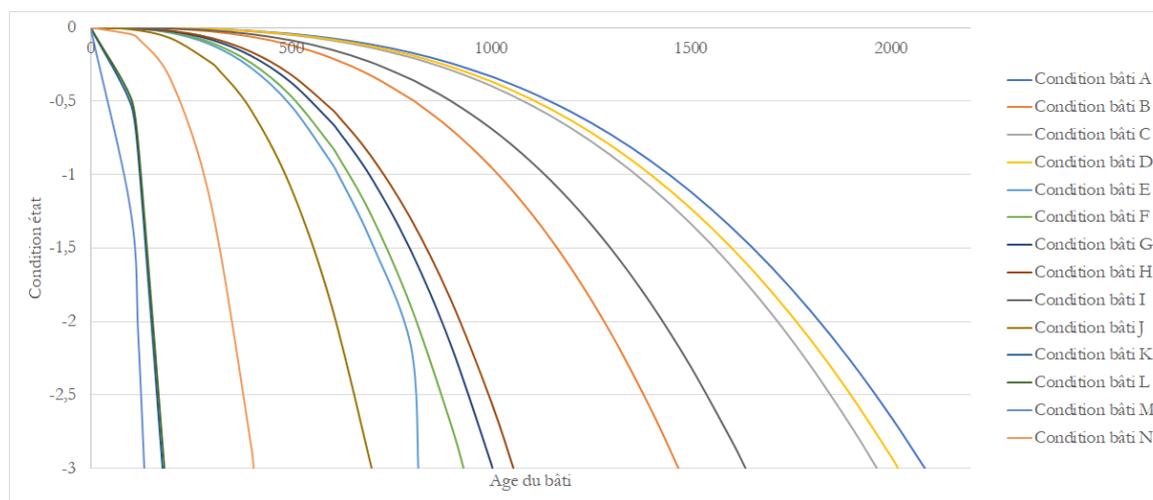


Figure 77 : Courbe d'altération pour l'ensemble des bâtis

En complément des conclusions précédentes, basées sur le modèle d'agrégation des indicateurs, nous pouvons constater qu'en se basant ici uniquement sur un critère technique de cinétique d'évolution des dégradations, les bâtis M, K et L devraient être maintenu en urgence puisqu'ils ont des durées de vie résiduelles de respectivement 14, 60 et 65 ans (alors que la décision est de ne pas intervenir, cf. Tableau 122).

Cette information complémentaire est donc également essentielle pour alerter le propriétaire sur l'urgence des travaux à réaliser.

La démarche de détermination des travaux à réaliser est présentée dans le paragraphe suivant.

5.5 Proposition et hiérarchisation des actions de maintenance

La démarche est présentée sur deux bâtis : le château de Murol (bâti B) et l'ancien prieuré (bâti E). Ces deux bâtis n'ont pas le critère d'altération le plus important mais d'après notre modèle ils ont été sélectionnés par le maître d'ouvrage pour obtenir des mesures de conservation et de restauration.

Nous proposons d'appliquer la catégorie « mesures possibles » telle qu'elle est définie dans le paragraphe 3.4.1.1, puis d'appliquer la hiérarchisation des mesures proposées telle qu'elle est définie dans le 3.4.1.2.

5.5.1 Cas du bâti B

5.5.1.1 Description des préconisations proposées par corps d'état

5.5.1.1.1 Cas de la couverture

Trois typologies de réparation sont associées à la couverture du château de Murol puisque nous avons observé :

Altération	% impacté	Intervention	Urgence	Préconisations
Microorganismes (B1)	10%	Aucune		
Plantes (B3)	10%	Réparations modérées	Immédiat	Remplacement des matériaux composant la toiture
Détachements de matériaux (D6)	10%	Entretien	Moyen terme	Surveillance de l'étendu du matériau détaché

Tableau 123 : Préconisations couverture – bâti B

5.5.1.1.2 Cas des écoulements des eaux pluviales

Deux typologies de réparation sont associées aux écoulements des eaux pluviales puisque nous avons observé :

Altération	% impacté	Intervention	Urgence	Préconisations
Microorganismes (B1)	30%	Entretien		Surveillance des évacuations
Plantes (B3)	30%	Entretien	Court terme	Surveillance des évacuations et un nettoyage afin de retirer si possible les plantes obstruant les évacuations

Tableau 124 : Préconisations écoulements eaux pluviales – bâti B

5.5.1.1.3 Cas de l'enveloppe extérieure

Sept typologies de réparation sont associées à l'enveloppe extérieure du château de Murol qui est décomposée en zones (Z1 : façades intérieures du château, Z2 : façades de l'enceinte intérieure, Z3 : façades du pavillon renaissance, Z4 : façade enceinte extérieure), puisque nous avons observé :

Altération	Zone	% impacté	Intervention	Urgence	Préconisations
Microorganismes (B1)	Z1	25%	Entretien	Moyen terme	Surveillance des matériaux
	Z2	50%			
	Z3	35%			
Mousses et petites plantes (B2)	Z1	20%	Entretien	Court terme	Surveillance des matériaux et de retirer si possible les mousses en faisant attention de ne pas abîmer les matériaux
	Z2	20%			
	Z3	10%			
Plantes (B3)	Z1	5%	Entretien	Court terme	Retirer si possible les plantes en fonction des accès, et de vérifier qu'il n'y a pas d'infiltration à l'intérieur. Si il y a une infiltration il faut refaire un mortier adapté pour colmater la zone où la plante a été retirée
	Z3	15%			
	Z4	15%	Entretien	Immédiat	
Pertes de matières (PM3)	Z2	15%	Entretien	Immédiat	Surveillance de l'étendue de perte de matière
Pertes de matières (PM4)	Z2	15%	Entretien	Immédiat	Surveillance de l'étendue de perte de matière
Déformations (DE1)	Z2	15%	Réparations modérées	Court terme	Détermination de la cause par un diagnostic et de traiter la cause pour arrêter l'évolution de la déformation, puis réparation et consolidation ponctuelle
	Z4	35%			
	Z3	15%			

Tableau 125 : Préconisations enveloppe extérieure – bâti B

5.5.1.1.4 Cas de l'enveloppe intérieure

Cinq typologies de réparation sont associées à l'intérieur du château de Murol puisque nous avons observé :

Altération	% impacté	Intervention	Urgence	Préconisations
Microorganismes (B1)	15% (éléments structuraux verticaux)	Entretien	Court terme	Surveillance des matériaux
Mousses et petites plantes (B2)	10% (éléments structuraux verticaux)	Entretien	Court terme	Surveillance des matériaux et de retirer si possible les mousses et petites plantes en faisant attention de ne pas abîmer les matériaux (exemple : joint de la maçonnerie, décor, enduit, polychromie)
Erosion (PM1)	20% (matériaux finitions)	Entretien	Court terme	Surveillance de l'étendue de la perte de matière
Pertes de mortier (PM4)	20% (éléments structuraux verticaux)	Entretien	Moyen terme	Surveillance de l'étendue de perte de matière
Déformations (DE1)	20% (structures verticales)	Réparations modérées	Court terme	Déterminer la cause par un diagnostic si besoin et de traiter la cause pour arrêter l'évolution de la déformation, puis réparation/ consolidation ponctuelle
	20% (escaliers intérieurs)			

Tableau 126 : Préconisations enveloppe intérieure – bâti B

5.5.1.2 Proposition d'une hiérarchisation des actions à effectuer

Afin de hiérarchiser l'ensemble des actions à effectuer, nous proposons un classement en utilisant le produit *H* défini au paragraphe 3.3.1.2. Dans le cas du château de Murol, le produit *H* le plus élevé correspond à six. Deux actions doivent être effectuées dans un premier temps.

L'ensemble de la hiérarchisation proposée est détaillé dans le tableau suivant :

H	Corps état	Sous-corps d'état	Alt.	Mesures détaillées
6	Couverture		B3	Retirer les colonisations biologiques et traitement à l'aide d'un produit adapté. Réparer et/ou remplacer les matériaux si risque de fuite. Faire attention de ne pas abîmer les matériaux de couverture.
6	Enveloppe extérieure	Enceinte extérieure	DE1	Détermination de la cause par un diagnostic si besoin, traiter la cause pour arrêter l'évolution de la déformation, puis réparation/ consolidation ponctuelle.
4	Enveloppe extérieure	Façade château intérieur	DE1	Détermination de la cause par un diagnostic si besoin, traiter la cause pour arrêter l'évolution de la déformation, puis réparation/ consolidation ponctuelle.
4	Enveloppe extérieure	Pavillon renaissance	DE1	Détermination de la cause par un diagnostic si besoin, traiter la cause pour arrêter l'évolution de la déformation, puis réparation/ consolidation ponctuelle.
4	Intérieur	Éléments structuraux verticaux	DE1	Déterminer la cause par un diagnostic si besoin. Traiter la cause pour arrêter l'évolution de la déformation, puis réparation/ consolidation ponctuelle.
4	Intérieur	Escaliers intérieurs et passerelles	DE1	Déterminer la cause par un diagnostic si besoin. Traiter la cause pour arrêter l'évolution de la déformation, puis réparation/ consolidation ponctuelle.
3	Enveloppe extérieure	Enceinte intérieur 1	PM3	Surveillance de l'étendue de perte de matière.
3	Enveloppe extérieure	Enceinte intérieur 1	PM4	Surveillance de l'étendue de perte de matière.
3	Enveloppe extérieure	Enceinte extérieure	B3	Retirer si possible les plantes en fonction des accès, et vérification qu'il n'y a pas d'infiltration à l'intérieur. Si infiltration refaire un mortier adapté pour boucher la zone où la plante a été retirée.
2	Ecoulement eaux pluviales		B3	Surveillance des évacuations, et retirer si possible les plantes obstruant les évacuations en fonction des accès.
2	Enveloppe extérieure	Façade château intérieur	B2	Surveillance des matériaux et retirer si possible les mousses et petites plantes en faisant attention de ne pas abîmer les matériaux (ex joint de la maçonnerie).
2	Enveloppe extérieure	façade château intérieur	B3	Retirer si possible les plantes en fonction des accès, et vérification qu'il n'y a pas d'infiltration à l'intérieur. Si infiltration refaire un mortier adapté pour boucher la zone où la plante a été retirée.
2	Enveloppe extérieure	Enceinte intérieur 1	B2	Surveillance des matériaux et retirer si possible les mousses et petites plantes en faisant attention de ne pas abîmer les matériaux (ex joint de la maçonnerie).
2	Enveloppe extérieure	Enceinte intérieur 1	B3	Retirer si possible les plantes en fonction des accès, et vérification qu'il n'y a pas d'infiltration à l'intérieur. Si infiltration refaire un mortier adapté pour boucher la zone où la plante a été retirée.
2	Enveloppe extérieure	Enceinte extérieure	B1	Surveillance des matériaux.
2	Enveloppe extérieure	enceinte extérieure	B2	Surveillance des matériaux et retirer si possible les mousses et petites plantes en faisant attention de ne pas abîmer les matériaux (ex joint de la maçonnerie).
2	Enveloppe extérieure	Pavillon renaissance	B2	Surveillance des matériaux et retirer si possible les mousses et petites plantes en faisant attention de ne pas abîmer les matériaux (ex joint de la maçonnerie).
2	Intérieur	Éléments structuraux verticaux	B1	Surveillance des matériaux.
2	Intérieur	Éléments structuraux verticaux	B2	Surveillance des matériaux et retirer si possible les mousses et petites plantes en faisant attention de ne pas abîmer les matériaux (ex joint de la maçonnerie).
2	Intérieur	Matériaux de finition internes	E1	Surveillance de l'étendue de perte de matière.
1	Couverture		D6	Surveillance de l'étendu du matériau détaché.
1	Enveloppe extérieure	Façade château intérieur	B1	Surveillance des matériaux.
1	Enveloppe extérieure	Enceinte intérieur 1	B1	Surveillance des matériaux.
1	Enveloppe extérieure	Pavillon renaissance	B1	Surveillance des matériaux.
1	Intérieur	Éléments structuraux verticaux	PM4	Surveillance de l'étendue de perte de matière.
0	Couverture		B1	Surveillance des matériaux.
0	Ecoulement eaux pluviales		B1	Surveillance des évacuations.

Tableau 127 : Hiérarchisations des actions à effectuer par la maîtrise d'ouvrage pour le château de Murol

5.5.2 Cas du bâti E

5.5.2.1 Description des préconisations proposées par corps d'état

5.5.2.1.1 Cas de la toiture

Quatre typologies de réparation sont associées à la couverture de l'ancien prieuré puisque nous avons observé :

Altération	% impacté	Intervention	Urgence	Préconisations
Microorganismes (B1)	35% de la superficie de la toiture	Entretien	Moyen terme	Surveillance des matériaux
	50% de la superficie du faîtage			
Mousses et petites plantes (B2)	30%	Entretien	Immédiat	Surveillance des matériaux et de retirer si possible les mousses et les petites plantes
Infestations de rongeur (B4)	5%	Entretien	Immédiat	Surveillance des matériaux en bois composant la toiture (ex : liteaux, planches, chevrons)
Lacunes (PM5)	15%	Modéré	Immédiat	Remplacement ponctuel du ou des matériau(x) impacté(s) composant la toiture. Diagnostic pour déterminer la cause et si possible y remédier.

Tableau 128 : Préconisations toiture – bâti E

5.5.2.1.2 Cas de la charpente

Trois typologies de réparation sont associées à la charpente de l'ancien prieuré puisque nous avons visualisé :

Altération	% impacté	Intervention	Urgence	Préconisations
Infestations de rongeur (B4)	20% du volume des fermes et des entres-fermes	Entretien	Moyen terme	Surveillance des matériaux en bois composant la toiture (ex: liteaux, planches, chevrons)
Pourriture (B5)	10% du volume des fermes et des entres-fermes	Entretien	Court terme	Surveillance des matériaux en bois composant la toiture (ex: liteaux, planches, chevrons) et de surveiller les fuites
Déformations (DE4)	20% du volume des fermes et entres-fermes	Entretien	Court terme	Surveillance visuelle de l'étendue de la déformation et essayer de déterminer la cause (en allant dans les combles et/ou en visualisant l'état de la toiture)
Corrosion (D7)	100% des étriers	Entretien	Moyen terme	Surveillance de l'étendu de matériau détaché

Tableau 129 : Préconisations charpente – bâti E

5.5.2.1.3 Cas des écoulements d'eaux pluviales

La charpente de l'ancien prieuré a été associée à une typologie de réparation puisque nous avons visualisé de la pourriture (B5) recouvrant 50% du volume des chevrons. Nous préconisons de l'entretien à court terme, c'est-à-dire une surveillance des matériaux en bois pouvant être en contact avec les descentes d'eaux pluviales.

5.5.2.1.4 Cas de l'enveloppe extérieure

Cinq typologies de réparation sont associées à l'enveloppe extérieure de l'ancien prieuré puisque nous avons visualisé :

Altération	% impacté	Intervention	Urgence	Préconisations
Mousses et petites plantes (B2)	10%	Entretien	Moyen terme	Surveillance des matériaux et retirer si possible les mousses et petites plantes en faisant attention de ne pas abîmer les matériaux (ex : joint de la maçonnerie)
Plantes (B3)	20%	Entretien	Court terme	Retirer si possible les plantes en fonction des accès et d'effectuer une vérification qu'il n'y a pas d'infiltration à l'intérieur une fois les plantes retirées. S'il y a une infiltration il faut refaire un mortier adapté pour obstruer la zone où la plante a été retirée
Erosion (PM1)	5%	Aucune		
Perte de mortier (PM4)	5%	Aucune		
Fissures (F1)	10%	Réparations	Court terme	Déterminer si la fissure est active avec la mise en place de jauge. Si la fissure est stable nous proposons un rebouchage avec un mortier adapté et si la fissure n'est pas stable il faut en déterminer la cause avec un diagnostic.

Tableau 130 : Préconisations enveloppe extérieure – bâti E

5.5.2.1.5 Cas de l'intérieur

L'intérieur de l'ancien prieuré a été associée à une typologie de réparation puisque nous avons visualisé des fissures (F1) impactant 30% de la surface des murs intérieurs. Nous préconisons des réparations à court terme, c'est-à-dire de déterminer si la fissure est active avec la mise en place de jauge. Si la fissure est stable nous proposons un rebouchage avec un mortier adapté et si la fissure n'est pas stable il faut en déterminer la cause avec un diagnostic.

5.5.2.2 Proposition d'une hiérarchisation des actions à effectuer

Afin de hiérarchiser l'ensemble des actions à effectuer, nous proposons un classement en utilisant le produit H défini au paragraphe 3.3.1.2. Dans le cas de l'ancien prieuré, le produit H le plus élevé correspond à six. Deux actions doivent être effectuées dans un premier temps.

L'ensemble de la hiérarchisation proposée est détaillé dans le tableau suivant :

H	Corps état	Sous-corps d'état	Alt.	Mesures détaillées
6	Couverture	Matériaux	PM5	Remplacement ponctuel du ou des matériau(x) impacté(s) composant la toiture. Diagnostic pour déterminer la cause et si-possible y remédier.
6	Charpente	Entre-ferme	DE4	Surveillance visuelle de l'étendue de la déformation, essayer de déterminer la cause (en allant dans les combles et/ou en visualisant l'état de la toiture).
4	Enveloppe du bâti	-	F1	Déterminer si fissure active avec la mise en place de jauge. Si fissure stable, reboucher avec mortier adapté.
4	Intérieur	-	F1	Déterminer si fissure active avec la mise en place de jauge. Si fissure stable, reboucher avec mortier adapté.
3	Couverture	Matériaux	B2	Surveillance des matériaux et retirer si possible les mousse et petites plantes
3	Couverture	Matériaux	B4	Surveillance des matériaux en bois composant la toiture (ex: liteaux, planches, chevrons)
2	Charpente	Ferme	B5	Surveillance des matériaux en bois composant la toiture (ex: liteaux, planches, chevrons). Surveiller les fuites.
2	Charpente	Ferme	DE4	Surveillance visuelle de l'étendue de la déformation, essayer de déterminer la cause (en allant dans les combles et/ou en visualisant l'état de la toiture).
2	Charpente	Entre-ferme	B5	Surveillance des matériaux en bois composant la toiture (ex: liteaux, planches, chevrons). Surveiller les fuites.
2	Ecoulement des eaux pluviales	-	B5	Surveillance des matériaux en bois pouvant être en contact avec la DEP.
2	Enveloppe du bâti	-	B3	Retirer si possible les plantes en fonction des accès, et vérification qu'il n'y a pas d'infiltration à l'intérieur. Si infiltration refaire un mortier adapté pour boucher la zone où la plante a été retirée.
1	Couverture	Matériaux	B1	Surveillance des matériaux.
1	Couverture	Faitage	B1	Surveillance des matériaux.
1	Charpente	Ferme	B4	Surveillance des matériaux en bois composant la toiture (ex: liteaux, planches, chevrons).
1	Charpente	Entre-ferme	B4	Surveillance des matériaux en bois composant la toiture (ex: liteaux, planches, chevrons).
1	Charpente	Etrier	D7	Surveillance de l'étendu de matériau détaché.
1	Enveloppe du bâti	-	B2	Surveillance des matériaux et retirer si possible les mousses et petites plantes en faisant attention de ne pas abîmer les matériaux (ex joint de la maçonnerie).
0	Enveloppe du bâti	-	PM1	Ne rien faire.
0	Enveloppe du bâti	-	PM4	Ne rien faire.

Tableau 131 : Hiérarchisations des actions à effectuer par la maîtrise d'ouvrage pour l'ancien prieuré

Synthèse du cinquième chapitre

Dans un premier temps, nous avons évalué les 37 critères du modèle d'agrégation et l'avons plus particulièrement illustré sur le bâti A (la chapelle funéraire).

Dans un deuxième temps, nous avons proposé deux hiérarchisations, en prenant en compte ou non les pondérations (importances relatives accordées par le propriétaire à chaque critère). L'application de la somme pondérée a révélé que l'alternative la plus appropriée pour le lancement d'un programme de conservation et/ou restauration est l'alternative B qui correspond au château de Murol.

En troisième temps, nous avons appliqué le modèle d'agrégation des indicateurs constitué de matrices de criticité. Les matrices de criticité, dans les résultats sont synthétisés au Tableau 132, permettent de proposer :

- Une évaluation de la vitesse d'altération, ceux présentant une vitesse évaluée comme rapide sont le bâti B (château de Murol), le bâti E (l'ancien prieuré), le bâti F (l'ancienne église Sainte Marie), le bâti H (la tour de l'horloge) et le bâti D (château de Montrognon) ;
- Une évaluation du risque de perte de solidité, ceux présentant un risque inacceptable sont le bâti B et le bâti E ;
- Une modélisation de la décision du propriétaire, ceux dont la réponse est positive pour le lancement des actions sont : le bâti B, le bâti E, le bâti F et le bâti M (Villa Russe).

En quatrième temps, nous avons tracé les courbes d'altérations pour chacun des bâtis, elles permettent de proposer une durée en année restante avant que le critère d'altération n'atteigne la valeur de 3 correspondant à la fin de vie du bâti. D'après notre méthodologie, la durée de vie restante calculée varie entre 14 ans pour le bâti M (Villa Russe) et 1200 ans pour le bâti D (le château de Montrognon).

Enfin, la démarche de détermination des actions de maintenance s'est portée sur deux bâtis qui avaient été déterminés dans la deuxième partie. Pour chacun de ces deux bâtis nous avons présenté et hiérarchisé les actions à mettre en place prioritairement. Cette application est basée sur la base de données des recommandations / actions de maintenance présentée au chapitre 3.

Hiérarchisation par ordre d'importance décroissante avec prise en compte des pondérations	Evaluation de la « vitesse d'altération »	Evaluation du risque de perte de solidité	Evaluation de la décision du décideur	Proposition d'une durée en année restante avant $Sw = 3$
B	4	R3	1	649
K	3	R2	0	60
E	4	R3	1	273
I	2	R2	0	818
F	4	R2	1	313
M	2	R2	1	14
H	4	R2	0	438
L	2	R1	0	65
J	2	R1	0	201
D	4	R2	0	1200
A	2	R1	0	1065
G	2	R1	0	385
C	1	R2	0	1147
N	2	R1	0	287

Tableau 132 : Résultats synthétiques des modèles d'agrégation

En conclusion, six types de résultats peuvent être extraits de nos modèles d'agrégation : la hiérarchisation des bâtis sur la base d'une somme pondérée des indicateurs, l'évaluation de la vitesse d'altération, l'évaluation du risque de perte de solidité, l'évaluation de la motivation du maître d'ouvrage à engager des travaux,

l'évaluation de la cinétique de dégradation et de la durée de vie résiduelle des bâtis, et la proposition et hiérarchisation d'actions de maintenance.

D'après nos modèles le décideur choisirait le bâti B, le bâti E, le bâti F et le bâti M pour lancer des actions en vue de conserver, réparer et ou restaurer. Nous avons proposé de lister et de hiérarchiser les actions pour les bâtis B et E.

Conclusion générale

L'objectif de cette thèse était de développer une méthodologie d'optimisation de gestion préventive, sur le patrimoine culturel et historique, en prenant en compte les aspects patrimoniales, techniques, économiques, environnementaux, de gouvernance et temporels tout en s'adossant au projet HeritageCare.

La première étape a été de présenter le contexte de la thèse avec la définition des travaux d'entretien, les budgets alloués à ces travaux et les conséquences de l'absence de conservation préventive. Le contexte a permis de démontrer que la politique de la conservation préventive dans le cas du patrimoine bâti n'est pas rentrée dans les mœurs. Ce chapitre a permis de développer trois domaines : les méthodologies de gestion préventive, le projet européen HeritageCare et l'identification de l'état de dégradation.

La deuxième étape a été de développer une méthodologie générale de gestion préventive. La méthodologie présentée a été décomposée en quatre étapes (l'anamnèse, le diagnostic, la thérapie, le contrôle).

La troisième étape a été de développer un modèle d'agrégation avec des indicateurs (Ind1 à Ind5), des critères (C1 à C16) et des sous critères (SC1 à SC16). L'ensemble permet d'avoir 37 critères évalués sur une échelle à quatre niveaux. Ces évaluations sont soit déterminées à l'aide de données aisément accessibles, soit à l'aide de la démarche de gestion préventive. Suite à leurs mises en place, des pondérations leur ont été attribuées pour traduire leurs importances relatives.

Un modèle a également été proposé pour prendre en compte la motivation du propriétaire, via des arbres de décision, afin de prendre la décision d'engager ou non des travaux.

Enfin, une base de données des actions de maintenance a été mise en œuvre. Cette base de données permet notamment de hiérarchiser ces actions.

Résultats du modèle d'agrégation

La démarche de gestion préventive a été appliquée sur le corpus composé de quatorze bâtis hétéroclites (protégé ou non, privé ou public). Chacun des bâtis est présenté brièvement avec son utilisation et sa gestion actuelle et a été caractérisé par les 37 critères. Ce qui nous a permis :

- De proposer une hiérarchisation des bâtis en prenant en compte les pondérations (importances relatives accordées par le propriétaire à chaque critère). L'application de la somme pondérée a révélé que l'alternative la plus appropriée pour le lancement d'un programme de conservation et/ou restauration est le château de Murol (B) ;
- De proposer une modélisation de la décision du propriétaire en évaluant la vitesse d'altération (avec l'indicateur de vulnérabilité et l'indicateur d'environnement), le risque de la perte de solidité (avec l'évaluation de la vitesse d'altération et l'indicateur structural) et la motivation du maître d'ouvrage (avec l'indicateur socio-économique et l'indicateur de coût). Le modèle incite quatre propriétaires à lancer des travaux de restauration ;
- De proposer des courbes d'altération. Elles permettent de déterminer la durée restante en années avant que le critère d'altération devienne maximal. La durée restante en années oscille entre 1147 et 14 ans ;

- De proposer une base de données des actions de maintenance (voir Annexe 9). Cette application s'est portée sur deux bâtis où ont été décrites et hiérarchisées les actions de maintenance.

Perspectives

La conservation préventive du patrimoine immobilier culturel et historique est actuellement une science méconnue. C'est pourquoi, la première perspective de travail passerait par la diffusion des connaissances à l'ensemble des acteurs du patrimoine puisqu'aujourd'hui il n'existe pas de formation professionnelle ou universitaire. À la suite nous proposons des axes de recherche et de son application.

Diffusion et formation

Comme nous l'avons vu, il n'y a pas encore de budget pour l'entretien ou plutôt la conservation préventive. Cependant, cet aspect va devenir dans les prochaines années crucial, suite notamment au tragique incident survenu récemment sur la Cathédrale Notre Dame de Paris. Pour que la politique de conservation préventive devienne réelle, cela doit passer par de la diffusion d'informations et de la formation :

- Dans le cadre de la thèse et du projet HeritageCare nous n'avons pas réussi à intégrer les principaux acteurs du patrimoine protégé, notamment les directions régionales de l'architecture et du patrimoine. Nous proposons donc de leur transmettre ce manuscrit et de proposer une discussion suite à la soutenance. Pour le patrimoine non protégé, la Fondation du Patrimoine a été notre interlocuteur, nous proposons également de leur transmettre le manuscrit et de les inviter pour la soutenance afin de conserver la relation avec HeritageCare-France ;
- La finalité du projet a été d'ouvrir l'association HeritageCare-France. Cette association a pour but d'organiser régulièrement des séminaires à destination des gestionnaires, propriétaires, services techniques et autres acteurs dans le domaine du patrimoine afin de les sensibiliser à la conservation préventive. De plus, ce projet de thèse m'a permis de donner un cours au sein du Master 2 MAPE, ce cours détaille le diagnostic et l'entretien du patrimoine culturel et historique.

Recherche et applications

Dans le cadre de ce travail nous avons utilisé une méthode d'agrégation totale (la somme pondérée) pour hiérarchiser les bâtis à maintenir en priorité. Cette méthode combine une famille cohérente de critères. Néanmoins, pour nous assurer que la méthode d'agrégation n'a pas d'incidence sur la hiérarchisation des bâtis, notamment la compensation des évaluations des critères, il pourrait être intéressant d'appliquer une méthode d'agrégation partielle, telle qu'Electre Tri.

Les propriétaires sont alertés de l'urgence des travaux à réaliser sur la base d'une courbe d'altération globale. Réaliser des visites régulières de suivi permettrait de conforter la validité de cette courbe ou de l'actualiser par une approche markovienne. De plus, une perspective à ces travaux de recherche est de développer un outil plus précis de comparaison des différentes stratégies de maintenance qui pourrait combiner : la nature des travaux réalisables, la cinétique de dégradation des matériaux et des structures et le coût de ces travaux.

Dans le cadre du projet HeritageCare, la maquette numérique HBIM a été utilisée pour représenter la géométrie des bâtis et renseigner les caractéristiques (dimension, âge, état, résultats de diagnostic) de ces

éléments constitutifs. Une perspective est de développer l'interopérabilité entre l'outil de comparaison de différentes stratégies de maintenance et la maquette numérique afin de récupérer automatiquement les quantités d'ouvrage à maintenir de la maquette et visualiser le résultat à différents instants des différentes stratégies de maintenance envisagées.

D'un point de vue plus applicatif, l'ensemble de ce travail a été développé avec Microsoft Excel. Un développement, via une application mobile, pourrait le rendre plus facilement utilisable par les gestionnaires, éventuellement aidé par un membre de l'association HeritageCare.

Références bibliographiques

- [Aashto 2010] : American Association of State Highway and Transportation Officials. 2010. "Bridge Element Inspection Manual". 1st Edition.
- [Afnor 2012] : Afnor. 2012. « Conservation des biens culturels, Evaluation et rapport sur l'état du patrimoine culturel bâti. NF EN 16096.
- [Afnor 2011] : Afnor. 2011. « Conservation des biens culturels, Principaux termes généraux et définitions correspondantes ». NF EN 15898.
- [Afnor 2011] : Afnor. 2011. Conservation des biens culturels - Principaux termes généraux et définitions correspondantes. NF EN 15898.
- [Afnor 2012b] : Afnor. 2012. « Conservation des biens culturels, constater l'état du patrimoine mobilier ». NF EN 16095.
- [Afnor 2006] : Afnor. 2006. Produits de carrières, Pierres naturelles, Prescriptions générales d'emploi des pierres naturelles. NF B 10601.
- [Afnor 2005] : Afnor. 2005. Eurocode 1 : Actions sur les structures, Partie 1-4 : Actions générales — Actions du vent. NF EN 1991-1-4.
- [Al-Omari 2015] : Al-Omari, Beck, Brunetaud, Török, Al-Mukhtar. "Critical degree of saturation: A control factor of freeze–thaw damage of porous limestones at Castle of Chambord, France". *Journal : Engineering Geology*, Volume 185, Pages 71–80.
- [Balarezo 2016] : Balarezo, Barsallo Chávez, Briones, Martínez. 2016. "Heritage building's condition at maintenance campaign in San Roque, Cuenca – Ecuador". *Ouvrage:Structural Analysis of Historical Constructions–Anamnesis, diagnosis, therapy, controls – Van Balen & Verstryngne (Eds).* © 2016 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-02951-4. Pages 151 à 157.
- [Bauer 2011] : Bauer 1, Eliane Kraus de Castro 2, Giselle Reis Antunes 3, Franz Eduardo Leal, Identification and Quantification of Failure Modes of New Buildings Façades in Brasília. International Conference on Durability of Building Materials and Components PORTO-Portugal, April 12th-15th, 2011 (conference paper).
- [Binda 2003] : Binda, Saisi, Zanzi. 2003. Sonic tomography and flat-jack tests as complementary investigation procedures for the stone pillars of the temple of S. Nicolo l'Arena (Italy). *NDT&E International* 36, Pages 215-227.
- [Binda 2001] : Binda, Saisi, Tiraboschi. 2001. Application of sonic tests to the diagnosis of damaged and repaired structures. *NDT et E International* 34, Pages 123-138.
- [Birmm 2015] : Bridge Inspection and Rating Manual. 2015. Montana Department of Transportation.
- [Blandin 2014] : Blandin. 2014. Note sur Les lois relatives à la protection des monuments historiques, Allemagne – Espagne – Italie – Royaume-Uni (Angleterre). Sénat, Direction de l'initiative parlementaire et des délégations LC 247.

- [Binda 2000] : Binda, Saisi, Tiraboschi. 2000. Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries. Journal : Construction and Building Materials, Volume : 14, Pages 199-233.
- [Boutaine 2011] : Boutaine, Dubus, Ezrati, Féau, May. 2011. "La mise en place d'une politique nationale dans les musées de France : d'une cellule à un département de la conservation préventive". Revue : Technè, La conservation préventive. Une démarche évolutive · 1990-2010 n° 34. Pages 13 à 23.
- [Brandt 2002] : Brandt, Rasmussen. "Assessment of building conditions". Elsevier, Energy and Buildings, vol 34, p 121-125.
- [C2rmf 2006] : C2RMF. 2006. Vade-mecum de la conservation préventive. Document interne. Département conservation préventive du C2RMF.
- [Cardell 2003] : Cardell, Delalieux, Roumpopoulos, Moropoulou, Auger, Van Grieken. 2003. "Salt-induced decay in calcareous stone monuments and buildings in a marine environment in SW France". Journal: Construction and Building Materials, Volume 17, Pages 165–179.
- [Casanovas 2007] : Casanovas, consortium du projet. 2007. "Methode Rehabimed - Architecture Traditionnelle Méditerranéenne - Volume I - Rehabilitation Ville et Territoire ». 362 p.
- [Cerema 2015] : Cerema. 2015. "Plan National d'Adaptation au Changement Climatique, volet infrastructures et systèmes de transport, Action 3 Analyse des risques liés aux événements climatiques extrêmes sur les infrastructures, systèmes et services de transport, Recueil de concepts". Rapport.
- [Cerema 2018] : Cerema. 2018. "Surveillance et entretien courant des ouvrages d'art routiers". Guide technique à l'usage des communes. Collection connaissances.
- [Choay 2009] : Choay. 2009. Le patrimoine en questions, Anthologie pour un combat. Edition corrigée. Edition du Seuil.
- [CIB W080 WG3] : CIB W080 WG3 Test methods for service life prediction. "Accelerated laboratory test procedures and correlation between laboratory test and service life data". Politecnico di Milano. CIB REPORT: PUBLICATION 331. ISBN: 978-90-6363-062.
- [Clavaud 2014] : Clavaud. 2014. "Actions du vent sur les bâtiments selon l'Eurocode 1 – Partie 1-4". Référence C3306 V1. Techniques de l'Ingénieur
- [Corinaldesi 2003] : Corinaldesi, Moriconi, Tittarelli. 2003. "Thaumasite: evidence for incorrect intervention in masonry restoration". Cement & Concrete Composites, Volume : 25, pages : 1157–1160.
- [Della Torre 2016] : Della Torre. 2016. "Thematic Keynote - Planned preventive conservation and the structural performances of buildings". Ouvrage : Structural Analysis of Historical Constructions—Anamnesis, diagnosis, therapy, controls – Van Balen & Verstrynghe (Eds). © 2016 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-02951-4. Pages 147 à 150.
- [Dutta 2009] : Dutta, Husain. 2009. "An application of Multicriteria Decision Making to built heritage-The case of Calcutta". Journal : Journal of Cultural Heritage, Volume 10, pages 237–243.

- [El Boudani 2015] : El Boudani, Wilkie-Chancellor, Martinez, Hébert, Rolland, Forst, Vergès-Belmin, Serfaty. 2015. Marble characterization by ultrasonic methods, *Procedia Earth and Planetary Science* 15, Pages 249 – 256.
- [Emidio 2014] : Emídio, Brito, Gaspar, Silva. 2014. « Application of the factor method to the estimation of the service life of natural stone cladding ». *Journal: Construction and Building Materials*, Volume: 66, Pages 484–493.
- [Ezzdine] : Ezzdine. Date inconnue. « Endommagement des monuments historiques en maçonnerie ». Université Bordeaux 1, Ecole doctorale des Sciences Physiques et de l'ingénieur, Spécialité mécanique.
- [FIB 2008] : Federation Internationale du Béton. 2008. "Concrete structure management: guide to ownership and good practice". Guide to good practice prepared by task group 5.3.. Bulletin 44. Accès via :<https://books.google.co.ke/books?id=Qysek0g6dFoC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>.
- [Fitzner 2002] : Fitzner, Heinrichs, La Bouchardiere. 2002. "Damage index for stone monuments" in in: Galan, E. & Zezza, F. (ed.): *Protection and Conservation of the Cultural Heritage of the Mediterranean Cities*, Proceedings of the 5th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, Sevilla, Spain, 5-8 April 2000: 315-326, Swets & Zeitlinger, Lisse, The Netherlands.
- [Frankovic 2014] : Frankovic, Novakovic, Vesna Matovic. 2014. "Damage quantification of built stone on Dark Gate (Belgrade, Serbia): sample of damage index application for decay rate evaluation" . Springer-Verlag Berlin Heidelberg. *Environ Earth Sci* n° 73, Pages 6181–6193.
- [Gibeaux 2018] : Gibeaux, Vázquez, De Kock, Cnudde, Thomachot-Schneider. 2018. "Weathering assessment under X-ray tomography of building stones exposed to acid atmospheres at current pollution rate". *Journal: Construction and Building Materials*, Volume 168, Pages 187-198.
- [Guichen 1995] : Guichen. 1995. "La conservation préventive : un changement profond de la mentalité". *Cahiers d'études - Comité de conservation (ICOM-CC)*. Pages 4 à 6.
- [Heinrichs 2008] : Heinrichs. 2008. "Diagnosis of weathering damage on rock-cut monuments in Petra, Jordan. Springer-Verlag. *Environ Geol* n° 56, Pages 643–675.
- [Historic England 2017] : Historic England 2017 *Photogrammetric Applications for Cultural Heritage. Guidance for Good Practice*. Swindon. Historic England.
- [Hugot 1996] : Hugot. 1996. Rapport fait au nom de la commission des Affaires culturelles (1) sur le projet de loi relatif à la « Fondation du patrimoine ». N°273, Sénat Session Ordinaire de 1995 - 1996, Annexe au procès verbal du 13 mars 1996. Numéro Sénat :217 (1995-1996).
- [Icom-cc 2008] : International council of museums - comitee for conservation. 2008. "Terminologie de la conservation-restauration du patrimoine culturel matériel". Résolution adoptée par les membres de l'ICOM-CC à l'occasion de la XV^e Conférence triennale à New Delhi.

- [Icomos 1964] : International Council on Monuments and Sites. 1964. Charte internationale sur la restauration des monuments et des sites (charte de Venise) adoptée lors IIe Congrès international des architectes et des techniciens des monuments historiques à Venise.
- [Icomos 1931] : International Council on Monuments and Sites. 1931. La Charte d'Athènes pour la Restauration des Monuments Historiques adoptée lors du premier congrès international des architectes et techniciens des monuments historiques à Athènes.
- [Icomos 1979] : International Council on Monuments and Sites. 1979. La Charte de Burra pour la Conservation des lieux et des biens patrimoniaux de valeur culturelle adoptée en Australie.
- [Icomos 1964] : International Council on Monuments and Sites. 1964. Charte internationale sur la conservation et la restauration des monuments et des sites (charte de Venise).
- [Icomos-ISCS 2008] : International Council on Monuments and Sites, International Scientific Committee for Stone (ISCS). 2008. "Illustrated glossary on stone deterioration patterns".
- [Icomos 1999] : International Council on Monuments and Sites. 1999. Charte internationale du tourisme culturel - La Gestion du Tourisme aux Sites de Patrimoine Significatif.
- [Icomos 1976] : International Council on Monuments and Sites. 1976. Charte du tourisme culturel- adoptée par Icomos.
- [Icomos 2003] : International Council on Monuments and Sites. 2003. Charte internationale pour les principes pour l'analyse, la conservation et la restauration des structures du patrimoine architectural. Adoptés par la 14ème Assemblée Générale de l'ICOMOS à Victoria Falls, Zimbabwe.
- [Icomos 2008] : International Council on Monuments and Sites. 2008. Recommandations du Conseil scientifique résultant du colloque : Le patrimoine et les changements climatiques mondiaux Conseil scientifique de l'ICOMOS Pretoria, Afrique du Sud 7 octobre 2007 Version finale du 21 mars 2008.
- [Icomos 2003] : International Council on Monuments and Sites. 2003. Charter : Principles for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage ratified by the ICOMOS 14th General Assembly in Victoria Falls in Zimbabwe.
- [Icomos 2014] : International Council on Monuments and Sites. 2003. "Recommendations for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage". Document mis en place par le groupe de travail : International scientific committee for analysis and restoration of structures of architectural heritage.
- [Zavadskas 2010] : Zavadskas, Turskis. 2010. "A new additive ratio assessment (ARAS) method in multicriteria decision-making". Journal : Technological and Economic Development of Economy, Volume 16 (2), Pages 159-172.
- [Kolí 2014] : Koli, Madjra, Folt, Cumár, Pavlíková, Pavlík, Herný. 2014. « Service Life Assessment of Historical Building Envelopes Constructed Using Different Types of Sandstone: A Computational Analysis Based on Experimental Input Data ». Hindawi Publishing Corporation, Scientific World Journal, Volume 2014, Article ID 802509, 12 pages.

- [Kutut 2014] : Kutut, Zavadskas, Lazauskas. 2014. "Assessment of priority alternatives for preservation of historic buildings using model based on ARAS and AHP methods". Journal: Archives of civil and mechanical engineering, Volume 14, Pages 87–294.
- [Laurent 2005] : Laurent. 2005. Aspects théoriques de la restauration du patrimoine. Master en Sciences de l'information et des Bibliothèques, option : "Ingénierie documentaire". ENSSIB.
- [Laurent 2017] : Laurent. 2017. "La mérule et la problématique des champignons lignivores dans le bâti". Revue : Monumental, Chapitre 3 : Traitements et méthodes en conservation /restauration, Pages 105-107.
- [Lazarovici 2019] : Lazarovici. 2019. Culture : comment l'UE protège-t-elle le patrimoine architectural en danger ? Site internet : comprendre l'Europe (<https://www.touteurope.eu>).
- [Lazarotti 2010] : Lazarotti. 2010. "Tourisme culturel et patrimoine : quelques analyses pour un Monde habitable. Journal of urban Research". Journal: Open edition, n°1509, (<https://journals.openedition.org/articulo/1509>).
- [Lefèvre 2001] : Lefèvre, Ausset. 2001. « Les effets de la pollution atmosphérique sur les matériaux du patrimoine bâti: la pierre et le verre ». Laboratoire inter-universitaire des systèmes atmosphériques (LISA). Pollution atmosphérique, Volume 172.
- [Lenoir 2019] : Lenoir, Garcin-Berson. 2019. Les vrais chiffres du budget consacré à notre patrimoine par l'État. Article du Figaro publié le 20 avril 2019.
- [Maystre 1994] : Maystre, Pictet, Simos. 2014. "Méthodes multicritère ELECTRE : Description, conseils pratiques et cas d'application à la gestion environnementale. Presses : Polytechniques et Universitaires Romandes, CH – 1015, Lausanne, Suisse, 1994.
- [McAllister 2017] : McAllister, Warke, McCabe. 2017. "Stone temperature and moisture variability under temperate environmental conditions: Implications for sandstone weathering". Journal : Geomorphology, Volume 280, Pages 137–152.
- [Mérimée A] : Ministère de la culture, Notice numéro PA00091940, base Mérimée (<https://www.pop.culture.gouv.fr/>).
- [Mérimée B] : Ministère de la culture, Notice numéro PA00091940, base Mérimée (<https://www.pop.culture.gouv.fr/>).
- [Mérimée C] : Ministère de la culture, Notice numéro PA00093047, base Mérimée (<https://www.pop.culture.gouv.fr/>).
- [Mérimée E] : Ministère de la culture, Notice numéro PA00093067, base Mérimée (<https://www.pop.culture.gouv.fr/>).
- [Mérimée F] : Ministère de la culture, Notice numéro PA00082930, base Mérimée (<https://www.pop.culture.gouv.fr/>).
- [Mérimée G] : Ministère de la culture, Notice numéro PA00093287, base Mérimée (<https://www.pop.culture.gouv.fr/>).

- [Mérimée H] : Ministère de la culture, Notice numéro PA00091940, base Mérimée (<https://www.pop.culture.gouv.fr/>).
- [Mérimée I] : Ministère de la culture, Notice numéro PA00094053, base Mérimée (<https://www.pop.culture.gouv.fr/>).
- [Mérimée J] : Ministère de la culture, Notice numéro PA00093413, base Mérimée (<https://www.pop.culture.gouv.fr/>).
- [Mérimée K] : Ministère de la culture, Notice numéro PA00091997, base Mérimée (<https://www.pop.culture.gouv.fr/>).
- [Mérimée L] : Ministère de la culture, Notice numéro PA63000045, base Mérimée (<https://www.pop.culture.gouv.fr/>).
- [Mérimée M] : Ministère de la culture, Notice numéro PA63000073, base Mérimée (<https://www.pop.culture.gouv.fr/>).
- [Mérimée N] : Ministère de la culture, Notice numéro PA00093345, base Mérimée (<https://www.pop.culture.gouv.fr/>).
- [Mcc 2006] : Ministère de la culture et de la communication. 2006. Ouvrages en maçonneries. Sous-direction des monuments historiques et des espaces protégés Mission ingénierie et références techniques.
- [Mcc 2007] : Ministère de la culture et de la communication. 2007. Direction de l'Architecture et du Patrimoine. Rapport sur l'état du parc monumental français.
- [Mcc 2003] : Ministère de la culture et de la communication. 2003. Ouvrage en pierre de taille. Direction de l'architecture et du patrimoine. Sous-direction des monuments historiques et des espaces protégés Mission ingénierie et références techniques.
- [Mcc 2009] : Ministère de la culture et de la communication. 2009. Circulaire relative à la maîtrise d'œuvre des travaux sur les monuments historiques classés et inscrits.
- [Miyamoto 2001] : Miyamoto, Kawamura, Nakamura. 2001. "Development of a bridge management system for existing bridges". Journal : Advances in Engineering Software, volume 32, issues 10–11, pages 821-833.
- [Mousavi 2017] : Mousavi, Silva, Brito, Ekhlassi, Hosseini. 2017. "Service Life Prediction of Natural Stone Claddings with Indirect Fastening System". Journal : Journal of Performance of Constructed Facilities, volume : 31 (4).
- [Nachbar 2019] : Nachbar. 2019. Avis présenté au nom de la commission de la culture, de l'éducation et de la communication (1) sur le projet de loi de finances, adopté pour l'Assemblée Nationale, TOME II Fascicule 1. N° 151, Session ordinaire de 2018-2019, Enregistré à la Présidence du Sénat le 22 novembre 2018. Numéro Sénat : 146 et 147 à 153 (2018-2019).
- [Nachbar 2019b] : Nachbar. 2019. Avis présenté au nom de la commission de la culture, de l'éducation et de la communication (1) sur le projet de loi de finances, adopté par l'Assemblée Nationale, pour 2020, TOME II Fascicule 1. CULTURE : Patrimoines. Enregistré à la Présidence du Sénat le 21 novembre 2019. Numéro Sénat : 145 (2019-2020).

- [Odot 2009] : Oregon Department of Transportation. 2009. "Bridge Inspection Pocket Coding Guide".
- [Pan 2018] : Pan, Wang, Guo, Yuan. 2018. "Seismic damage assessment of Nepalese cultural heritage building and seismic retrofit strategies: 25 April 2015 Gorkha (Nepal) earthquake". Journal : Engineering Failure Analysis, volume 87, pages 80–95.
- [Pedro 2008] : Pedro, Gaspara, Jorge, Brito. 2008. "Quantifying environmental effects on cement-rendered facades: comparison between different degradation indicators". Elsevier, Building and Environment, volume 43, pages 1818–1828.
- [Pedro 2008] : Pedro, Gaspara, Jorge, Brito. 2008. "Quantifying environmental effects on cement-rendered facades: comparison between different degradation indicators". Volume : Building and Environment, volume : 43, pages 1818–1828.
- [Parent 2015] : Parent, Domede, Sellier, Mouatt. 2015. Mechanical characterization of limestone from sound velocity measurement. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, volume 79, pages 149–156.
- [Piel 2012] : Piel. 2012. 2e journées professionnelles de la conservation et de la restauration. Session 2 - Prévenir les risques. Architecture et conservation préventive - Bilan sanitaire des monuments historiques : démarche et état des lieux. Document vidéo.
- [Ponziana 2012] : Ponziani, Ferrero, Appolonia, Migliorini. 2012. "Effects of temperature and humidity excursions and wind exposure on the arch". Journal of Cultural Heritage, Volume : 13, pages 462–468.
- [Pro Roc 2007] : Roches de France, version multimédia, Edition Pro Roc, version 2007.
- [Roy 1993] : Roy , Bouysseau. 1993. "Aide multicritère à la décision : Méthodes et étude de cas". Ouvrage : Economica, Paris.
- [Saaty 1980] : Saaty. 1980. "Processus de hiérarchie analytique, planification, établissement de priorités, allocation de ressources Mc-Graw Hill. Ouvrage américain.
- [Setra 2006] : Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes. 2006. "Gestion des ouvrages d'art, A l'usage des départements et autres collectivités locales". Rapport effectué par : Ministère des transports de l'équipement du tourisme et de la mer.
- [Silva 2012] : Silva, Brito, Gaspar. 2012. "Application of the factor method to maintenance decision support for stone cladding". Journal : Automation in Construction, volume 22, pages 165–174.
- [Silva 2011b] : Silva, De Brito, Gaspar. 2011. "Service life prediction model applied to natural stone wall claddings (directly adhered to the substrate)". Journal : Construction and Building Materials, volume : 25, pages : 3674–3684.
- [Silva 2016] : Silva, Pedro, Gaspar, Brito, Neves. 2016. "Probabilistic analysis of degradation of facade claddings using Markov chain models". Journal : Materials and Structures, volume : 49, pages 2871–2892.

- [Silva 2012] : Silva, Brito, Gaspar.2012. "Application of the factor method to maintenance decision support for stone cladding". Journal : Automation in Construction, volume 22, pages 165–174.
- [Souny 2006] : Souny, Keller, Cloux, Damase. 2006. Présences romanes : En Auvergne, Bourbonnais, Velay.
- [Stephan 2014] : Stephan. 2014. "Méthode d'aide à la décision multicritère des stratégies de réhabilitation des bâtiments anciens en pierre calcaire : application au patrimoine en tuffeau". Thèse de doctorat : Docteur de l'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat Université de Lyon, Ecole doctorale : MEGA (Mécanique, Energétique, Génie Civil, Acoustique), Spécialité : Génie Civil. Soutenue publiquement en 2014.
- [Strres 2016] : Strres. Février 2016. Réparation et renforcement des maçonneries, Réparation et renforcement structuraux, 6.2 version 2. Edition du syndicat national des entrepreneurs, spécialistes des travaux de réparation et renforcement des structures.
- [Taillandier 2013] : Taillandier, Sbartai. 2013. "Aide à la priorisation de bâtiments à rénover par le recours à la CND et à une analyse multicritère". Article pour une conférence : 21ème Congrès Français de Mécanique à Bordeaux.
- [Talon 2017] : Talon, Cauvin, Chateauneuf. 2017.A State of the Art of HBIM to Develop the HBIM of the HeritageCare Project. International Journal of 3-D Information Modeling (IJ3DIM)6(3).
- [Talon 2017b] : Talon, Cauvin, Chateauneuf. 2017. Etat de l'art afin de développer le HBIM du projet HeritageCare. Le BIM éclairé par la recherche. Editions Eyrolles. Sous la direction de : RISS, Talon et Teulier. Paris.
- [Tena 2016] : Tena, Leon. 2016. "Base management heritage system: Methods of structural qualification and maintenance costs estimated over time". Ouvrage : Structural Analysis of Historical Constructions – Anamnesis, diagnosis, therapy, controls. pages 193 - 200.
- [Thomachot-Schneider 2018] : Thomachot-Schneider, Huby, Chalons, Drothière, Vazquez. 2018. "Role of the capillary fringe on the dilatation of a low porosity limestone submitted to unidirectional freezing, volume: Progress in Earth and Planetary Science, volume 5.
- [Unesco 2012] : Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture. 2012. "Risk management at heritage sites: a case study of the Petra world heritage site". Document rédigé par: Paolini, Vafadari, Cesaro, Santana Quintero, Van Balen Vileikis, Fakhoury.Published by the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization and UNESCO Amman Office.
- [Unesco 2010] : Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture. 2010. "Gérer les catastrophes pour le patrimoine mondial". Manuel de référence. Annexe 2 - typologie des alèas, pages 64-65.
- [Van Balen 2015] : Van Balen. 2015. "Preventive conservation of historic buildings". Journal: International Journal for Restoration of Buildings and Monuments, volumes 21 (2-3), pages 99 - 104.

- [Van Roy 2016] : Van Roy, Verstryngge, Brosens, Van Balen. 2016. "Quality management of structural repair of traditional timber roof structures". Ouvrage: Structural Analysis of Historical Constructions – Anamnesis, diagnosis, therapy, controls, pages 209 - 216.
- [Vandesande 2016] : Vandesande, Van Balen. 2016. "An operational preventive conservation system based on the Monumentenwacht mode". Ouvrage : Structural Analysis of Historical Constructions – Anamnesis, diagnosis, therapy, controls. pages 217 - 224.
- [Verdel 1993] : Verdel. 1993. "Géotechnique et monuments historiques : Méthodes de modélisations appliquées à des cas égyptiens". Thèse de doctorat : Docteur de l'Institut National Polytechnique de Lorraine de l'Ecole des mines de Nancy. Géotechnique et monuments historiques. Méthodes de modélisations appliquées à des cas égyptiens. Soutenance publique : 3 février 1993.
- [Viollet-Le-Duc 1854] : Viollet-le-Duc. 1854. Dictionnaire raisonné de l'architecture Française du XIème au XVIème.
- [Walbert 2015] : Walbert. 2015. "Endommagement par le gel de pierres calcaires utilisées dans le patrimoine bâti : étude du comportement hydromécanique". Thèse de doctorat : Docteur de l'Université de Cergy Pontoise, Ecole doctorale Science et Ingénierie, Spécialité Génie Civil, Présentée et soutenue publiquement le 18 mai 2015.
- [Zavadskas 2010b] : Zavadskas, Turskis, Vilutiene. 2010. "Multiple criteria analysis of foundation instalment alternatives by applying Additive Ratio Assessment (ARAS) method ". Journal: Archives of civil and mechanical engineering, volume 10 (3).
- [Zezza 1996] : Zezza. 1996. "Marine spray and polluted atmosphere as factors of damage to monuments in the Mediterranean coastal environment". Rapport: European commission research workshop, Protection and Conservation of the European Cultural Heritage, Research Report n ° 4, pages 3–19.
- [Zurbrugg 2010] : Zurbrugg. 2010. Simulation des phénomènes de dégradation d'éléments de construction - Application d'une méthode basée sur la modification des performances de matériaux et la propagation des contraintes. Thèse de doctorat : Ecole polytechnique fédérale de Lausanne pour l'obtention du grade de docteur des sciences.

Table des figures

Figure 1 : Comparaison des crédits d'entretien et de restauration [Nachbar 2019].....	18
Figure 2 : Bilan de l'état sanitaire effectué en 2007 (anneau intérieur : bilan 2003 et anneau extérieur : bilan 2007)	19
Figure 3 : Exemple d'une méthodologie de gestion des ouvrages d'art ; Organigramme des opérations et des outils de gestion des ouvrages d'art [Setra 2006].....	24
Figure 4 : Méthodologie état des lieux du bâti [Balarezo 2016]	25
Figure 6 : (a) Evolution de l'état des toitures (b) Evolution de l'état des gouttières inspectées par le Monumentenwacht [Vandesande 2016]	28
Figure 7 : Schématisation des travaux de la thèse	38
Figure 8 : Organisation des chapitres de la thèse	38
Figure 9 : Contenu de la thèse présenté dans ce chapitre 2.....	39
Figure 10 : Graphique illustrant différentes stratégies de maintenance [Cerema 2018].....	55
Figure 11 : Contenu de la thèse présenté dans ce chapitre 3.....	58
Figure 12 : Schéma de l'ensemble des critères.....	59
Figure 13 : Carte de France découpée en quatre zones d'intensité [Afnor 2005]	63
Figure 14 : Carte de France illustrant la répartition des zones de gel [Afnor 2006]	64
Figure 15 : Carte de France illustrant la répartition de la radiation solaire.....	65
Figure 16 : Carte de France illustrant la répartition des foudroiements entre 2009 et 2018	67
Figure 17 : Effets d'un séisme sur un mur de maçonnerie – cas d'une accélération horizontale [Verdel, 1993]	68
Figure 18 : Carte de France illustrant la répartition des zonages sismiques.....	69
Figure 19 : Carte de France proposée par le FCBA avec la répartition des chantiers où ont été déclarés les champignons lignivores (version 05 – Aout 2015)	70
Figure 20 : Carte départementale de la France des infestations proposée par le FCBA.....	71
Figure 21 : Synthèse des différents types de données.....	77
Figure 22 : Représentation graphique	79
Figure 23 : Présentation des pondérations des critères	83
Figure 24 : Comparaison des jugements entre le modèle et le sondage pour les indicateurs.....	84
Figure 25 : Comparaison des jugements entre le modèle et le sondage pour les critères	85
Figure 26 : Comparaison des jugements entre le modèle et le sondage pour les sous critères	85
Figure 27 : Logigramme décisionnel pour l'agrégation des résultats	87
Figure 28 : Logigramme décisionnel pour l'agrégation des résultats – cas de l'évaluation de la vitesse altération	88
Figure 29 : Courbe de Farmer	88
Figure 30 : Logigramme décisionnel pour l'agrégation des résultats – cas de l'évaluation du risque de solidité	89
Figure 31 : Mise en place de deux matrices pour aider dans le processus décisionnel.....	90
Figure 32 : Contenu de la thèse présenté dans ce chapitre 4.....	95
Figure 33 : Diversité de la typologie d'architecture (a) et d'ancienneté (b).....	96
Figure 34 : Localisation des quatorze bâtis– Carte GoogleMap	97
Figure 35 : Vue générale du bâti A	98
Figure 36 : Vue générale du bâti B.....	99
Figure 37 : Vue générale du bâti C	99
Figure 38 : Vue générale du bâti D.....	100
Figure 39 : Vue générale du bâti E – façade donnant sur le jardin	101
Figure 40 : Vue générale du bâti F – Porte donnant sur l'ancien coeur	101
Figure 41 : Vue générale du bâti G.....	102
Figure 42 : Vue générale du bâti H.....	103

Figure 43 : Vue générale du bâti I.....	104
Figure 44 : Vue générale du bâti J.....	104
Figure 45 : Vue générale du bâti K.....	105
Figure 46 : Vue générale du bâti L.....	106
Figure 47 : Vue générale de la façade principale du bâti M.....	107
Figure 48 : Vue générale du bâti N.....	107
Figure 49 : Photogrammétrie d'une façade d'un bâti du corpus – cas du prieuré.....	114
Figure 50 : (a) vue 3D de la maquette numérique via le logiciel REVIT [Durand 2018] (b) vue 3D de la photogrammétrie.....	115
Figure 51 : Pourcentage des familles d'altérations et critère d'altération de la couverture.....	122
Figure 52 : Pourcentage des sous-familles d'altérations de la colonisation biologique et la pluviométrie annuelle.....	122
Figure 53 : Pourcentage des familles d'altérations et critère d'altération de la charpente.....	124
Figure 54 : Pourcentage des sous-familles d'altérations de la colonisation biologique en fonction de la pluviométrie annuelle (mm) et des bâtis.....	124
Figure 55 : Pourcentage des familles d'altérations en fonction de la pluviométrie annuelle (mm) et des bâtis.....	125
Figure 56 : Pourcentage des familles d'altérations et le critère d'altération des évacuations d'eaux pluviales en fonction des bâtis.....	126
Figure 57 : Pourcentage des familles d'altérations et le critère d'altération des enveloppes extérieures en fonction des bâtis.....	128
Figure 58 : Pourcentage des altérations relevées et pluviométrie annuelle en fonction des bâtis.....	128
Figure 59 : Pourcentage des altérations relevées en fonction du critère lié au risque sismique (a) et en fonction du critère lié au risque de sécheresse (b).....	129
Figure 60 : Pourcentage des altérations de la famille perte de matière relevé en fonction du critère lié à la gélivité (a) et du critère lié au vent (b).....	129
Figure 61 : Pourcentage des familles d'altérations et critère d'altération de l'intérieur de chaque bâti.....	130
Figure 62 : Histogramme représentant le critère d'altération cumulé en fonction des bâtis.....	132
Figure 63 : Critères d'altérations des cinq corps d'état du bâti M.....	132
Figure 64 : (a) Pourcentage de chaque famille d'altération (b) Répartition des deux sous-familles d'altérations les plus répandues.....	133
Figure 65 : Contenu de la thèse présenté dans ce chapitre 4.....	135
Figure 66 : Histogramme présentant les résultats des indicateurs obtenus (en ordonnée) en fonction des bâtis (en abscisse).....	142
Figure 67 : Rappel de la représentation graphique de l'indicateur 1.....	142
Figure 68 : Résultat de l'indicateur structural en ordonnée en fonction des bâtis en abscisse.....	143
Figure 69 : Rappel de la représentation graphique de l'indicateur 2.....	143
Figure 70 : Histogramme représentant Ind2 en fonction des bâtis.....	146
Figure 71 : Rappel de la représentation graphique de l'indicateur 3.....	146
Figure 72 : Histogramme représentant Ind3 en fonction des bâtis.....	147
Figure 73 : Rappel de la représentation graphique de l'indicateur 4.....	147
Figure 74 : Résultat de l'Ind4 en ordonnée en fonction des bâtis en abscisse.....	148
Figure 75 : Rappel de la représentation graphique de l'indicateur 5.....	148
Figure 76 : Histogramme représentant Ind5 en ordonnée en fonction des bâtis en abscisse.....	149
Figure 77 : Courbe d'altération pour le bâti A.....	155
Figure 78 : Courbe d'altération pour l'ensemble des bâtis.....	156

Table des tableaux

Tableau 1 : Exemple d'accidents.....	13
Tableau 2 : Définition de la conservation préventive.....	16
Tableau 3 : Répartition en pourcentage des immeubles protégés en fonction de leur état sanitaire pour chaque catégorie de propriétaire	19
Tableau 4 : Synthèse des différentes aides.....	21
Tableau 5 : Méthodologie de veille sanitaire par l'Etat.....	25
Tableau 6 : Synthèse de la méthodologie [Balarezo 2016]	26
Tableau 7 : Normes publiées par l'AFNOR	26
Tableau 8 : Récapitulatif des étapes à effectuer dans le cadre du SL1	28
Tableau 9 : Echelle de classement (état et risque) de HeritageCare	29
Tableau 10 : Récapitulatif des étapes à effectuer dans le cadre du SL2.....	30
Tableau 11 : Récapitulatif des étapes à effectuer dans le cadre du SL3.....	30
Tableau 12 : Exemples d'échelles	32
Tableau 13 : Table de dégradation mixte (qualitative et quantitative) par [Duling 2006] (traduit).....	33
Tableau 14 : Table de dégradation mixte proposée par [Silva 2016] – pour le cas des façades en pierres naturelles – condition C (traduit par Clémence Cauvin-Hardy)	33
Tableau 15 : Echelle de l'indice global.....	35
Tableau 16 : Comparaison des indices « d'altérations ».....	36
Tableau 17 : Synthèse des diagnostics techniques.....	41
Tableau 18 : Instruction pour l'inspection	44
Tableau 19 : Instruction pour l'inspection (suite)	45
Tableau 20 : Liste des familles d'altérations avec leurs sous-familles associées	47
Tableau 21 : Atlas des altération – Cas des insectes à larves xylophages	48
Tableau 22 : Atlas des altération – Cas des crottes noires	49
Tableau 23 : Niveau d'état [Afnor 2012]	50
Tableau 24 : Référentiel HeritageCare – présentation des critères de gravité pour deux altérations.....	50
Tableau 25 : Catégorie de recommandation et catégorie d'urgence [Afnor 2012].....	51
Tableau 26 : Synthèse des méthodes d'inspections avec indications des matériaux sur lesquels ces méthodes sont principalement utilisées M : maçonnerie / B : bois / m : métal	52
Tableau 27 : Liste des travaux proposés sur la maçonnerie.....	53
Tableau 28 : Liste des travaux proposés sur la maçonnerie (suite)	54
Tableau 29 : Liste des travaux proposés sur la couverture.....	54
Tableau 30 : Liste des travaux proposés sur le bois.....	55
Tableau 31 : Synthèse des actions de conservation préventive par corps d'état	56
Tableau 32 : Echelles pour l'évaluation de l'état kn et de l'urgence ka, n du patrimoine bâti [Afnor 2012b]	60
Tableau 33 : Critère d'intégrité prenant en compte l'état structural.....	61
Tableau 34 : Proposition de gravité du critère lié à la pluviométrie.....	62
Tableau 35 : Proposition de gravité du critère lié au vent.....	63
Tableau 36 : Proposition de gravité du critère lié au gel/dégel.....	64
Tableau 37 : Proposition de gravité du critère lié au front de mer.....	65
Tableau 38 : Radiation globale	66
Tableau 39 : Coefficient de dilatation thermique des principaux matériaux utilisés dans le bâti ancien.....	66
Tableau 40 : Proposition de gravité du critère lié à la température	67
Tableau 41 : Proposition de gravité du critère lié au risque sismique	69
Tableau 42 : Proposition de gravité du critère lié au risque de sécheresse.....	69
Tableau 43 : Niveaux de gravité du critère lié à l'occupation dans le bâtiment.....	72
Tableau 44 : Niveaux de gravité du critère lié à la pollution atmosphérique	72

Tableau 45 : Niveaux de gravité du critère lié à l'attractivité touristique.....	73
Tableau 46 : Niveaux de gravité du critère lié au vandalisme.....	73
Tableau 47 : Proposition de gravité du critère lié au changement de fonction du bâti.....	73
Tableau 48 : Niveaux de gravité du critère lié à l'état des installations / équipements.....	74
Tableau 49 : Synthèse de l'influence du changement climatique sur les variables [Cerema 2015]	74
Tableau 50 : Niveaux de gravité des critères pour la détermination de l'indicateur de vulnérabilité.....	75
Tableau 51 : Niveaux de gravité pour les critères de l'indicateur socio-économique.....	76
Tableau 52 : Niveaux de gravité des critères de l'indicateur coût.....	77
Tableau 53 : Échelle de comparaison de Saaty (a) et échelle de comparaison proposée avec cinq degrés d'importances(b).....	79
Tableau 54 : Comparaison des critères du niveau 1.....	80
Tableau 55 : Matrice de jugements des critères du niveau 1	80
Tableau 56 : Normalisation de la matrice	81
Tableau 57 : Pondération du critère	81
Tableau 58 : Valeurs du critère de cohérence aléatoire de Saaty [Saaty 1980].....	82
Tableau 59 : Comparaison des jugements entre le modèle et le sondage pour les indicateurs.....	84
Tableau 60 : Comparaison des jugements entre le modèle et le sondage pour les critères	84
Tableau 61 : Comparaison des jugements entre le modèle et le sondage pour les sous-critères.....	85
Tableau 62 : Matrice de criticité afin de déterminer un critère lié à la cinétique de dégradation du patrimoine avec (1) rapidité nulle (2) rapidité lente (3) rapidité moyenne et (4) rapidité rapide.....	88
Tableau 63 : Matrice pour déterminer le risque.....	89
Tableau 64 : Matrice de criticité pour évaluer la motivation dans le processus de décisions.....	90
Tableau 65 : Matrice pour déterminer les actions du décideur	91
Tableau 66 : Quatre niveaux de mesures possibles.....	93
Tableau 67 : Détail des mesures possibles pour la sous-famille B2	93
Tableau 68 : Liste des bâtis du corpus	97
Tableau 69 : Synthèse des bâtis	108
Tableau 70 : Caractéristiques des bâtis avec (1) pluviométrie annuelle en mm annuelle, (2) température maximale relevée en été en °C, (3) Température minimale relevée en hiver en °C, (4) risque sismique, (5) risque de sécheresse (6) altitude de la commune (en m), (7) nombre d'habitant par ville, (8) gélivité et (9) matériaux principaux.....	109
Tableau 71 : Durées minimales et maximales pour bâti de l'application de la méthodologie.....	110
Tableau 72 : Synthèse de la localisation des travaux effectués depuis le classement du château de Murol répertoriés dans les archives de la médiathèque de l'architecture et du patrimoine	111
Tableau 73 : Récapitulatif des dates et durée de d'intervention.....	112
Tableau 74 : Durée minimale et durée maximale (en journée) par bâti de l'application de la méthodologie	113
Tableau 75 : Détail des investigations supplémentaires	114
Tableau 76 : Liste des familles d'altération avec leurs sous-familles associées.....	115
Tableau 77 : Critère altération par corps d'état et par bâti (NA : non déterminé).....	116
Tableau 78 : Propositions de catégories du critère d'altération en fonction du critère d'altération calculé.....	116
Tableau 79 : Résultat de la détermination de la catégorie du critère d'altération.....	116
Tableau 80 : Paramètres pour les bâtis en meilleur état pouvant influencer le critère d'altération	117
Tableau 81 : Paramètres pour les bâtis en moins bon état pouvant influencer le critère d'altération	118
Tableau 82 : Synthèse des typologies d'altérations.....	118
Tableau 83 : Calcul du critère d'intégrité à l'aide du critère d'altération.....	119
Tableau 84 : Propositions de catégories du critère d'altération	119
Tableau 85 : Résultat de la détermination de la catégorie du critère d'intégrité CII	119
Tableau 86 : Critère d'intégrité et critère altération.....	120
Tableau 87 : Synthèse des matériaux observés	120
Tableau 88 : Résultat de l'état des lieux de la couverture.....	121
Tableau 89 : Critère d'altération de la toiture de la chapelle de l'ancien hôpital	121

Tableau 90 : Information concernant la nature et l'accessibilité des charpentes	123
Tableau 91 : Résultat de l'état des lieux de la couverture.....	123
Tableau 92 : Résultat de l'état des lieux des évacuations d'eaux pluviales	125
Tableau 93 : Informations concernant les principaux matériaux utilisés sur les enveloppes extérieurs.....	127
Tableau 94 : Résultat de l'état des lieux des enveloppes extérieures	127
Tableau 95 : Etat des lieux des intérieurs	130
Tableau 96 : Détermination des corps d'état les moins ou les plus dégradés en fonction du critère d'altération	131
Tableau 97 : Synthèse de l'application de la démarche de gestion préventive.....	134
Tableau 98 : Détail de l'évaluation de la gravité des critères pour le bâti A.....	138
Tableau 99 : Evaluation des critères pour l'ensemble des bâtis	139
Tableau 100 : Première méthode de traitement sans les pondérations.....	141
Tableau 101 : Résultats de l'indicateur structural avec la somme pondérée	142
Tableau 102 : Résultats de C3 en intégrant les pondérations	144
Tableau 103 : Résultats de C4 avec la somme pondérée.....	144
Tableau 104 : Résultats de C5 avec la somme pondérée.....	144
Tableau 105 : Résultats de C6 avec la somme pondérée.....	145
Tableau 106 : Résultats de l'Ind2 avec la somme pondérée	145
Tableau 107 : Résultats de Ind3 avec la somme pondérée	146
Tableau 108 : Résultats de Ind4 avec la somme pondérée	147
Tableau 109 : Résultats de Ind5 avec la somme pondérée	148
Tableau 110 : Résultats somme pondérée	150
Tableau 111 : Comparaison des résultats avec ou sans prise en compte des pondérations.....	150
Tableau 112 : Matrice de criticité pour déterminer l'évaluation de la vitesse d'altération pour le bâti A : (2) rapidité lente.....	151
Tableau 113 : Résultat de l'évaluation de la vitesse d'altération.....	151
Tableau 114 : Matrice pour déterminer le risque cas du bâti A- Evaluation de R1	152
Tableau 115 : Evaluation du risque de perte de solidité.....	152
Tableau 116 : Matrice pour évaluer la motivation dans le processus de décisions – cas du bâti A	152
Tableau 117 : Evaluation de la motivation du décideur.....	153
Tableau 118 : Matrice pour déterminer les actions du décideur – cas du bâti A	153
Tableau 119 : Evaluation de la décision du décideur.....	153
Tableau 120 : Estimation âge des bâtis	154
Tableau 121 : Données pour tracer la courbe d'altération pour le bâti A.....	155
Tableau 122 : Prévission de l'évolution du critère d'altération	156
Tableau 123 : Préconisations couverture – bâti B.....	157
Tableau 124 : Préconisations écoulements eaux pluviales – bâti B.....	157
Tableau 125 : Préconisations enveloppe extérieure – bâti B.....	158
Tableau 126 : Préconisations enveloppe intérieure – bâti B.....	158
Tableau 127 : Hiérarchisations des actions à effectuer par la maîtrise d'ouvrage pour le château de Murol	159
Tableau 128 : Préconisations toiture – bâti E.....	160
Tableau 129 : Préconisations charpente – bâti E.....	160
Tableau 130 : Préconisations enveloppe extérieure – bâti E.....	161
Tableau 131 : Hiérarchisations des actions à effectuer par la maîtrise d'ouvrage pour l'ancien prieuré	162
Tableau 132 : Résultats synthétiques des modèles d'agrégation	163

Annexes

Annexe 1 : Protection du patrimoine en France

Cas du patrimoine protégé

Pour le cas de la France, un bien immobilier est « protégé » lorsque sa valeur patrimoniale a été reconnue par la Nation. Cette protection implique une responsabilité partagée entre les propriétaires et la collectivité nationale au regard de sa conservation et de sa transmission aux générations à venir.

Le statut de « monument historique » existe en France avec la création en 1830 du premier poste d'inspecteur général des Monuments historiques demandée en 1825 par Victor Hugo dans son texte « Guerre aux démolisseurs » [Choay 2009]. Ludovic Vitet, premier inspecteur, a défini les missions du poste : « Constaté l'existence et faire la description critique de tous les édifices du royaume qui, soit par leur date, soit par le caractère de leur architecture, soit par les événements dont ils furent les témoins, méritent l'attention de l'archéologue, de l'historien, tel est le premier but des fonctions qui me sont confiées ; en second lieu, je dois veiller à la conservation de ces édifices en indiquant au Gouvernement et aux autorités locales les moyens soit de prévenir, soit d'arrêter leur dégradation ». Le poste d'inspecteur général des Monuments historiques permet d'instaurer le « classement » au titre des monuments historiques et permet de « classer par ordre de priorité » les monuments pour recevoir des aides de l'État en vue de leur conservation.

Aujourd'hui la demande de protection (inscription et classement) s'effectue par des dossiers de demande de protection instruits par les services déconcentrés de l'État puis soumis pour avis à la commission régionale du patrimoine et des sites (CRPS) pour les immeubles. Ils peuvent ensuite être présentés à la Commission nationale des monuments historiques (CNMH), en vue d'un « classement ». La décision de classement fait l'objet d'un arrêté ministériel ou d'un décret en conseil d'État. Au 1er février 2015, 43 600 immeubles étaient protégés au titre des monuments historiques en France (14 100 classés et 29 500 inscrits), l'ensemble des monuments protégés se retrouvent dans la base de données Mérimée accessible par internet et par la plateforme ouverte du patrimoine (POP)²¹.

Années	1836	1840	1850	1860	1870	1880	1890	1900	1910	1920	1930	1940	1950	1960	1970	1990
MH	13	746	38	557	169	610	204	1089	1503	1918	1060	890	543	788	1139	1333

Evolution des monuments classés depuis 1836

Une conséquence de ce classement est la loi sur la protection des monuments historiques votée le 30 mars 1887 qui met en place, entre autres, le corps des architectes en chef des monuments historiques (ACMH) pour éviter les restaurations médiocres due à la méconnaissance de l'architecture médiévale. Puis cette célèbre loi évolue le 31 décembre 1913 et aujourd'hui elle résulte du titre II du Livre VI du code du patrimoine, lequel distingue, en ce qui concerne les immeubles, les dispositions : relatives au classement, d'une part, et à l'inscription, d'autre part ; communes aux immeubles classés et aux immeubles inscrits ; et celles concernant les immeubles adossés aux immeubles classés et à ceux situés dans le champ de visibilité des immeubles classés ou inscrits.

Actuellement, le « propriétaire d'un monument historique » est le maître d'ouvrage des travaux qui y sont entrepris, il doit donc définir les opérations d'entretien ou de restauration, de choisir le maître d'œuvre et les entreprises, d'assurer le financement et de solliciter l'aide de l'Etat, (ou collectivités ou d'autres partenaires comme la fondation du Patrimoine). L'Etat représenté par le ministère de la Culture et de la

²¹ <https://www.pop.culture.gouv.fr/>

Communication est chargé directement, par l'intermédiaire de ses services régionaux (DRAC) et de ses établissements publics (CMN, OPPIC), de l'entretien et de la conservation des grands monuments historiques tels que les cathédrales et les grands domaines nationaux dont il a la charge.

Cas du patrimoine non protégé

Le patrimoine non protégé est souvent désigné comme le patrimoine rural non protégé, patrimoine vernaculaire (de vernaculus : indigène, domestique), de petit patrimoine ou de patrimoine de proximité (églises, lavoirs, pigeonniers, maisons typiques, ...). Aujourd'hui, il est estimé entre 400 000 et 500 000 le nombre d'édifices qui, sans justifier d'une protection au titre des monuments historiques, présentent un intérêt artistique, historique ou ethnologique. A ces édifices s'ajoutent également des éléments patrimoniaux qui restent encore aujourd'hui insuffisamment pris en compte par l'État, parmi lesquels notamment les friches industrielles, le patrimoine du XXe siècle, les parcs et jardins ou les sites naturels [Hugot 1996].

Principalement depuis 1996, ce patrimoine de proximité a de la considération avec la Fondation du Patrimoine et diverses associations qui aident à la sauvegarde de ce patrimoine de proximité soit avec de l'aide financière, des conseils techniques, de la mise en relation de personnes qualifiées etc. Aujourd'hui « la Fondation du patrimoine » est bien implantée en France, elle a été créée en 1996 et en 1997 elle est reconnue d'utilité publique à statut dérogatoire. La Fondation a pour but d'exercer des missions qui ne sont pas assumées par la direction du patrimoine du ministère de la culture comme la préservation et à la mise en valeur de ce patrimoine de proximité avec la mise en place d'un label. Ce label permet aux propriétaires (publics ou privés) d'obtenir des aides, des conseils pour la restauration de leur bien.

Les missions de la Fondation du patrimoine [site internet Fondation du patrimoine] sont de promouvoir la sauvegarde et la mise en valeur du patrimoine bâti, contribuer à l'identification des édifices et des sites menacés de dégradation et de disparition ; susciter et organiser les partenariats publics/privés entre les associations de protection du patrimoine, les pouvoirs publics nationaux et locaux, et les entreprises désireuses d'engager des actions de mécénat culturel ; participer aux actions de restauration des propriétaires privés ou publics ; favoriser la création d'emplois et la transmission des savoir-faire.

Annexe 2 : Les acteurs du patrimoine

En France

Le conservateur régional des monuments historiques

Placé sous l'autorité du directeur régional des affaires culturelles, il dirige la conservation régionale des monuments historiques. Il veille à l'application de la réglementation relative à la protection du patrimoine. Il réalise, avec les personnels de documentation (chargés d'études documentaires), le recensement et l'étude du patrimoine à protéger et élabore les dossiers à soumettre à la CRPS. Il coordonne le suivi de l'état sanitaire des monuments. Il élabore sur le plan technique et financier les projets de programmes de restauration des monuments protégés. Enfin, il assume le contrôle des travaux de restauration sur les monuments historiques classés dont l'exécution est assurée par les propriétaires des monuments et conduit, avec les personnels spécialisés (ingénieurs du patrimoine, techniciens des services culturels) ceux dont l'exécution est assurée par le ministère chargé de la Culture.

Le conservateur des monuments historiques

Conseil scientifique auprès du conservateur régional des monuments historiques, historien d'art de haut niveau recruté par un concours d'Etat (conservateur du patrimoine), il apporte à ce titre son concours à toutes les actions de protection et de conservation du patrimoine conduites par la conservation régionale : il initie et coordonne les actions de recherche concernant le patrimoine monumental et mobilier; il émet un avis sur les dossiers de protection des immeubles, qu'il rapporte habituellement devant la CRPS ; il émet un avis sur les études et projets de restauration des monuments, et participe à l'élaboration de la programmation. Il anime le réseau des conservateurs départementaux des antiquités et objets d'art, assure ou participe à la conduite des opérations (maîtrise d'œuvre) des travaux de restauration du patrimoine mobilier.

L'architecte en chef des monuments historiques

Recruté par un concours d'Etat, il est nommé par le ministre chargé de la Culture dans une circonscription. Il formule toutes propositions et avis pour la protection, la bonne conservation, la mise en valeur et la réutilisation des immeubles protégés. Il assiste la conservation régionale des monuments historiques pour la programmation annuelle des travaux. Conformément aux orientations définies par le propriétaire du monument, en liaison avec la direction régionale des affaires culturelles (conservateur régional des monuments historiques), il élabore les propositions d'études préalables aux travaux de restauration des monuments historiques classés. Il établit les dossiers d'études préalables et de restauration des monuments historiques classés en concertation avec le maître d'ouvrage. Ses dossiers sont approuvés par l'administration après avis de l'inspection générale des monuments historiques. Il est chargé, en tant que maître d'œuvre, de diriger les travaux sur les immeubles classés si les propriétaires reçoivent une aide financière du ministère chargé de la Culture (direction régionale des affaires culturelles) pour la réalisation des travaux. Il peut intervenir sur tout édifice à la demande de son propriétaire. Tout propriétaire peut solliciter auprès de la direction régionale des affaires culturelles, qui transmettra la demande au ministre pour décision, un changement d'architecte en chef des monuments historiques

L'architecte des bâtiments de France Recruté par un concours d'Etat

L'architecte des bâtiments de France est un fonctionnaire d'Etat qui travaille au sein de services départementaux de l'architecture et du patrimoine. La fonction est départementale et il existe au moins un architecte des bâtiments de France par département, installé au chef-lieu de département. Sa mission est double : « faire appliquer les législations sur l'architecture, l'urbanisme, les sites, les monuments historiques et leurs abords ; les projets de construction en abords de monuments historiques doivent notamment

recueillir son avis conforme » diriger les travaux d'entretien sur les édifices classés monuments historiques lorsqu'ils sont subventionnés par l'Etat contrôler les travaux sur les édifices inscrits à l'inventaire supplémentaire des monuments historiques. Il est en outre conservateur des monuments historiques appartenant à l'Etat dans son département et affectés au ministère chargé de la Culture, sous réserve de quelques exceptions.

Le conservateur des antiquités et objets d'art

Le conservateur départemental des antiquités et objets d'art est un agent indemnitare de l'Etat, nommé par arrêté ministériel, sur avis de la Commission supérieure des Monuments Historiques (section objets d'art), placé sous l'autorité du préfet de chaque département. En liaison avec la Drac, assisté d'un ou plusieurs conservateurs-délégués, il est chargé du recensement, de la mise en œuvre des protections juridiques, de la conservation et la mise en valeur du patrimoine mobilier dans les monuments historiques (hors musées). Il exerce cette mission fondamentale en plus d'une activité principale le plus souvent liée aux métiers de la Culture. Cependant, plus de 35 départements se sont dotés de services compétents pour la sauvegarde et la mise en valeur du patrimoine mobilier, dont les agents sont nommés par arrêté du ministre chargé de la Culture, conservateurs ou conservateurs-délégués des Antiquités et Objets d'art.

Les techniciens-conseils

Les techniciens-conseils pour les orgues protégées au titre des monuments historiques sont agréés pour une durée de cinq ans au plus, renouvelable, par arrêté du ministre chargé de la Culture, en application du décret n° 95-501 du 26 avril 1995. Il ne s'agit pas d'un statut. Ces personnalités qualifiées sont choisies pour leur compétence ou leurs travaux dans le domaine des orgues, notamment en matière universitaire. Les techniciens-conseils exercent leur profession à titre libéral et perçoivent des honoraires, selon trois niveaux de complexité, déterminés par la nature des travaux et du contenu des études nécessaires à la conservation d'un orgue protégé. En dehors de ces missions de maîtrise d'œuvre, les techniciens-conseils accomplissent des missions d'assistance et de conseil, sous forme d'avis ou de propositions, pour la mise en œuvre des actions qui tendent à protéger, à conserver et à faire connaître le patrimoine instrumental de la France. Pour ce faire, les techniciens-conseils reçoivent une compétence territoriale sous l'autorité des directions régionales des affaires culturelles – conservations régionales des monuments historiques. Cette mise en place, par le ministère de la Culture et de la Communication, de maîtres d'œuvres professionnels donne à la direction de l'architecture et du patrimoine et aux services déconcentrés les moyens d'expertise et de contrôle souhaités afin de répondre au mieux aux demandes des propriétaires, le plus souvent des collectivités territoriales.

Les experts

Agréés par arrêté ministériel, leur mission est de donner des avis à l'administration centrale et aux services déconcentrés sur les demandes de protection ou les projets de travaux portant sur des biens nécessitant des compétences techniques spécifiques. Des experts ont été nommés dans les domaines suivant : patrimoine maritime et fluvial, patrimoine ferroviaire, patrimoine automobile, patrimoine campanaire, patrimoine technique et militaires.

L'inspecteur général des monuments historiques

L'inspection générale des monuments historiques s'articule en deux composantes, intervenant fréquemment ensemble, en fonction de leurs spécificités : l'inspecteur général des monuments historiques - conservateur général du patrimoine, qui est un historien d'art de formation l'inspecteur général des monuments historiques - architecte en chef des monuments historiques Ils rendent conjointement, selon leurs compétences respectives, leurs avis aux DRAC sur les études et projets de restauration du patrimoine

monumental, sur les projets de programmation de travaux, ou tout sujet important nécessitant une expertise approfondie dans le domaine du patrimoine. Ils contrôlent tous deux la mise en œuvre des travaux de restauration approuvés, et peuvent se voir confier par le ministre toute mission d'expertise ou de conseil relevant de leur spécificité. L'inspecteur général des monuments historiques – architecte rapporte devant la commission supérieure les projets de travaux qui lui sont soumis. L'inspecteur général des monuments historiques – conservateur émet un avis sur les projets de classement au titre des monuments historiques soumis à la commission supérieure. Il contrôle l'activité scientifique des conservateurs des monuments historiques et des conservateurs des antiquités et objets d'art.

Les chargés de mission sûreté et sécurité Officier de police

Le chargé de mission pour la sécurité du patrimoine conseille l'ensemble des services qui interviennent sur le patrimoine et l'architecture : administration centrale, inspection générale de l'architecture et du patrimoine, directions régionales des affaires culturelles (DRAC), conservations des antiquités et objets d'art. En relation avec les architectes des bâtiments de France, les architectes en chef des monuments historiques et les différents propriétaires, affectataires et utilisateurs, il élabore des schémas de sûreté afin d'harmoniser les protections des monuments historiques et des objets mobiliers contre le vol, les intrusions malveillantes et le vandalisme. Sa mission de prévention s'exerce également par des actions de formation et de sensibilisation des personnels du ministère de la culture et de la communication aux risques de vols ou de dégradations dans les lieux classés. Enfin, il est le correspondant principal de la direction de l'architecture et du patrimoine avec les services de police et de gendarmerie investis dans la lutte contre le trafic illicite des biens culturels. Les actions engagées par la direction de l'architecture et du patrimoine en matière de protection contre le risque incendie ont été renforcées à la suite de l'incendie du Parlement de Bretagne à Rennes en 1994. Un officier supérieur de la brigade de sapeurs-pompiers de Paris, détaché auprès de l'inspection générale de l'administration des affaires culturelles, est placé auprès de la direction de l'architecture et du patrimoine comme conseiller technique en matière de sécurité incendie. Il apporte son soutien technique en priorité au profit des monuments historiques appartenant à l'État et relevant de la responsabilité de la direction de l'architecture et du patrimoine. En complément, à la demande de la DAPA, des DRAC et des SDAP, il intervient pour d'autres monuments historiques ou d'autres édifices affectés à la DAPA, tels que les écoles d'architecture. Il effectue des évaluations de la sécurité incendie d'édifices assorties de préconisations, des études de dossier et des actions de formation à la prévention incendie des agents des services du patrimoine.

Le Laboratoire de recherche des monuments historiques

Le Laboratoire de recherche des monuments historiques est un service à compétence nationale du ministère chargé de la Culture (direction de l'architecture et du patrimoine, sous-direction des monuments historiques) consacré aux études et recherches sur la conservation in situ des monuments et objets du patrimoine culturel. Le LRMH est installé depuis 1970 dans les communs du château de Champs-sur-Marne. Il comprend 8 sections : pierre, vitrail, peintures murales polychromie, grottes ornées, textile, métal-béton, microbiologie, bois. En 2003, l'équipe comprend 33 personnes : ingénieurs, techniciens, photographes, documentalistes, secrétaires. Le LRMH mène des études de fond, en liaison avec les autres laboratoires institutionnels du Ministère de la Culture et de la Communication et les laboratoires du CNRS, des universités ou des grandes écoles, sur un monument ou sur une œuvre d'art, à la demande des maîtres d'œuvre et responsables du service des monuments historiques, généralement dans le cadre d'une étude pluridisciplinaire préalable aux travaux de restauration, ou des études sur l'environnement des œuvres et sur leurs conditions de conservation.

Le Centre des monuments nationaux

Etablissement public national à caractère administratif, relevant du ministère de la Culture et de la Communication, le Centre des monuments nationaux a pour mission de présenter au public près de cent monuments historiques et sites archéologiques appartenant à l'Etat ou lui appartenant en propre, recevant quelque neuf millions de visiteurs par an, d'en développer la fréquentation et d'en favoriser la connaissance. Le Centre des monuments nationaux (Monumental, Editions du Patrimoine) est chargé de publier, pour son compte ou en tant qu'éditeur délégué des services patrimoniaux (inventaire, monuments historiques, archéologie, ethnologie) du ministère chargé de la Culture, des livres à vocation touristique et des publications scientifiques se rapportant ou non aux monuments qu'il gère. Avec les directions régionales des affaires culturelles et les collectivités territoriales, il s'attache à faire participer les monuments nationaux à la vie culturelle et au développement du tourisme.

Dès la fin de la seconde guerre mondiale naît l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO). En 1972, lors de la Conférence générale de l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture qui avait lieu à Paris, il y a mise en place d'un Comité du Patrimoine Mondial (1972) : l'Organisation des Nations Unies met en place une convention pour la protection du patrimoine mondial, culturel et naturel. Le Comité du patrimoine mondial se réunit une fois par an et il est responsable de la mise en œuvre de la Convention du patrimoine mondial, détermine l'utilisation du Fonds du patrimoine mondial et alloue l'assistance financière suite aux demandes des États membres. C'est à lui de décider si un site est accepté pour inscription sur la Liste du patrimoine mondial.

Dans le monde

Trois organisations internationales non-gouvernementales ou inter-gouvernementales mentionnées dans la Convention conseillent le Comité dans ses délibérations²² :

L'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN) est une organisation internationale non gouvernementale. Elle conseille le Comité du patrimoine mondial pour la sélection des biens naturels du patrimoine et, grâce à son réseau mondial de spécialistes, présente des rapports sur l'état de conservation des biens inscrits. L'UICN, qui compte actuellement plus de 1000 membres, a été créée en 1948 et son siège est à Gland, en Suisse.

Conseil international des monuments et des sites (ICOMOS) fournit au Comité du patrimoine mondial des évaluations des biens culturels proposés pour inscription sur la Liste du patrimoine mondial. L'un des buts essentiels du Conseil International des Monuments et des Sites, qui pose la charte de Venise comme l'élément de base à sa fondation, est selon les statuts « d'encourager l'adoption et la mise en œuvre de recommandations internationales concernant les monuments, ensembles et sites ». Il constitue un réseau d'experts et bénéficie des échanges interdisciplinaires de ses membres qui comptent parmi eux des architectes, des historiens, des archéologues, des historiens de l'art, des géographes, des anthropologues, des ingénieurs et des urbanistes. C'est une organisation internationale non gouvernementale fondée en 1965, dont le secrétariat international est à Paris. Des groupes de travail, synthétisés dans le tableau, peuvent être intéressants à contacter dans le cadre du projet : Analyse et Restauration des structures du Patrimoine architectural, Bois, Peintures murales et les pierres.

²² <http://whc.unesco.org/fr/organisationsconsultatives/>

Nom du groupe de travail	Président du groupe	Lien :
Analyse et Restauration des structures du Patrimoine architectural / Analysis and restoration of structures architectural heritage (ISCARSAH)	Görün Arun (Turquie)	http://iscarsah.Icomos.org/
Bois / Wood (IWC)	Gennaro Tampone (Italie)	http://www.Icomos.org/iwc/
Patrimoine du XXème siècle / 20th century heritage (ISC20C)	Sheridan BURKE (Australie)	http://Icomos-isc20c.org/
Peintures murales / Wall painting	Susanna Wierdl (Hongrie)	
Pierre / Stone (ISCS)	Stefan SIMON (Allemagne)	http://iscs.ocomos.org

Centre international d'études pour la conservation et la restauration des biens culturels (ICCROM), créée en 1956, est un organisme intergouvernemental qui fournit un avis autorisé sur la conservation des sites inscrits ainsi que sur la formation aux techniques de restauration. Les acteurs du domaine de la préservation patrimoniale, y compris les scientifiques, les restaurateurs, les conservateurs de musées, les responsables de sites, les archivistes, les chercheurs et les archéologues s'appuient sur l'ICCROM pour ses initiatives de classe internationale en matière de formation, d'information, de recherche, de coopération **et** de sensibilisation en matière de conservation.

Annexe 3 : Charte de Venise

CHARTRE INTERNATIONALE SUR LA CONSERVATION ET LA RESTAURATION DES MONUMENTS ET DES SITES

Ile Congrès international des architectes et des techniciens des monuments historiques, Venise, 1964

Adoptée par ICOMOS en 1965.

Chargées d'un message spirituel du passé, les œuvres monumentales des peuples demeurent dans la vie présente le témoignage vivant de leurs traditions séculaires. L'humanité, qui prend chaque jour conscience de l'unité des valeurs humaines, les considère comme un patrimoine commun, et, vis-à-vis des générations futures, se reconnaît solidairement responsable de leur sauvegarde. Elle se doit de leur transmettre dans toute la richesse de leur authenticité.

Il est dès lors essentiel que les principes qui doivent présider à la conservation et à la restauration des monuments soient dégagés en commun et formulés sur un plan international, tout en laissant à chaque nation le soin d'en assurer l'application dans le cadre de sa propre culture et de ses traditions.

En donnant une première forme à ces principes fondamentaux, la Charte d'Athènes de 1931 a contribué au développement d'un vaste mouvement international, qui s'est notamment traduit dans des documents nationaux, dans l'activité de l'ICOM et de l'UNESCO, et dans la création par cette dernière du Centre international d'études pour la conservation et la restauration des biens culturels. La sensibilité et l'esprit critique se sont portés sur des problèmes toujours plus complexes et plus nuancés ; aussi l'heure semble venue de réexaminer les principes de la Charte afin d'en approfondir et d'en élargir la portée dans un nouveau document. En conséquence, le IIe Congrès International des Architectes et des Techniciens des Monuments Historiques, réuni, à Venise du 25 au 31 mai 1964, a approuvé le texte suivant :

Définitions

Article 1. La notion de monument historique comprend la création architecturale isolée aussi bien que le site urbain ou rural qui porte témoignage d'une civilisation particulière, d'une évolution significative ou d'un événement historique. Elle s'étend non seulement aux grandes créations mais aussi aux œuvres modestes qui ont acquis avec le temps une signification culturelle.

Article 2. La conservation et la restauration des monuments constituent une discipline qui fait appel à toutes les sciences et à toutes les techniques qui peuvent contribuer à l'étude et à la sauvegarde du patrimoine monumental.

Article 3. La conservation et la restauration des monuments visent à sauvegarder tout autant l'œuvre d'art que le témoin d'histoire.

Conservation

Article 4. La conservation des monuments impose d'abord la permanence de leur entretien.

Article 5. La conservation des monuments est toujours favorisée par l'affectation de ceux-ci à une fonction utile à la société ; une telle affectation est donc souhaitable mais elle ne peut altérer l'ordonnance ou le décor des édifices. C'est dans ces limites qu'il faut concevoir et que l'on peut autoriser les aménagements exigés par l'évolution des usages et des coutumes.

Article 6. La conservation d'un monument implique celle d'un cadre à son échelle. Lorsque le cadre traditionnel subsiste, celui-ci sera conservé, et toute construction nouvelle, toute destruction et tout aménagement qui pourrait altérer les rapports de volumes et de couleurs seront proscrits.

Article 7. Le monument est inséparable de l'histoire dont il est le témoin et du milieu où il se situe. En conséquence le déplacement de tout ou partie d'un monument ne peut être toléré que lorsque la sauvegarde du monument l'exige ou que des raisons d'un grand intérêt national ou international le justifient.

Article 8. Les éléments de sculpture, de peinture ou de décoration qui font partie intégrante du monument ne peuvent en être séparés que lorsque cette mesure est la seule susceptible d'assurer leur conservation.

Restauration

Article 9. La restauration est une opération qui doit garder un caractère exceptionnel. Elle a pour but de conserver et de révéler les valeurs esthétiques et historiques du monument et se fonde sur le respect de la substance ancienne et de documents authentiques. Elle s'arrête là où commence l'hypothèse, sur le plan des reconstitutions conjecturales, tout travail de complément reconnu indispensable pour raisons esthétiques ou techniques relève de la composition architecturale et portera la marque de notre temps. La restauration sera toujours précédée et accompagnée d'une étude archéologique et historique du monument.

Article 10. Lorsque les techniques traditionnelles se révèlent inadéquates, la consolidation d'un monument peut être assurée en faisant appel à toutes les techniques modernes de conservation et de construction dont l'efficacité aura été démontrée par des données scientifiques et garantie par l'expérience.

Article 11. Les apports valables de toutes les époques à l'édification d'un monument doivent être respectés, l'unité de style n'étant pas un but à atteindre au cours d'une restauration. Lorsqu'un édifice comporte plusieurs états superposés, le dégagement d'un état sous-jacent ne se justifie qu'exceptionnellement et à condition que les éléments enlevés ne présentent que peu d'intérêt, que la composition mise au jour constitue un témoignage de haute valeur historique, archéologique ou esthétique, et que son état de conservation soit jugé suffisant. Le jugement sur la valeur des éléments en question et la décision sur les éliminations à opérer ne peuvent dépendre du seul auteur du projet.

Article 12. Les éléments destinés à remplacer les parties manquantes doivent s'intégrer harmonieusement à l'ensemble, tout en se distinguant des parties originales, afin que la restauration ne falsifie pas le document d'art et d'histoire.

Article 13. Les adjonctions ne peuvent être tolérées que pour autant qu'elles respectent toutes les parties intéressantes de l'édifice, son cadre traditionnel, l'équilibre de sa composition et ses relations avec le milieu environnant.

Sites monumentaux

Article 14. Les sites monumentaux doivent faire l'objet de soins spéciaux afin de sauvegarder leur intégrité et d'assurer leur assainissement, leur aménagement et leur mise en valeur. Les travaux de conservation et de restauration qui y sont exécutés doivent s'inspirer des principes énoncés aux articles précédents.

Fouilles

Article 15. Les travaux de fouilles doivent s'exécuter conformément à des normes scientifiques et à la « Recommandation définissant les principes internationaux à appliquer en matière de fouilles archéologiques » adoptée par l'UNESCO en 1956. L'aménagement des ruines et les mesures nécessaires à la conservation et à la protection permanente des éléments architecturaux et des objets découverts seront assurés. En outre, toutes initiatives seront prises en vue de faciliter la compréhension du monument mis au jour sans jamais en dénaturer la signification. Tout travail de reconstruction devra cependant être exclu à priori, seule l'anastylose peut être envisagée, c'est-à-dire la reconstitution des parties existantes mais démembrées. Les éléments d'intégration seront toujours reconnaissables et représenteront le minimum nécessaire pour assurer les conditions de conservation du monument et rétablir la continuité de ses formes.

Annexe 4 : Présentation de HeritageCare

Présentation des acteurs

Le projet implique dix-neuf partenaires (universités, centres de recherche et associations) pour la création d'un organisme à but non lucratif qui s'intéresse à l'état de santé du patrimoine bâti et au mobilier. Pour chacun des pays, les acteurs du projet sont décomposés en partenaires et en partenaires associés. En France, ces premiers sont composés de deux universités (UCA et ULIM) et ces derniers sont composés de cinq instituts (DRAC, ENSACF, LG, PANTHEON, ADP). Le but était de représenter l'ensemble des acteurs du patrimoine avec le gestionnaire des biens de l'état (DRAC), une entreprise de travaux (LG), un architecte spécialisé dans la restauration du patrimoine (PANTHEON, ADP).

Partenaires	Partenaires associés
Français	
Université Clermont Auvergne (UCA) Université de Limoges (ULIM)	Direction régionale des affaires culturelles Auvergne Rhône-Alpes (DRAC Auvergne Rhône-Alpes) Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Clermont-Ferrand (ENSACF) Louis Geneste (LG) Atelier d'Architecture PANTHEON (PANTHEON) Cabinet d'Architecture Pascal Parmantier-Architecte Du Patrimoine (ADP)
Portugais	
Université de Minho (UM) Direction régionale de la culture du Nord (DRCN) Centre informatique graphique (CCG)	Association portugaise des vieilles maisons (APCA) Diocèse de Braga (AB) GECORPA - Guilde du Patrimoine (GECORPA)
Espagnols	
Université de Salamanque (USAL) Fondation Santa Maria La Real (FSMR) Institut andalou du patrimoine historique (IAPH)	Association Hispania Nostra Espagne (AHN) Association espagnole des gestionnaires du patrimoine culturel (AEGPC) Adeco Camino (AC)

Instituts impliqués dans chacun des pays

Les partenaires français

Université Clermont Auvergne (UCA)

L'UCA est composée entre autres d'un laboratoire de recherche (l'Institut Pascal, UMR 6602) et est représentée dans le projet à travers l'axe Mécanique, Génie Mécanique, Génie Civil, Génie Industriel (M3G). Cet axe développe des compétences dans les domaines de la fiabilité, de la durabilité des constructions, vis-à-vis du vieillissement naturel et de la mise en place du BIM (building information modelling) dans la gestion des bâtiments. Ses domaines de compétences ont permis de proposer un modèle hBIM (historic building information modelling) dans le cadre du projet. L'équipe qui travaille sur le projet est représentée par Alaa Chateaufort -Directeur de Cideco et Professeur des Universités- et Aurélie Talon – Maître de conférences.

Université de Limoges (ULIM)

L'université de Limoges, représentée directement par Sylvie Yotte -Enseignant chercheur-, dirige un master « maintenance des ouvrages » et une licence professionnelle « diagnostic du patrimoine ». Ces formations ont été un avantage pour le projet car elles ont permis de proposer des techniques d'inspections actuelles et ont permis aux étudiants de tester la méthodologie HeritageCare.

Les partenaires associés français

Atelier d'Architecture Panthéon – Architecte

L'Atelier d'Architecture Panthéon (AAP), représenté par monsieur Panthéon, est spécialisé dans les domaines de l'architecture, de la conception, de l'expertise et du diagnostic. Au sein du projet HeritageCARE, l'Atelier d'Architecture Panthéon avait le rôle de représentant des concepteurs de solutions de restauration ou de restructuration de bâtiments ou sites historiques.

École Nationale Supérieure d'Architecture de Clermont-Ferrand

L'ENSACF, représentée par Mathilde Lavenu -architecte du patrimoine-, est placée sous la tutelle du ministère de la culture et de la communication. Elle a pour missions entre autres : la formation initiale des professionnels de l'architecture, la recherche en architecture et la valorisation de celle-ci, la formation à la recherche, l'échange des savoirs et des pratiques au sein de la Communauté Scientifique et Culturelle Internationale et etc. Au sein du projet HeritageCare, Mathilde Lavenu a participé aux réunions de travaux pour la mise en place des méthodologies et a contribué au choix du corpus des bâtis.

Louis Geneste – Entreprise de travaux MH

Louis Geneste représentée par François Pauraud, est une entreprise de travaux spécialisée dans les restaurations des bâtis anciens. Elle est née il y a 150 ans lors de la restauration cathédrale de Clermont Ferrand avec Viollet le Duc et elle est implantée à Clermont-ferrand depuis quatre générations. Elle a ainsi acquis la réputation d'un savoir-faire de grande qualité, qui s'est exprimé au travers de nombreux édifices du patrimoine régional.

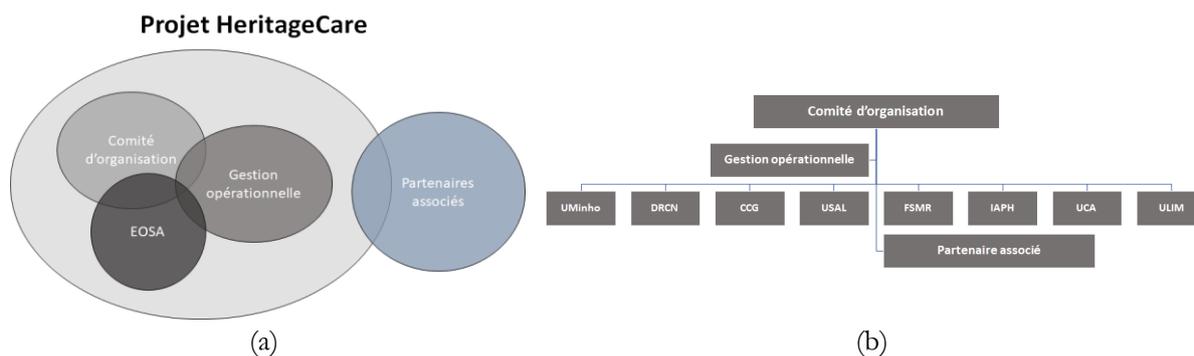
Direction régionale des Affaires Culturelles – Gestionnaire de l'Etat

Au sein de la DRAC, la Conservation Régionale des Monuments Historiques (CRMH) est chargée de la conservation et de la valorisation du patrimoine et de la mise en œuvre des dispositions du sixième du code du patrimoine qui précisent le régime juridique applicable aux monuments historiques et notamment les conditions du contrôle exercé par l'État. Ainsi, la DRAC veille à l'application de la réglementation et met en œuvre le contrôle scientifique et technique dans le domaine des monuments historiques. Au sein du projet HeritageCARE, l'avis scientifique, technique et réglementaire de la DRAC a été demandé vis-à-vis des actions proposées ou à mener dans les territoires régionaux.

Gestion de HeritageCare

Le projet est organisé, comme présenté au schéma intitulé “Gestion du projet HeritageCare a) Schéma de l'organisation du projet ; b) organigramme des responsabilités” avec :

- le comité de pilotage : il est responsable de toutes les décisions politiques, techniques et stratégiques, il est coordonné par l'Université de Minho (UM) et il est composé au minimum d'une personne de chaque entité partenaire. Le comité se réunit tous les 6 mois (ou pour des questions urgentes).
- la direction opérationnelle : elle est responsable de l'exécution des tâches administratives, financières et de communication internes quotidiennes et elle est coordonnée par l'Université de Minho et compte au minimum deux membres de chaque entité partenaire.
- le comité de pilotage et la direction opérationnelle constituent les deux conseils principaux et auront l'assistance d'EOSA qui est une entreprise privée. Elle proposera des conseils pour aider à l'exécution des tâches de gestion et de communication du projet.
- huit partenaires et onze partenaires associés, dont des universités, des centres de recherche, des entreprises et des associations dans le milieu du patrimoine, sont impliqués.



Gestion du projet HeritageCare a) Schéma de l'organisation administrative du projet ; b) organigramme des responsabilités

Le projet est divisé en quatre tâches, réparties suivant le planning du tableau intitulé « Planning général du projet européen HeritageCARE » :

- GT1 : Mise en place des méthodologies,
- GT2 : Développement d'outils spécifiques,
- GT3 : Dans le cadre du projet européen, l'ensemble des pays doivent appliquer les méthodologies mises en place. Dans le cas de la France une vingtaine de bâtis a été sélectionnée pour le niveau de service 1 (SL1).
- GT4 : Validation des méthodologies pour le niveau de service 2 (SL2) sur 5 bâtis et validation des méthodologies pour le niveau de service 3 (SL3).

	2016	2017					2018					2019																								
	Année 1												Année 2												Année 3											
Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
GT1																																				
GT2																																				
GT3																																				
GT4																																				

Planning général des groupes de travail de HeritageCare

L'ensemble des partenaires mettent en place les méthodologies et des outils en vue que l'entité HeritageCARE soit instaurée. Par exemple, l'Université Clermont Auvergne a validé les méthodologies du niveau de service 2 et du niveau de service 3. Chaque partenaire a un planning a respecté.

Université de Minho	
09/2016 – 02/2017	Rapport : Enquête et analyse des typologies structurelles, des processus de dégradation et de dégradation des constructions patrimoniales
11/2016 – 04/2017	Mise en place de la méthodologie générale pour la conservation préventive des constructions de valeur historique et culturelle
03/2017 – 07/2017	Liste de l'équipement pour chacune des méthodologies
06/2017 – 04/2019	Création et mise en œuvre de l'entité (à but non lucratif) HeritageCARE
11/2017 – 03/2019	Inspection des 20 monuments au niveau de service (1)
05/2017 – 06/2019	Inspection des monuments au niveau de service (2) et (3)
Direction Régionale Culturelle du Nord	
11/2017 – 01/2018	Sélection des bâtis
01/2018 – 12/2018	Inspection des 20 monuments au niveau de service (1)
07/2018 – 03/2019	Rapport sur la validation de la méthodologie appliquée pour SL1
11/2018 – 03/2019	Mise en place d'un guide de bonnes pratiques pour la conservation préventive

	Université Clermont Auvergne	
France	11/2016 – 04/2017	Participation pour la mise en place de la méthodologie générale pour la conservation préventive des constructions de valeur historique et culturelle
	11/2017 – 03/2019	Inspection des 20 monuments au niveau de service (1)
	05/2017 – 06/2019	Inspection des monuments au niveau de service (2) et (3)
	05/2018 – 04/2019	Application de la méthodologie de SL2 aux constructions de valeur historique et culturelle d'études de cas
	05/2018 – 04/2019	Application de la méthodologie de SL3 aux constructions de valeur historique et culturelle d'études de cas
	06/2019	Rapport sur la validation de la méthodologie appliquée pour SL2 & SL3
	02/2019	Plan de communication pour le public en général
	Université de Salamanca	
Espagne	07/2017 – 03/2018	Plate-forme de service Web pour la surveillance du patrimoine, avec application pour systèmes mobiles et SIG intégré
	10/2017 – 06/2018	SmartCARE3D : système intelligent d'aide à la décision
	07/2017 – 06/2018	Outil de gestion basé sur le modèle hBIM: hBIMCARE
	07/2017 – 06/2018	Logiciel, applications et plug-in d'analyse et de visualisation des résultats
	07/2017 – 06/2018	Demande de support d'activité d'inspection
	11/ 2017 – 03/2019	Inspection des 20 monuments au niveau de service (1)
	05/2017 – 06/ 2019	Inspection des monuments au niveau de service (2) et (3)

Tâche des différentes partenaires

Annexe 5 : Données pour constituer des référentiels

Cas de la maçonnerie

Dans le cas de la maçonnerie, les référentiels proposent :

- quatre typologies de désordres concernant le mortier, les fissures, les déplacements et les efflorescences,
- et quatre conditions d'état.

		Condition d'état			
		1	2	3	4
Description des conditions d'état générale sur la maçonnerie	[ODOT 2009]	Il y a peu ou pas de détérioration. Présence uniquement de défauts de surface.	Présence d'une détérioration mineure (petites fissures, chute de mortier au aux intempéries).	Dégradation modérée ou importante et craquage. Dégradation majeure des joints.	La détérioration est importante, les désordres peuvent affecter la capacité structurale de l'élément.
Description des conditions d'état sur le mortier	[AASHTO 2010]	Absence de désordre	Présence de petites fissures et/ou de légères chutes de mortier -fissures – vides < 10% du mortier	Importante fissure et de vides dans le mortier -fissure – vides > 10% du mortier	La condition d'état est préoccupante, une étude structurale doit être réalisée
	[BIRMM 2015]	Absence de désordre	Présence de petite sfissures et/ou de légères chutes de mortier -fissures – vides < 10% du mortier	Importante fissures et vides dans le mortier -fissure – vides > 10% du mortier	La condition d'état est préoccupante, une étude structurale doit être réalisée
Description des conditions d'état sur les fissures	[AASHTO 2010]	Présence de fissure, mais la maçonnerie n'a pas bougé	Présence de fissures, légers mouvements de blocs de pierre -ouverture des fissures 0,5 à 2,0 mm	La maçonnerie présente des fissures qui ont engendré des déformations. Certaines pierres ne sont plus présentes -ouverture des fissures > 2,0 mm	La condition d'état est préoccupante, une étude structurale doit être réalisée
Description des conditions d'état sur les déplacements	[BIRMM 2015]	Absence de désordre	Le bloc ou la pierre s'est décalé légèrement.	Le bloc ou la pierre s'est déplacé significativement hors de l'alignement ou est manquant, mais ne justifie pas un examen structurel.	La condition d'état est préoccupante, une étude structurale doit être réalisée
Description des conditions d'état sur les efflorescences	[AASHTO 2010]	Absence de désordre	Modéré mais sans rouille La surface doit être blanche (sans retrait de matière du support)	Présence importante avec rouille Accumulation importante avec tâche de rouille	La condition d'état est préoccupante, une étude structurale doit être réalisée
	[BIRMM 2015]	Absence de désordre	Modéré mais sans rouille La surface doit être blanche (sans retrait de matière du support)	Présence importante avec rouille Accumulation importante avec tâche de rouille	La condition d'état est préoccupante, une étude structurale doit être réalisée
Préconisation proposée	[ODOT 2009]	Ne rien faire	Ne rien faire ou réparer	Ne rien faire ou réparer	Ne rien faire, réparer ou remplacer
	[AASHTO 2010]	Ne rien faire Protéger	Ne rien faire Protéger	Ne rien faire Protéger Réparation Réhabiliter	Ne rien faire Réhabiliter

Cas du bois

Dans le cas du bois, les référentiels proposent :

- Six typologies de désordres concernant les fentes, les fissures, les pourritures, les nœuds, les pertes de sections et les connexions,
- et quatre condition d'état.

		Condition d'état			
		1	2	3	4
Description des conditions d'état général sur le bois selon le guide	[ODOT 2009]	Le diagnostic ne met pas en évidence d'altérations. Il peut y avoir des fissures superficielles et des fentes mais qui n'ont pas d'incidence sur la structure du bâti.	Présence de dégradations des aux insectes mais ces dégradations n'affectent pas la force et l'utilisation de l'élément	Présence d'altérations provoquant une perte de résistance de l'éléments mais pas d'une ampleur suffisante pour affecter l'utilisation de l'ouvrage	Présence d'altérations provoquant une perte de résistance de l'éléments affectant l'utilisation de l'ouvrage
Description des conditions d'état sur les fentes	[ODOT 2009]	Fissures ou fentes situées seulement sur un côté avec une ouverture inférieure à 3/8 de large	Fissures, les fentes ayant une ouverture supérieure à 3/8 de large sur un seul côté, si présence de défauts des deux côtés leur ouverture doit être inférieure au 3/8	Présence d'un point de faiblesse, de fissures situées sur les deux faces de l'élément avec ouverture supérieur au 3/8 et les longueurs des fissures sont inférieures à la moitié de la longueur de l'élément	Présence de point de faiblesse et présence de fissure supérieure à la moitié de la longueur de l'élément
	[BIRMM 2015]	Absence de désordre	La longueur de la fente est inférieure à l'épaisseur de l'élément	Longueur égale ou supérieure à la profondeur de l'élément, mais ne nécessitant pas de révision structurale.	La condition d'état est préoccupante, une étude structurale doit être réalisée
	[AASHTO 2010]	La longueur de la fente ne doit pas dépasser la longueur correspondant à l'épaisseur de l'éléments	La longueur de la fente est inférieure à 25% de la longueur de l'élément.	La longueur de la fente est inférieure à 25% de la longueur de l'élément.	La longueur de la fente est supérieure à 25% de la longueur de l'élément.
Description des conditions d'état sur les fissures	[BIRMM 2015]	Absence de désordre	Présence de fissures non évolutives	Présence de fissures évolutives mais pas besoin d'examen structural	La condition d'état est préoccupante, une étude structurale doit être réalisée
	[AASHTO 2010]	Absence de désordre	Propagation de la fissure inférieure à 10% de l'épaisseur de l'élément	Propagation de la fissure inférieure à 50% de l'épaisseur de l'élément	Propagation de la fissure supérieure à 50% de l'épaisseur de l'élément
Description des conditions d'état sur les pourritures	[ODOT 2009]	Absence de pourriture Essai semi destructif ; Test de résistance	La pourriture peut être présente Essai semi destructif ; Test de résistance	La pourriture existe mais n'affecte pas la structure en bois Essai semi destructif ; Test de résistance	La pourriture existe et affecte pas la structure en bois Essai semi destructif ; Test de résistance
	[BIRMM 2015]	Idem que le guide AASTO			
	[AASHTO 2010]	Absence de désordre ou uniquement surfacique	Modérée : moins de 10% de l'épaisseur de l'élément	Pourriture supérieure à 10% de l'épaisseur de l'élément et / ou se trouvant dans des zones de tension	La condition d'état est préoccupante, une étude structurale doit être réalisée
Description des conditions d'état sur les nœuds	[AASHTO 2010]	Absence de désordre	Profondeur du nœud inférieure à 5% de l'épaisseur de l'élément	Profondeur du défaut inférieure à 50 % de l'épaisseur de l'élément	Profondeur du défaut supérieure à 50 % de l'épaisseur de l'élément
	[BIRMM 2015]	Idem que le guide AASTO			
Description des conditions d'état sur les pertes de sections/abrasion	[AASHTO 2010]	Absence de désordre ou perte de section surfacique	Perte de section inférieure à 10% de l'épaisseur de l'éléments	Perte de section supérieur à 10% de l'épaisseur de l'éléments	La condition d'état est préoccupante, une étude structurale doit être réalisée
	[BIRMM 2015]	Idem que le guide AASTO			
Description des conditions d'état sur les connexions	[BIRMM 2015]	La connexion est en place et fonctionne comme prévu.	Des attaches sont desserrées ou présence de rouille mais l'assemblage est en place et fonctionne comme prévu.	Boulons, rivets ou attaches manquants ; soudures brisées ; mais ne justifie pas un examen structural.	La condition d'état est préoccupante, une étude structurale doit être réalisée
Préconisation proposée	[AASHTO 2010]	Ne rien faire Protéger	Ne rien faire Protéger	Ne rien faire Protéger Réparation Rehabiliter	Ne rien faire Rehabiliter
	[ODOT 2009]	Ne rien faire	Ne rien faire ; Réparation ou protéger la pièce	Ne rien faire ; Réparation ou protéger la pièce Remplacer un élément	Ne rien faire ; Réparation ou protéger la pièce Remplacer un élément

Cas du métal (acier)

Dans le cas du bois, les référentiels proposent :

- Trois typologies de désordres concernant la corrosion, les fissures et les connexions.
- et quatre à cinq condition d'état.

		1	2	3	4	5
Structure métallique peinte	[ODOT 2009]	Absence visuelle de corrosion, peinture saine.	Peu ou pas de corrosion active. Présence de quelques signes de faiblesse de la peinture. Mais pas d'exposition directe du métal.	Présence modérée de rouille de surface. Présence de métal exposé, mais pas de perte de section.	La peinture de protection ne tient plus son rôle. Présence de corrosion justifiant des pertes de section des éléments mais ne nécessite pas d'étude structurale.	La corrosion a provoqué une perte de section et est suffisante pour justifier une analyse structurale afin de déterminer l'impact sur la structure.
Structure métallique non peinte	[ODOT 2009]	Pas de présence ou peu de corrosion de l'acier non peint. La couche initiale d'oxydation est en bon état et bien adhérent. Les connexions sont en bon état.	Présence de rouille en surface ou présence de piqûres sur l'acier non peint. Les altérations n'engendrent pas de perte de régidité.	L'acier a une perte de section mesurable due à la corrosion mais ne justifie pas l'analyse structurale. Le film d'oxyde s'écaille.	La corrosion est avancée. Le film d'oxyde a une texture laminaire avec de fines feuilles de rouille. La perte de section est suffisante pour justifier une analyse structurale afin de déterminer l'impact sur la résistance des éléments	--
Corrosion	[BIRMM 2015]	Absence de désordre	Présence de tâche de rouille. La corrosion de l'acier a débuté.	Présence de perte de section et/ou mais cela ne justifie pas un examen structurel.	La condition nécessite une étude structurale pour déterminer l'effet sur la résistance de l'élément.	--
	[AASHTO 2010]	Absence de désordre	Présence de rouille. La corrosion est initiée.	Présence de piqure de corrosion, perte de section des éléments.	La condition est au-delà des limites établies dans la condition d'état et/ou justifie une étude	--
Fissure	[BIRMM 2015]	Absence de désordre	Présence d'ancienne fissure stable ou qui ont été stabilisée	Présence de fissure mais qui ne nécessite pas d'étude structurale	La condition nécessite une étude structurale pour déterminer l'effet sur la résistance de l'élément.	--
Fissure / fatigue	[AASHTO 2010]	Absence de désordre	Présence de fissures stables	Présence de fissures évolutives	La condition est au-delà des limites établies dans la condition d'état et/ou justifie une étude	--
Connexion	[BIRMM 2015]	Les connexions sont en place et fonctionnent comme prévu	Présence de connexions desserrées avec présence de rouille mais la connexion fonctionne comme prévu.	Perte de connecteurs, ou présence de soudures « cassées » mais pas besoin d'étude structurale	La condition nécessite une étude structurale pour déterminer l'effet sur la résistance de l'élément.	--
	[AASHTO 2010]	Les connexions sont en place et fonctionnent comme prévu	Les connexions sont en place et fonctionnent comme prévu	Présence de défauts isolés. Des boulons / rivets manquants, des soudures cassées ou une connexion rompue.	La condition est au-delà des limites établies dans la condition d'état et/ou justifie une étude	--

Annexe 6 : Principe de techniques d'investigations non destructives

L'inspection visuelle de l'ouvrage est la première étape pour le comprendre et de terminer de ses altérations. Cependant parfois cette première étape nécessite d'être complétée. Les techniques d'investigation sont regroupées en trois catégories selon leur degré de destruction : méthodes destructives, semi destructives et non destructives. Les méthodes non destructives/semi destructives telles que l'auscultation sonore ou les mesures de dureté au scléromètre donnent des indications sur les caractéristiques des matériaux en place. Certaines caractéristiques, comme par exemple la résistance à la compression, nécessitent une destruction partielle de la structure. Le développement de méthodes non destructives et de méthodes faiblement intrusives est encouragé pour éviter d'altérer les structures surtout pour celles à haute valeur esthétique et historique. Ci-dessous sont synthétisées les principales techniques d'investigations non-destructives :

Principe du pachomètre :

Le pachomètre est un instrument mesurant la perturbation d'un champ magnétique sous la présence de métal. Il permet ainsi de détecter la profondeur d'un corps en métal à l'intérieur d'une structure maçonnée. Cet équipement non destructif est développé à la base pour mesurer les enrobages des armatures de béton armés. Les pachomètres standards utilisés pour le béton couvrent des profondeurs relativement faibles (jusqu'à 10cm)²³.

Principe du radar :

Le principe du radar est d'envoyer des ondes électromagnétiques brèves via une antenne émettrice et de récupérer le signal réfléchi par les discontinuités présentes dans le matériau par une antenne réceptrice. En général, les deux antennes se situent dans le même boîtier. Une roulette est fixée au boîtier et permet de mesurer la distance parcourue par les antennes. Ainsi, il est possible d'extraire des profils radar deux dimensions présentant, la longueur parcourue par le boîtier en abscisses, et la profondeur du signal en ordonnée. Les antennes sont reliées à une unité d'acquisition qui assure l'enregistrement du signal. La fréquence du signal est comprise en général entre 200 et 2000 MHz. La résolution des résultats dépend de la fréquence de l'onde électromagnétique²⁴.

Les fréquences basses permettent d'étudier le matériau sur une profondeur allant jusqu'à 4m mais présentent une résolution d'image assez faible. A l'inverse, les hautes fréquences permettent d'obtenir des profils radars précis mais sur des épaisseurs plus faibles. Il est donc nécessaire d'avoir une première idée de ce qu'il faut observer afin d'optimiser les paramètres de la mesure.

Ce type d'essai non destructif permet d'obtenir la disposition et l'appareillage de pierre, les épaisseurs des éléments étudiés. Il peut également indiquer la présence de vides, l'état interne et la cohésion des joints et

²³ Cercles des partenaires du patrimoine. 1998. La détection des métaux dans la pierre. Les cahiers techniques du cercle des partenaires du patrimoine.

²⁴ Cercles des partenaires du patrimoine. 1998. La détection des métaux dans la pierre. Les cahiers techniques du cercle des partenaires du patrimoine.

des pierres. Il permet enfin de détecter la présence d'armatures, agrafes et renfort métalliques. Également il est utilisé dans le cadre de la vérification de travaux confortement à l'aides d'injection^{25 26}.

Principe des méthodes radiographiques : la gammagraphie

Le principe de la mesure repose sur l'exposition d'une surface sensible par un faisceau du rayonnement traversant le matériau à ausculter. Le rayonnement est absorbé en fonction de la nature et de la densité des matériaux traversés. Les surfaces sensibles sont principalement des films radiographiques argentiques.

L'image obtenue est une projection sur un plan des objets contenus dans le matériau. Les niveaux de gris des images correspondant aux objets sont fonction de la densité des objets par rapport à celle du matériau les contenant. Le film est lu par un opérateur qui traduit les variations de niveau gris en objets réels en fonction de la structure étudiée. L'équipement est composé d'un conteneur pour l'émetteur, des gaines pour placer l'émetteur en position d'exposition, d'un dispositif de commande à distance, des films radiographiques de sensibilité et de rapidité variables ainsi que du matériel de positionnement de l'émetteur et du film de part et d'autre de la structure à radiographier.

Cette méthode permet de détecter : la nature, la position, la forme et l'état des armatures²⁷.

Principe de l'auscultation sonore :

La mesure de la vitesse de propagation du son est l'un des essais non destructifs les plus utilisés. Son principe est d'émettre une onde acoustique via un émetteur et de récupérer le signal via un récepteur. L'appareil mesure le temps de propagation de l'onde entre deux points. La vitesse de propagation de l'onde acoustique est ainsi déduite. C'est une grandeur qui permet de caractériser la pierre et la maçonnerie. En effet la vitesse de propagation de l'onde acoustique est reliée à la compacité de la pierre elle-même reliée à sa résistance mécanique. La vitesse de propagation acoustique peut être par ailleurs corrélée au module d'élasticité dynamique. L'utilisation du scléromètre est décrite dans la norme NF EN 14579.

Cette technique permet en outre une étude comparative des différentes zones d'un édifice. On distingue trois modes de transmission : les chemins directs, semi-directs et indirects. Le chemin direct est à privilégier.

Cette méthode permet en outre de déterminer la profondeur d'une fissure observée en surface et ou de déterminer l'état de conservation du marbre²⁸. Notons enfin qu'il est possible d'obtenir un champ de distribution de vitesse du son sur une section en utilisant une technique de tomographie sonore. Il s'agit d'une méthode numérique itérative compilant un grand nombre de données obtenues en surface et

²⁵ Binda, Saisi, Tiraboschi. 2000. Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries. *Construction and Building Materials* 14, 199-233.

²⁶ Bosiljkova, Uranjek, Zarni, Bokan-Bosiljkova. 2010. An integrated diagnostic approach for the assessment of historic masonry structures. *Journal of Cultural Heritage* 11, 239-249.

²⁷ Cercles des partenaires du patrimoine. 1998. La détection des métaux dans la pierre. Les cahiers techniques du cercle des partenaires du patrimoine.

²⁸ El Boudani, Wilkie-Chancellor, Martinez, Hébert, Rolland, Forst, Vergès-Belmin, Serfaty. 2015. Marble characterization by ultrasonic methods, *Procedia Earth and Planetary Science* 15, 249 – 256.

permettant de mettre en évidence la structure interne de l'élément étudié²⁹. Également cette technique a été mis en œuvre afin de contrôler l'efficacité des injections de coulis qui avaient été réalisées dans des piliers de la cathédrale de Noto en Italie. Les résultats ont montré que les tests soniques peuvent être appliqués avec succès pour le diagnostic et le contrôle de l'efficacité des techniques de réparation³⁰.

Principe du scléromètre :

Il a été développé pour l'analyse de la dureté du béton mais il offre de bons résultats sur la pierre. C'est un essai rapide et facile à réaliser. Le principe est de mesurer l'énergie cinétique de rebond initial d'une tige et d'en déduire une mesure de dureté. C'est un moyen rapide de vérifier l'homogénéité des pierres en œuvre. Une bonne interprétation des mesures est indispensable : une dureté de la pierre en surface ne reflète pas nécessairement la dureté au cœur de la pierre. Enfin, avec un calibrage en laboratoire, la mesure de la dureté peut être reliée à la résistance en compression et aux propriétés élastiques de la pierre. Ces mesures peuvent servir de comparatif entre pierre sur un même chantier. Il est conseillé d'effectuer de calculer la moyenne sur la base de dix mesures réalisées sur une pierre³¹. L'utilisation du scléromètre est décrite dans la norme NF EN 12504-2.

Principe de la colorimétrie :

Les mesures colorimétriques peuvent être effectuées sur des éléments en pierre ou autres (ex : enduits) afin de caractériser leur couleur. Le colorimètre caractérise une couleur à l'aide d'un paramètre correspondant à la luminance et de deux paramètres de chrominance qui décrivent la couleur, les paramètres sont :

- L représentant l'indice de clarté, qui va de 0 (noir) à 100 (blanc),
- a représentant l'axe rouge (valeur positive) / vert (valeur négative) en passant par le gris (0),
- b représentant l'axe jaune (valeur positive) / bleu (valeur négative) en passant par le gris (0).

Le but est de pouvoir prescrire l'élément concerné lors des travaux de restauration la une couleur caractéristique. Des études sont menées entre la colorimétrie de la pierre et son état d'altérations ; dans le cas d'un incendie ou dans le cas de l'influence du soiling³². .

Principe de la thermographie infra-rouge :

La thermographie est une technique non destructive permettant d'obtenir l'image thermique d'un objet et ou d'un monument en mesurant son rayonnement infrarouge. Cette méthode mesure le rayonnement

²⁹ Binda, Saisi, Zanzi. 2003. Sonic tomography and flat-jack tests as complementary investigation procedures for the stone pillars of the temple of S. Nicolo l'Arena (Italy). NDT&E International 36. Pages 215-227.

³⁰ Binda, Saisi, Tiraboschi. 2001. Application of sonic tests to the diagnosis of damaged and repaired structures. NDT et E International 34. Pages 123-138.

³¹ Vandevoorde, Pamplona, Schalm, Vanhellemont, Cnudde, Verhaeven. 2009. Contact sponge method: Performance of a promising tool for measuring the initial water absorption for measuring the initial water absorption. Journal of Cultural Heritage 10. Pages 41-47

³² Beck, Janvier-Badosa, Brunetaud, Torok, Al-Mukhtar. 2016. Non-destructive diagnosis by colorimetry of building stone subjected to high temperatures. Journal : European Journal of Environmental and Civil Engineering, Volume 20, 2016 - Issue 6: AUGC 2014: From preservation to innovation. Pages 643-655.

proportionnel à la température de surface d'un milieu permettant de construire une carte de la température apparente de la surface. Cette méthode permet de mesurer, les hétérogénéités thermiques et les présences de discontinuités, de cavité, de décollement et de fissures.

Cette technique était principalement utilisée dans le cas de l'étude de bâtiment récents mais maintenant elle est régulièrement appliquée dans le cadre de l'étude de la conservation des biens culturels tels que dans le cadre de l'étude des décollements des peintures murales, la mise en évidence de fissures, les problèmes d'humidité, la recherche d'ouverture rebouchées. Des recherches sont actuellement en cours afin d'associer à la mesure une profondeur « d'altération » dont la vérification de travaux de renforcement à l'aide d'injection³³.

Principe du diagnostic humidité :

Les sources d'humidité peuvent être dues au ruissellement, à la poussée du vent, à des problèmes de capillarité, de condensation. Les constatations et les mesures visant à localiser et à quantifier l'humidité dans un bâtiment ont pour but direct de mettre en évidence des causes potentielles et de définir des traitements adéquats³⁴.

Mesure in situ et non destructive

Les appareils capacitifs et résistifs, du fait de leur faible coût, de leur facilité et de leur rapidité d'utilisation, sont particulièrement précieux pour le diagnostic. Ils se basent sur la variation de résistivité et de capacitance des matériaux en fonction, entre autres, de leur teneur en humidité. Les appareils résistifs permettent des mesures à faible profondeur par enfoncement de pointes fixées directement sur le boîtier ou sur un porte-sonde relié à l'appareil. Les appareils 'capacitifs' s'utilisent par simple contact avec les surfaces et intègrent l'humidité contenue sur une certaine profondeur (quelques millimètres) de matériau.

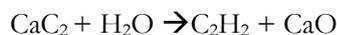
Cependant pour établir un diagnostic précis et pour savoir exactement l'humidité à l'intérieur du mur, il est nécessaire de réaliser des prélèvements destinés à des pesées comparatives avant et après séchage ou à des mesures plus directes à la bombe à carbure.

Mesure in situ et destructive

Cas 1

Dans la zone envisagée, on prélève la quantité souhaitée de matériau (5 à 20 g). On peut, suivant le cas, opter pour un prélèvement en surface ou dans l'épaisseur des murs.

Après pesée, le prélèvement est introduit dans un récipient hermétique calibré muni d'un manomètre, en y joignant un jeu de billes d'acier et une fiole contenant du carbure de calcium (CaC₂) en excès. Le récipient est ensuite fermé hermétiquement, puis agité afin de briser l'ampoule de CaC₂ et d'obtenir un contact homogène avec la matière prélevée afin de favoriser la réaction de formation d'acétylène ci-après :



La pression maximale est lue au manomètre et cette valeur transformée en pourcentage d'humidité sur base d'un tableau de conversion fourni avec l'appareillage. La mesure à la bombe à carbure est relativement rapide et les résultats chiffrés sont obtenus directement sur place. Cependant la méthode est destructive et elle est plus appropriée pour des mesures en surface.

³³ Bosiljkova, Uranjek, Zarni, Bokan-Bosiljkova. 2010. An integrated diagnostic approach for the assessment of historic masonry structures. *Journal of Cultural Heritage* 11. Pages 239-249.

³⁴ Ginger CATED.2016. Diagnostic et traitement des bâtiments humides.

Cas 2

La mesure par pesée est simple et précise, mais les résultats ne sont en général pas disponibles immédiatement. La méthode est destructive du fait des prélèvements nécessaires. La précision est directement liée aux soins apportés au prélèvement et à la précision de la balance par rapport à l'échantillon prélevé (balance au 1/100 de gramme pour un prélèvement d'une dizaine de grammes).

Il consiste à prélever les matériaux constitutifs des murs selon des hauteurs et des profondeurs définies. Ce tramage permet de construire le profil de répartition de l'eau en profondeur et sur la hauteur du mur et aide à déterminer l'origine de l'humidité affectant la zone investiguée. Les échantillons sont séchés jusqu'à masse constante dans une étuve à 65°C.

Les poudres prélevées sont conservées dans un sachet hermétique, pesées et mises à l'étuve afin de sécher les prélèvements. La masse de ces échantillons est pesée régulièrement jusqu'à ce qu'elle soit constante. La teneur en eau de l'échantillon est alors déterminée. La formule sert à établir les gradients d'humidité de la zone où ont été réalisés les prélèvements.

$$\text{teneur massique}_{\text{eau}} = \frac{M_{\text{initiale}} - M_{\text{finale}}}{M_{\text{finale}}} \cdot 100$$

Principe du diagnostic sels³⁵ :

Parmi les innombrables sels naturels et synthétiques, seuls quelques dizaines sont fréquentes dans les bâtiments. Ces sels se trouvent en solution aqueuse et sous forme de cristaux composant des efflorescences et des croûtes. On peut constater que les systèmes salins sont constitués par cinq cations (calcium, magnésium, sodium, potassium et ammonium) et quatre anions (sulfate, chlorure, carbonates et nitrate).

Les tests in situ

Les tests in situ présentent l'avantage de pouvoir être réalisés très rapidement et d'être peu onéreux. Certains sont largement connus et anciens. Le chlorure de sodium, le sel de cuisine, à un goût salé. Le nitrate d'argent met en évidence la présence de chlorure par la formation d'un précipité blanc de chlorure d'argent. L'acide chlorhydrique dilué fait effervescence à froid avec la calcite et permet d'identifier ainsi des concrétions calciques.

La gamme Merkolant, de MERK, reprend le principe du papier pH avec des bandelettes dont la coloration vire en présence d'un ion spécifique lorsqu'elles sont mouillées et appliquées sur un support sec. L'intensité de la coloration est proportionnelle à l'abondance de l'ion, ce qui donne une indication semi quantitative immédiate.

Certains sels sont la particularité d'être alcalins. Il s'agit de carbonates de sodium (natron, thermonatrite et trona) ou de potassium. Un papier pH mouillé appliqué à la surface d'une pierre contenant une faible quantité de l'un de ces sels vire au bleu foncé, indiquant un pH de l'ordre de 9 à 10.

Analyses chimiques

Méthodes de dosages des sels solubles

L'ensemble des laboratoires dosant les sels solubles s'appuient de plus en plus sur le protocole de mise en solution définis dans la norme italienne « normal 13/83, Dosaggio dei Sali solubili ».

³⁵ Verges-Belmin, Bromblet. 2001. « Altération de la pierre par les sels ». Monumental. Pages 226-233.

Analyses minéralogiques

Les analyses minéralogiques sont basées principalement sur la diffraction des rayons X et révèlent les paramètres cristallins des phases cristallines. Comme chaque sel et quasiment tous les matériaux en général, possèdent des paramètres cristallins caractéristiques, il est possible d'identifier précisément les sels présents dans un mélange, même si il est complexe. Cependant l'analyse par diffraction des rayons X a des limites. Elle ne permet pas de déceler les phases mineures d'un mélange, c'est-à-dire celles dont la teneur massique est inférieure à 2 ou 3%. Enfin l'analyse minéralogique est une analyse qualitative ou semi quantitative. Dans le cas d'un diagnostic d'altération et lorsque les teneurs en sels sont très faibles on peut mettre en évidence les cristallisations salines par des observations au microscope électronique. Ces microscopes sont équipés d'un détecteur dit EDS (spectromètre dispersif en énergie) qui détermine la composition chimique élémentaire des phases observées.

Remarque 1 :

Pour remédier aux problèmes des sels lors de travaux de rénovation, des analyses doivent être effectuées pour déterminer leur nature et la profondeur de pénétration dans la maçonnerie. Pour cela des prélèvements doivent être effectués en surface et en profondeur. La profondeur du prélèvement se fera après observation des désordres sur l'édifice. Les sels peuvent rester en surface ou bien ils peuvent entrer en profondeur dans la maçonnerie et occasionner des désordres plus importants. Les prélèvements s'effectuent à l'aide d'une perceuse (diamètre environ 1.5cm). Les prélèvements sont amenés dans un laboratoire afin d'y effectuer des analyses :

- Les prélèvements en surface seront soumis à une analyse par Diffraction des Rayons X en vue de déterminer la nature cristalline des sels,
- Les prélèvements en profondeur seront soumis à une analyse suivant le protocole recommandé par la norme italienne NORMAL 13/83. Une fois les ions en solution, une méthode analytique sera utilisée pour doser la quantité individuelle des ions caractéristiques.

Remarque 2 :

Les prélèvements s'effectuent sur le site après l'étude du monument afin de choisir au mieux les zones de prélèvements. Les méthodes d'échantillonnage doivent être étudiées en fonction des essais que vont subir les prélèvements. Différents types d'instruments peuvent être utilisés : le carottage sous eau, le carottage sans eau, perceuse (pour récupération poudre).

Principe des pipettes de karsten :

La mesure d'absorption d'eau sous basse pression, appelée également mesure de la pipe de verre ou mesure à la pipe de Karsten, est une méthode définie par les prescriptions internationales de la RILEM-25 PEM³⁶. Celle-ci consiste à mesurer en fonction du temps (90s, 5minutes, 10minutes et 15 minutes) les quantités d'eau (en millilitres) susceptibles de pénétrer dans le support via la surface traitée.

La pipette est constituée d'un réservoir calibré, surmonté par un tube gradué à 0,1ml près. Le réservoir est fixé sur la pierre au moyen d'un mastic réversible. Après remplissage complet de la pipette par de l'eau jusqu'au niveau repère (zéro), le test consiste à déterminer la quantité d'eau absorbée par le support en fonction du temps. Cet essai non destructif et particulièrement facile à mettre en œuvre, renseigne lors d'essais in situ avant et après une hydrofugation de surface, sur l'efficacité intrinsèque du traitement.

³⁶ Norme: RILEM TEST METHOD NO. 11.4

Principe du test de mouillabilité :

Le test de la mouillabilité est utilisé afin de mettre en évidence si la pierre, le mortier, un revêtement à un caractère hydrofuge ou non. Une petite goutte (5 µL) d'eau déminéralisée est appliquée sur la surface du matériau à l'aide d'une micropipette. Pour quantifier les observations un chronomètre peut être lancé au moment où la goutte touche d'abord la surface et le temps jusqu'à ce que la goutte soit complètement absorbée par le matériau peut être mesuré. 20 mesures sont faites, puis la valeur moyenne est calculée.

Principe du test éponge³⁷ :

La méthode de l'éponge de contact est une méthode in-situ non destructive utilisée pour estimer le coefficient d'absorption d'eau. La procédure a été enregistrée sous la référence suivante la norme suivante EN 11432-2011. La procédure nécessite d'utiliser une éponge de masse connue, trempée dans de l'eau, pesée, placée sur le matériau pendant 1 minute, puis pesée à nouveau. Le coefficient d'absorption peut être calculée, suivant l'équation suivante, où A représenté la surface de l'éponge et t le temps de la mesure.

$$W_a \left(\frac{g}{m^2 \cdot s} \right) = \frac{\Delta m}{A \cdot t_1} = \frac{m_i - m_f}{A \cdot t_1}$$

Principe du monitoring :

Cas 1 : suivi structural

La mise en place d'une instrumentation peut faire suite à l'observation d'éventuelles fissures sur le monument. L'objectif est de caractériser différents paramètres d'un ou plusieurs désordres sur une période plus ou moins longue, comme l'ouverture ou le cisaillement d'une fissure pendant un an minimum afin de s'affranchir des variations dû à la température. Ceci va permettre d'avoir suffisamment de données pour tracer la progression de ce paramètre en fonction du temps et ainsi déterminer s'il est évolutif, quel est son amplitude de variation, ses valeurs extrêmes etc. et ainsi statuer sur la dangerosité du désordre suivi. L'enjeu de ces instrumentations et de caractériser sur le long terme les déformations du bâtiment, de pouvoir décrire la « vie » de la structure et ainsi comprendre son fonctionnement, la manière dont elle évolue et comment elle réagit aux sollicitations extérieurs (évolution des charges appliquées, conditions climatiques, mises en place de renforts...).

Parmi les appareils les plus courant sont les fissuromètres qui permettront d'étudier l'ouverture et/ou le cisaillement d'une fissure³⁸, l'inclinomètre l'inclinaison d'une paroi par rapport à un plan fixe, l'extensomètre l'espacement ou le rapprochement de deux points, le pendule qui permet de quantifier les variations d'aplomb d'une structure. Également d'autres des technologies de capteurs optiques (ex : fibre optique) existent sur le marché.

Mesure de l'ouverture/fermeture d'une fissure :

Auparavant la mise en place des capteurs des témoins en plâtre étaient mis en place mais aujourd'hui ils ne sont plus du tout utilisés. Actuellement deux types de capteurs sont principalement utilisés dans le cas des suivis ponctuels. Les capteurs proposés sont des « base à billes » et des « jauges saugnac ». Ce sont des

³⁷ Norme : EN 11432-2011.

³⁸ Masson. 2004. Fissuration. Ginger Cated.

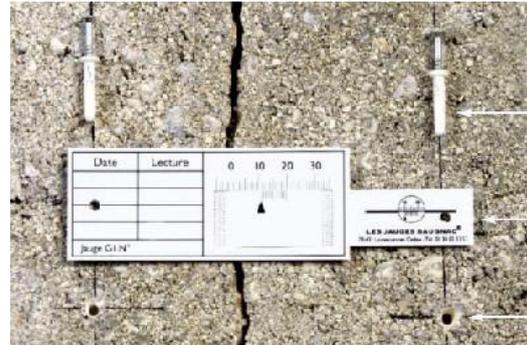
capteurs à lecture directes. Ils permettront le suivi de l'ouverture/ fermeture et éventuellement le cisaillement de fissures.

L'appareillage des bases à billes se compose de deux billes fixées de part et d'autre de la fissure au moyen d'une colle. L'évolution de la fissure est évaluée en mesurant l'écartement entre les deux billes au cours du temps à l'aide d'un matériel appelé déformomètre à bille.

Les appareils non électroniques classiquement utilisés pour mesurer l'écartement d'une fissure sont des jauges Saugnac. Elles sont collées sur une fissure et se présentent sous la forme d'une règle coulissante à mesure que le désordre évolue. Elle présente cependant l'inconvénient majeur de ne pas permettre une lecture fiable de la mesure. Les valeurs lues peuvent dépendre fortement de l'opérateur.



Bases à billes – source cc



Jauge Saugnac – source internet

Il existe des capteurs de types fissuromètres permettant de contrôler l'évolution de l'ouverture d'une fissure en continu. Ce type de capteur permet en outre de mesurer les deux sens (ouverture et fermeture). Ces capteurs sont rattachés à une centrale permettant de suivre les mouvements en continu des déplacements.

Mesure de l'écartement avec un convergence-mètre

Les convergence-mètres permettent de mesurer la distance entre deux points de la structure. Ils sont constitués de fils Invar reliés entre eux par un ressort mesurant l'écartement entre les deux points d'attache. L'Invar est un alliage de fer et de nickel possédant un coefficient de dilatation thermique très faible. Ainsi, les variations thermiques n'influencent pas la mesure de convergence. Notons que les fibres optiques peuvent être utilisées pour mesurer d'éventuelles elongations.

Mesure d'inclinaison avec l'inclino-mètre :

Les inclinomètres permettent de mesurer l'inclinaison d'un mur ou d'une colonne. Ils peuvent être unidirectionnels ou bidirectionnels. Une centrale GSM peut être mise en place afin d'obtenir les résultats des mesures à distance et en temps réel. En parallèle de ces capteurs mesurant les mouvements structurels, des sondes mesurant les influences climatologiques peuvent être reliées à la centrale de mesure. Les capteurs sont des sondes de température et d'humidité relative et des anémomètres.

Cas 2 : Suivi climatique

Mesure de la vitesse du vent

Les anémomètres permettent de mesurer la vitesse du vent en fonction du temps. Il existe différents types de technologies de capteurs. Ils peuvent être installés sur des sites afin de déterminer si le vent peut avoir

une influence sur les mesures structurelles et s'il a une influence sur les mesures de température – humidité relative³⁹.

Mesure de la température, humidité relative

Le monitoring ne permet pas uniquement de suivre les mouvements structuraux mais il peut être utilisé dans le cas d'un suivi climatique en vue d'optimiser par exemple le chauffage d'une église. Également des études ont été menées dans le cas de la vérification de l'absence de la condensation sur des vitraux dans le cadre d'un projet européen VIDRIO⁴⁰.

L'ensemble, de ces capteurs électroniques, est relié à une centrale d'acquisition permettant de relever les valeurs mesurées automatiquement.

³⁹ Masciotta, Roque, Ramos, Lourenço. 2016. A multidisciplinary approach to assess the health state of heritage structures: The case study of the Church of Monastery of Jerónimos in Lisbon. *Construction and Building Materials* 116, 169–187.

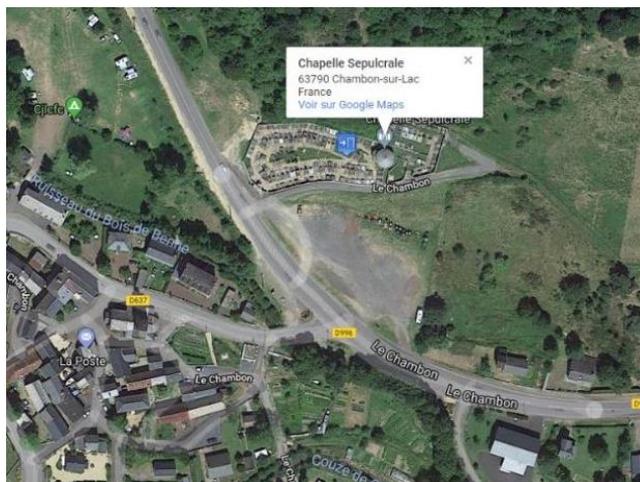
⁴⁰ Bernardi, Becherini, Verità, Ausset, Bellio, Brinkmanne, Cachier, Chabas, Deutschg, Etcheverry, Bianchini, Godoi, Kontozova-Deutsch, Lefèvre, Lombardo, Mottner, Nicola, Pallot-Frossard, Rölleke, Römich, Sommariva, Vallotto, Grieken. 2013. Conservation of stained glass windows with protective glazing: Main results from the European VIDRIO research programme. *Journal of cultural heritage* 14. 527-536.

Annexe 7 : Etat des lieux

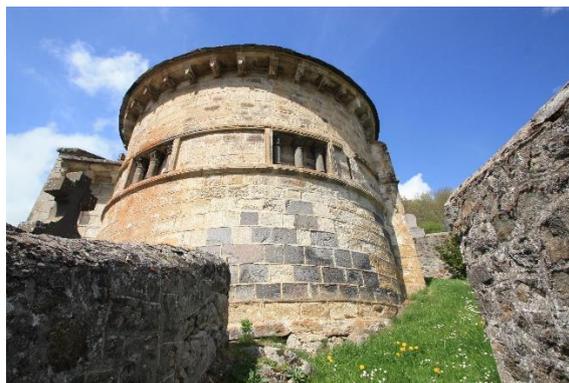
Bâti A :

Identité du bâti :

N°	A
Nom :	Chapelle funéraire
Adresse du bâti :	Cimetière, Chambon sur Lac
Type de propriétaire :	Public
Contact gestionnaire	Monsieur Le Maire
Nom :	Monsieur Roux
Adresse gestionnaire :	Mairie de Chambon sur Lac
Mail :	chambon@sancy.com
Tél :	04.73.88.61.21 / 04.73.88.62.59
Région :	Auvergne Rhône alpes
Département :	Puy-de-Dôme(63)
Architecture :	Architecture funéraire
Epoque construction :	Haut Moyen Age Vie au Xe siècle
Protection :	Classé
N° protection :	PA000911940



Vue générale :



Relevés des désordres :

Couverture										
Matériaux couverture	B1 : 5/1/1	B2 : 5/1/1								
Matériaux couverture	B2 : 40/2/1	B3 : 10/1/2								
Poinçon	B2 : 50/1/0									
Charpente	X									
Ecoulement des eaux pluviales										
Gouttières / chéneaux	B2 : 30/2/1	PM1 : 30/2/1	D7 : 30/1/0							
Enveloppe du bâti										
Façade nord	B2 : 15/1/1	B3 : 10/1/2	AC1 : 10/2/1	PM1 : 15/2/1	PM2 : 20/2/1	PM4 : 10/1/1	PM5 : 5/1/1	D1 : 5/1/1	F1 : 10/1/1	
Façade sud	B1 : 15/3/1	B2 : 5/1/1	B3 : 5/1/2	1C1 : 5/2/1	PM1 : 15/2/1	PM2 : 20/2/1	PM4 : 10/1/1	PM5 : 5/1/1	D1 : 5/1/1	
Façade ouest	B2 : 10/1/1	B3 : 5/1/2	AC : 10/2/1	PM1 : 15/2/1	PM2 : 20/2/1	PM4 : 10/1/1	PM5 : 5/2/1	D1 : 5/1/1	F1 : 20/1/1	
Façade est	B2 : 10/1/1	B3 : 5/1/2	AC : 10/2/1	PM1 : 15/2/1	PM2 : 20/2/1	PM4 : 10/1/1	PM5 : 5/2/1	D1 : 5/1/1		
Portes et fenêtres	B1 : 30/1/1									
Intérieur du bâti :										
Éléments structuraux verticaux	B1 : 20/1/1	B2 : 5/1/1	PM1 : 10/1/1	F3 : 10/1/1	DE : 10/1/1					
Éléments structuraux horizontaux	B1 : 20/1/1	B2 : 5/1/1	PM1 : 10/1/1	PM1 : 40/2/1	PM5 : 10/1/1					
Matériaux de finition internes	B1 : 20/1/1	B2 : 5/1/1	PM1 : 10/1/1							
Escaliers intérieurs et passerelles	B1 : 20/1/1	B2 : 5/1/1	PM1 : 10/1/1							
Portes et fenêtres	B1 : 30/1/1									



B1



B2



PM2



F1

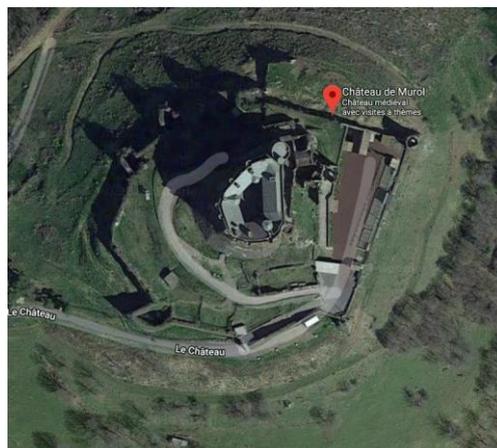
Photogrammétrie - intérieur



Bâti B :

Identité du bâti :

N°	B
Nom :	Ruines du château fort
Adresse du bâti :	Château de Murol, Rue du château, 63790 Murol
Type de propriétaire :	Public
Contact gestionnaire :	Sébastien Gouttebel - Maire de Murol
Adresse gestionnaire :	Mairie de Murol - Place de l'hôtel de ville - 63790 Murol
Mail :	contact@murolchateau.com; mairie.murol@wanadoo.fr
Tél :	04 73 88 60 67
Région :	Auvergne Rhône alpes
Département :	Puy-de-Dôme(63)
Architecture :	Architecture militaire
Epoque construction :	Moyen Age central (Xie - XIIIe siècle)
Protection :	Classé
N° protection :	PA00092213



Vue générale :



Relevés des désordres

Couverture					
Matériaux couverture / eglise béton et toiture	B1 : 10/1/0/0	B2: 10/2/3/2	D6 : 10/1/1/1		
Charpente					
Ecoulement des eaux pluviales					
Gouttières / chéneaux	B1: 30/1/0/1	B3 : 30/1/2/1			
Enveloppe du bâti					
Façade château interieur	B1: 25/1/1/1	B2 : 20/1/2/1	B3 : 5/1/2/1	DE1 : 10/3/2/2	
Enceinte intérieur 1	B1 : 50/1/1/1	B2 : 20/1/2/1	B3 : 15/2//2/2		
Enceinte extérieur	B1 : 10/1/2/1	B2 : 10/2/2/1	B3 : 35/1/2/1	PM3 : 15/3/3/1	PM4 : 15/3/3/1
Façade château interieur "ruines"	B1 : 35/1/1/1	B2 : 35/1/2/1	DE1 : 15/2/2/2		
Intérieur du bâti :					
Éléments structuraux verticaux	B1: 15/2/2/1	B2 : 10/2/2/1	PM4 : 20/2/1/1	DE1 : 20/2/2/2	
Escaliers intérieurs et passerelles	PM1 : 10/1/2/1				
Portes et fenêtres	DE1 : 20/2/2/2				



DE1



B1



PM3



PM3

Bâti C :

Identité du bâti :

N° : C
Nom : Porte d'Occident
Adresse du bâti : 26-28 Rue de l'Horloge
03140 Charroux - France
Type de propriétaire : Public
Contact gestionnaire : Mélodie CHERADAME
Nom :
Adresse gestionnaire : 3 Place de la Cahue, 86250 Charroux
Mail : mairie-charroux@pays-allier.com
Tél : 05 49 87 50 33
Région : Auvergne-Rhône-Alpes
Département : Allier (3)
Architecture : Architecture militaire
Epoque construction : Moyen Age central (Xie - XIIIe siècle)
Protection : Inscrit
N° protection : PA0009347



Vue générale :



Relevé des désordres :

Couverture				
Matériaux couverture	B2 : 10/1/1/0			
Fenêtre de toit	D7 : 20/1/1/1			
Charpente				
Ferme	B4 : 20/2/1/1	AC7 : 20/1/1/1	F1 : 10/2/1/1	
Entre ferme	B4 : 25/2/1/1	B5 : 20/3/1/1	AC7 : 20/1/1/2	
Ecoulement des eaux pluviales				
Enveloppe du bâti				
Façade nord	B2 : 20/2/1/1	B3: 40/2/1/1	PM1 : 10/2/1/0	F1 : 15/3/1/0
Façade sud	B2 : 5/1/1/1	PM1 : 10/2/1/0	F1 : 15/3/1/0	
Façade ouest	PM1 : 10/2/1/0	F1 : 10/3/1/0		
Façade est	F1 : 10/3/1/0			
Intérieur du bâti :				
Éléments structuraux verticaux	D6 : 20/1/1/0	F1 : 20/3/1/0	DE2 : 55/2/2/3	
Éléments structuraux horizontaux	B4 : 35/2/1/1	AC7 : 10/2/1/2		
Matériaux de finition internes	PM3 : 50/2/1/0			
Escaliers intérieurs et passerelles	B4 : 30/2/1/1	AC7 : 20/2/1/2		
Portes et fenêtres	B4 : 20/2/1/1			



B4



B3



F1

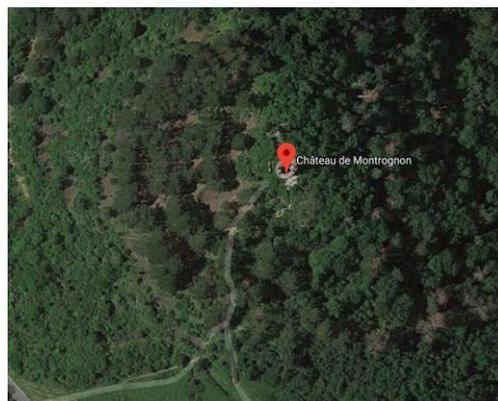


F1

Bâti D :

Identité du bâti :

N° : D
Nom : Château de Montrognon
Adresse du bâti : 54 Avenue de Fontimbert,
63122 Ceyrat
Type de propriétaire : Public
Contact gestionnaire Nom : Gilles BÉRÉTA
SI Patrimoine
Direction de l'Éducation et des Lycées
Adresse gestionnaire : Conseil Régional Auvergne-Rhône-Alpes
Clermont-Ferrand
59, boulevard Léon Jouhaux
CS 90706 – 63050 Clermont-Ferrand
Cedex 2
Mail :
Tél : 04 73 31 62 85
Région : Auvergne-Rhône-Alpes
Département : Puy-de-Dôme (63)
Architecture : Architecture militaire
Epoque construction : Moyen Age central (Xie - XIIIe siècle)
Protection : Pas de protection
N° protection : X



Vue générale :



Relevé des désordres :

Couverture				
Charpente				
Écoulement des eaux pluviales				
Enveloppe du bâti				
Façades	B2 : 20/2/1/1	B3 : 20/2/1/1	AC2 : 5/1/1/1	F1 : 20/2/1/0
Intérieur du bâti :				
Éléments stru	B2 : 20/2/1/1	B3 : 20/2/1/1	F1 : 20/2/1/0	



B1



AC2

Bâti E :

Identité du bâti :

N° : E
 Nom : Ancien prieuré
 Accès par la place de l'Eglise 03600
 Colombiers
 Coordonnées GPS : 46.273934,
 2.794077
 Adresse du bâti :
 Type de propriétaire : Privé
 Contact gestionnaire
 Nom : Agnès Moyer
 Adresse gestionnaire : 0
 Mail : agnes.moyer@club-internet.fr
 Tél : 0

Région : Auvergne-Rhône-Alpes
 Département : allier (3)
 Architecture : domestique
 Moyen Age tardif (XIV - XVe
 siècle)
 Protection : Inscrit
 N° protection : PA00093067



Vue générale :



Relevé des désordres :

Couverture					
Matériaux couverture	B1 : 35/3/1/1	B2 : 30/3/3/1	B4: 5/1/3/1	PM5 : 15/3/3/0	DE4 : 15/3/3/2
Fixation des matériaux	B1 : 50/3/1/1				
Charpente					
Ferme	B4 : 20/3/1/1	B5 : 10/1/2/1	DE4 : 20/3/1/2		
Entre ferme	B4 : 20/3/1/1	B5 : 10/1/2/1	DE4 : 20/3/3/2		
Others	D7 : 100/1/1/2				
Ecoulement des eaux pluviales					
Gouttières / chéneaux	50/2/2/1				
Enveloppe du bâti					
Façades	B2 : 10/2/1/1	B3 : 20/3/2/1	PM1 : 5/2/1/0	PM4 : 5/2/1/0	F1 : 10/3/2/2
Intérieur du bâti :					
Éléments structuraux verticaux	30/3/2/2				



PM5



DE4



DE4



B5



F1



B3

Photogrammétrie

Perspective 30°

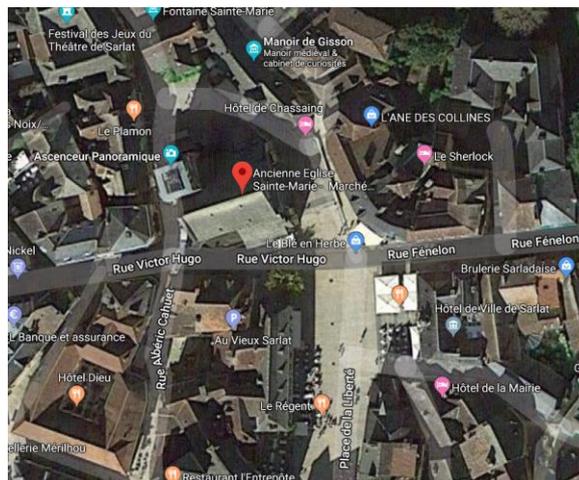


5,738 vertices: 172,820

Bâti F :

Identité du bâti :

N°	F
Nom :	Ancienne église Sainte Marie
Adresse du bâti :	3 Rue Victor Hugo, 24 200 Sarlat La Canédat
Type de propriétaire :	Public
Contact gestionnaire Nom :	Maïté Montazel
Adresse gestionnaire :	Service Patrimoine- Mairie de Sarlat Place de la Liberté, 24200 Sarlat-la-Canéda Hôtel de ville CS 80210 24206 SARLAT Cedex
Mail :	montazel.maite@sarlat.fr
Tél :	Tél : 05 53 29 82 98
Région :	Nouvelle aquitaine
Département :	Dordogne (24)
Architecture :	Architecture religieuse
Epoque construction :	Moyen Age tardif (XIV - XVe siècle)
Protection :	Classé
N° protection :	PA00082930



Vue générale :



Vue générale de la nouvelle façade principale



Vue générale de l'ancienne façade principale de l'église – entrée ascenseur panoramique

Relevé des désordres :

Couverture							
Matériaux couverture	B2 : 75/2/2/1	PM1 : 25/2/1/2					
Charpente							
Ferme	AC7 : 15/1/1/2	D7 : 5/1/1/1					
Ecoulement des eaux pluviales							
Gouttières / chéneaux	B1 : 15/1/3/1	B3 : 30/1/3/1					
Enveloppe du bâti							
Façade nord	B1 : 30/2/1/1	B2 : 30/2/1/1	B3 : 5/1/1/1	AC2 : 50/2/1/0	PM1 : 40/1/1/0	PM5 : 5/1/1/0	
Façade sud	B1 : 30/2/1/1	B2 : 30/2/1/1	B3 : 5/1/1/1	AC2 : 50/2/1/0	PM1 : 40/1/1/0	PM5 : 5/1/1/0	
Façade ouest	B1 : 30/2/1/1	B2 : 30/2/1/1	B3 : 5/1/1/1	AC2 : 50/2/1/0	PM1 : 40/1/1/0	PM5 : 5/1/1/0	F1 : 10/2/1/0
Façade est	B1 : 30/2/1/1	B2 : 30/2/1/1	B3 : 5/1/1/1	AC2 : 50/2/1/0	PM1 : 40/1/1/0	PM5 : 5/1/1/0	F1 : 10/2/1/0
Intérieur du bâti							
Éléments structuraux verticaux	AC4 : 10/1/1/2						
Éléments structuraux horizontaux	AC4 : 15/1/1/2						



AC4



B2 – PM1



B3



PM5

Bâti G :

Identité du bâti :

N°	G
Nom :	Tour de l'horloge
Adresse du bâti :	2-10 Rue de la Coifferie 03500 Saint-Pourçain-sur-Sioule
Type de propriétaire :	Public
Contact gestionnaire	Annie Regond
Nom :	
Adresse gestionnaire :	11 Place du Maréchal-Foch 03500 SAINT POURCAIN SUR SIOULE
Mail :	-
Tél :	-
Région :	Auvergne-Rhône-Alpes
Département :	Allier (3)
Architecture :	Autres
Epoque construction :	Moyen Age tardif (XIV - XVe siècle)
Protection :	Inscrit
N° protection :	PA00093287



Vue générale :



Rue de la coifferie – appelée face externe



Voie communale des bénédictins – appelée face interne

Relevé des désordres :

Couverture				
Matériaux couverture	PM3: 15/3/2/1	PM9: 5/3/2/1		
Charpente				
Ferme	AC7: 20/1/1/3			
Ecoulement des eaux pluviales				
Enveloppe du bâti				
Façade nord	B3: 10/1/1/1	PM5: 20/1/10	D7: 5/1/1/0	F1: 10/2/2/3
Intérieur du bâti :				
Éléments structuraux verticaux	PM4: 35/2/2/2	PM5: 20/2/1/0		



PM9



F1

Bâti H :

Identité du bâti :

N° : H
 Nom : Abbaye Saint-Pierre
 Adresse du bâti : 24 Rue de l'Abbaye
 63200 Mozac - France
 Type de propriétaire : Public
 Contact gestionnaire : Maire
 Nom :
 Adresse gestionnaire : Mairie de Mozac
 Mail : v.gillet@ville-mozac.fr
 Tél : -
 Région : Auvergne-Rhône-Alpes
 Département : Puy-de-Dôme (63)
 Architecture : Architecture religieuse
 Epoque construction : Moyen Age tardif (XIV - XVe siècle)
 Protection : Classé
 N° protection : PA00092209

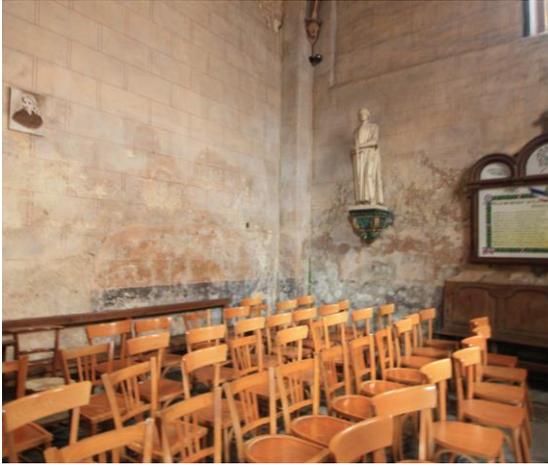


Vue générale :



Relevé des désordres :

Couverture				
Matériaux couverture	PM3: 15/3/2/1	PM9: 5/3/2/1		
Charpente				
Ferme	AC7: 20/1/1/3			
Ecoulement des eaux pluviales				
Enveloppe du bâti				
Façade nord	B3: 10/1/1/1	PM5: 20/1/10	D7: 5/1/1/0	F1: 10/2/2/3
Intérieur du bâti :				
Éléments structuraux verticaux	PM4: 35/2/2/2	PM5: 20/2/1/0		



PM4



B3

Photogrammétrie





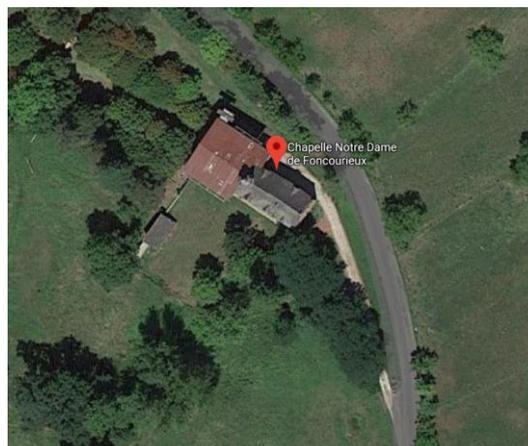
Bâti I :

Identité du bâti :

N° : I
 Nom : Notre Dame de Foncourrieu

Adresse du bâti : 12330 Marcillac-Vallon
 Type de propriétaire : Public
 Contact gestionnaire
 Nom : Jacques Retournard - Association
 Adresse gestionnaire : Mairie de Marcillac Vallon
 Mail : jacques.retournard@gmail.com
 Tél : X

Région : Occitanie
 Département : Aveyron (12)
 Architecture : Architecture religieuse
 Epoque construction : Moyen Age central (XIe - XIIIe siècle)
 Protection : Inscrit
 N° protection : PA00094053



Vue générale :



Relevé des désordres :

Couverture					
Matériaux couverture	B1: 40/2/1/1	B2: 20/2/1/1			
Charpente					
Ferme	DE1: 20/3/1/1				
Entre ferme	DE1: 20/3/1/1				
Ecoulement des eaux pluviales					
Enveloppe du bâti					
Façade nord	B1: 15/1/1/1	B2: 15/1/1/1	AC8: 5/2/1/1	PM1: 45/3/1/3	F1: 20/2/1/2
Intérieur du bâti :					
Éléments structuraux verticaux	PM4: 15/2/1/1	F1: 30/2/1/2			
Matériaux de finition internes	D6: 50/3/1/1				



PM4



Zone non accessibles



PM1 : Altération des pierres en façades car utilisation d'un mortier hydraulique



F1 : Fissure structurale



PM4 : Dégradation du à l'humidité du mur qui ne peut pas s'évacuer en soubassement dans elle migre par remontée capillaire et détériore l'enduit. Cette humidité est peut-être accompagnée de sels.

Bâti J :

Identité du bâti :

N° : J
Nom : Eglise Saint-Blaise
et Notre-Dame-des-Malades
Adresse du bâti : Rue de l'Allier
03200 Vichy - France
Type de propriétaire : Public
Contact gestionnaire : Anke MATTHYS
Nom : Chargé de mission Urbanisme &
Patrimoine
Adresse gestionnaire : Ville de Vichy
Place de l'Hôtel de ville
03201 Vichy Cedex
Mail : a.matthys@ville-vichy.fr
Tél : Tél : 04 70 30 55 65
Fax : 04 70 30 17 91
Région : Auvergne-Rhône-Alpes
Département : Allier (3)
Architecture : Architecture religieuse
Epoque construction : Les temps moderne - Le grand siècle
(XVIIe siècle)
Protection : Inscrit
N° protection : PA00093413



Vue générale :

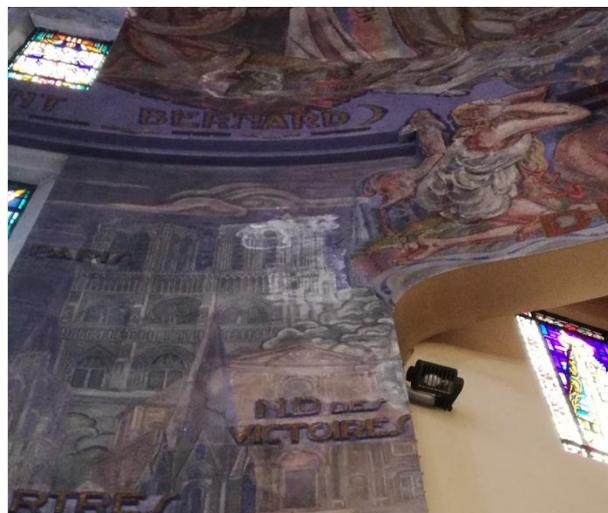


Relevé des désordres :

Couverture				
Matériaux couverture	AC6: 30/2/0/0			
Charpente				
Ecoulement des eaux pluviales				
Gouttières / chéneaux - eglise béton	B3: 15/1/1/1			
DEP - eglise béton	AA1: 25/1/1/1			
Gouttière / eglise pierre	B3: 15/1/1/1			
DEP - eglise béton	AA1: 25/1/1/1			
Enveloppe du bâti				
eglise en béton	B1: 45/3/1/0	B3: 10/1/1/0	F1: 20/2/1/2	DE1: 20/2/1/2
Eglise pierre	B1: 20/2/1/0	B3: 20/2/1/0		
Portes et fenêtres	D6: 10/1/1/1	D7: 10/1/1/1		
Intérieur du bâti :				
Éléments structuraux verticaux	D5: 20/2/1/0			
Éléments structuraux horizontaux	AC4: 20/1/2/2			



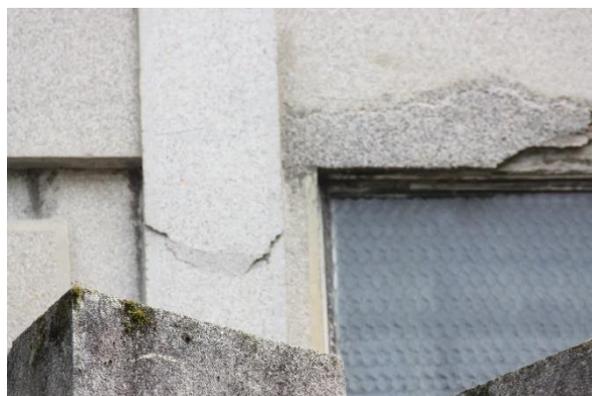
AA1 : Traces sombre sur la coupole dans la coupole et DEP. Vérification de l'état des DEP située autour de la coupole afin de vérifier leur bon état et qu'elle n'engendre pas d'infiltrations à l'intérieur de la coupole



AA1 : Trace infiltrations dans la coupole



F1 / DE1 : Fissure située sur un poteau



DE1 : Chute d'ancienne réparation

Bâti K :

Identité du bâti :

N° : K
 Nom : Chapelle de l'Hôpital
 Adresse du bâti : Rue Sainte Rose,
 63000 Clermont Ferrand
 Type de propriétaire : Public
 Contact gestionnaire : Christophe Debuire
 Nom :
 Adresse gestionnaire : Ville de Clermont Ferrand responsable
 du service MOP ACS
 Direction du Patrimoine Bâti
 Mail : cdebuire@ville-clermont-ferrand.fr
 Tél : tel: 04 73 42 37 88
 mobile : 06 40 95 27 20
 Région : Auvergne-Rhône-Alpes
 Département : Puy-de-Dôme (63)
 Architecture : Architecture religieuse
 Epoque construction : Le XIXe siècle (1800-1900)
 Protection : Inscrit
 N° protection : PA00091997



Vue générale :



Relevé des désordres :

Couverture							
Matériaux couverture	B1: 20/1/1/1	PM4: 20/2/3/3					
Matériaux couverture	AC9: 50/1/1/1						
Fixation des matériaux (ex clous)	PM8: 80/2/1/2						
Faitage	PM1: 30/2/1/0	AC9: 50/1/1/1					
Charpente							
Ecoulement des eaux pluviales							
Gouttières / chéneaux	D7: 20/1/1/1	AA1: 30/2					
DEP	D7: 20/1/1/1	AA1: 30/2					
Enveloppe du bâti							
Façade entrée pr	B1: 20/1/1/1	B3: 5/2/1/1	AC1: 5/1/1/1	AC3: 5/1/1/1	AC7: 15/1/1/1	PM4: 40/3/1/2	
Façade parking	B1: 20/1/1/1	B3: 5/2/1/1	AC1: 5/1/1/1	AC3: 5/1/1/1	AC7: 15/1/1/1	PM4: 40/3/1/2	
Façade droite	B1: 20/1/1/1	B3: 5/2/1/1	AC1: 5/1/1/1	AC3: 5/1/1/1	AC7: 15/1/1/1	PM4: 40/3/1/2	F1: 10/3/3/2
Façade gauche	B1: 20/1/1/1	B3: 5/2/1/1	AC1: 5/1/1/1	AC3: 5/1/1/1	AC7: 15/1/1/1	PM4: 40/3/1/2	F1: 10/3/3/2
Intérieur							
Éléments structuraux verticaux	D4: 20/2/3/2	D6: 30/3/3/2	F1: 20/3/3/2				
Éléments structuraux horizontaux	D4: 20/2/3/2	D6: 30/3/3/2	F1: 20/3/3/2				
Matériaux de finition internes	D6: 60/3/2/2						
Portes et fenêtres	D6: 40/1/1/1						



PM4 : Agrandissement de la zone - joint totalement dissous /lessivé entre les pierres



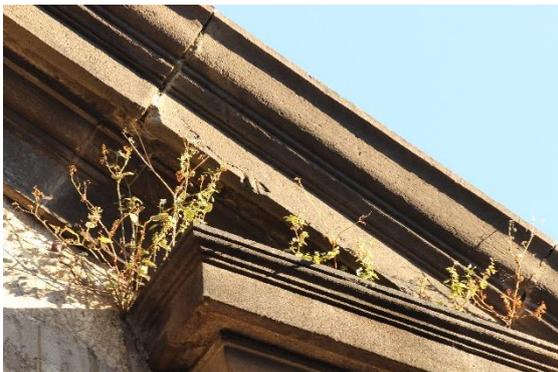
F1 et D6 : fissuration importante et présence d'humidité au niveau de la voute (zone raccord de la toiture en zinguerie)



AC7 : Vue générale d'une façade orientée NO- Assombrissement des pierres en partie basse



PM4 : Absence de joint en élévation du fait de la présence d'infiltrations au niveau de la toiture



B3 : Partie en élévation – développement de plantes sur les partie planes et soumises directement à l'humidité. Cette partie pourrait être protégée par une « feuille de plomb ».

Relevé des désordres :

Couverture				
Matériaux couverture	B1: 20/1/0/1			
Lanternon	D7: 30/1/2/2	AA3: 5/2/2/1		
Autres	AC7: 30/1/1/1			
Charpente				
Ferme	D6: 20/1/1/0			
Ecoulement des eaux pluviales				
Gouttières / chéneaux	AA3: 15/2/1/1			
DEP	D7: 15/1/2/2			
Egouts	AA3: 20/2/1/1			
Enveloppe du bâti				
Façade nord	AC4: 30/1/2/2	AC7: 30/2/2/2	AC8: 5/1/1/2	
Façade sud	D3: 15/1/1/1	D7: 15/1/1/1		
Façade ouest	AC4: 30/1/2/2	AC7: 30/2/2/2	AC8: 5/1/1/2	
Portes	D7: 20/1/2/2	D6: 10/0/2/2		
Intérieur du bâti :				
Éléments structuraux verticaux	AC7: 30/2/2/2			
Éléments structuraux horizontaux	AC4: 75/2/2/2			
Porte et fenêtres	D6: 20/0/2/2	PM5: 40/2/3/2	D7: 30/1/2/2	AA3: 10/1/2/2



Stockage matériaux divers dans l'ensemble du sous sol



PM5 : Mastiquage (plâtre ?) non adhérent



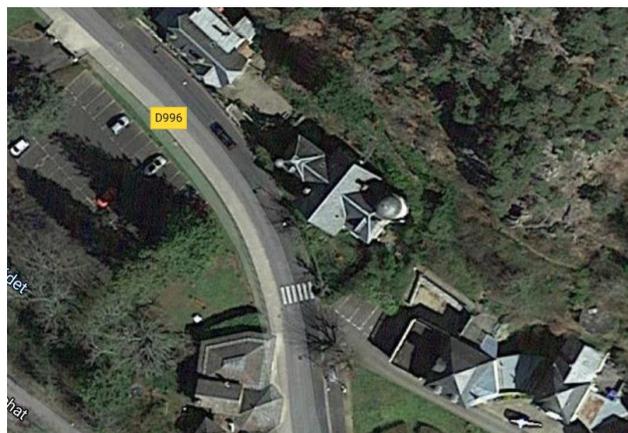
AC4 : Cristallisation de sels sur une pierre de Volvic Creusement de briques entre la jonction avec la pierre de volvic

Bâti M :

Identité du bâti :

N° : M
Nom : Villa Russe
Adresse du bâti : 63710 Saint-Nectaire
Type de propriétaire : Privé
Contact gestionnaire : Christophe Bascoul
Nom :
Adresse gestionnaire : Villa Russe
Mail : christophe.bascoul@sigma-clermont.fr
Tél : X

Région : Auvergne-Rhône-Alpes
Département : Puy-de-Dôme (63)
Architecture : Domestique
Epoque construction : Le XIXe siècle (1800-1900)
Protection : Inscrit
N° protection : PA63000073



Vue générale :



Relevé des désordres :

Toiture				
Matériaux	B1: 30/2/1/0			
Faitage	AA1: 80/3/3/2			
Souche	PM4 : 50/2/2/2			
Fenêtre	B1: 50/2/1/1	D7: 70/1/1/1		
Toiture				
Charpente				
Ferme	B4: 35/2/2/2	B5: 5/1/1/1	F4: 20/2/1/2	DE4: 20/2/2/2
Entre ferme	B4: 70/3/2/2	AC7: 20/1/1/1	F4: 5/1/1/1	
Écoulement des eaux pluviales				
Gouttières	AA1: 50/3/3/2			
DEP	AA1: 70/3/3/2			
Enveloppe du bâti				
Façade rue	PM1: 40/2/1/2	PM3: 10/3/3/2	D6: 35/1/1/2	
Decor peint	D5: 35/1/1/2			
Fenêtre	D6: 50/1/1/1			
Façade	D6: 35/1/1/2	F1: 20/2/1/0		
Intérieur du bâti :				
Éléments structuraux verticaux	F1: 10/1/1/0			
Éléments structuraux horizontaux	PM1: 35/1/1/2			
Matériaux de finition internes	AC7 : 35/1/1/1			
Porte	D6: 30/1/1/1			



B1 / AA1 /D7



AC7



AC7



B5



AA1



PM3 : Perte d'intégrité des pierres d'encadrement de fenêtre → Remplacement pierre

Bâti N :

Identité du bâti :

N° : N
 Nom : Kiosque du parc des Bourins
 Adresse du bâti : 03200 Vichy
 Type de propriétaire : Public
 Anke MATTHYS
 Contact gestionnaire : Chargé de mission Urbanisme & Patrimoine
 Nom : Ville de Vichy
 Adresse gestionnaire : Place de l'Hôtel de ville - 03201 Vichy Cedex
 Mail : a.matthys@ville-vichy.fr
 Tél : 04 70 30 55 65
 Fax : 04 70 30 17 91

Région : Auvergne-Rhône-Alpes
 Département : Allier (3)
 Architecture : Architecture de jardin
 Epoque construction : Le XIXe siècle (1800-1900)
 Protection : Inscrit
 N° protection : PA00093345



Vue générale :



Relevés des désordres :

Couverture			
Charpente			
Écoulement des eaux pluviales			
Enveloppe du bâti			
Façade maçonnerie	B1: 20/1/1/1	B2: 15/1/1/0	PM1: 15/1/1/0
Façade métal	D7: 20/1/1/1	AA3: 30/1/1/1	
Intérieur du bâti :			
Éléments structuraux verticaux	D7: 15/1/1/1		
Éléments structuraux horizontaux	D7: 15/1/1/1		



B1- B2



D7

Annexe 8 : Proposition d'un référentiel des altérations

Familie	Sous-famille	Sous-sous-famille	Source	Gravité			
				0	1	2	3
			[AFNOR. 2012]	Aucun symptôme	Symptômes mineurs	Symptômes passablement forts	Symptômes majeurs
			[AFNOR. 2012]		Ex : Peinture abîmée, présence de mousse sur les tuiles et quelques tuiles cassées	Ex : Dommage localisé causé par une attaque biologique (pourriture humide) dans les panneaux, nécessitant une	Ex : Fuite au niveau de la toiture, entraînant un dommage consécutif et un dommage majeur causé par attaque
Colonisation biologique	Microorganisme	Moissure et champignon	[Frankovic 2015]	Absence de désordre	Degré de recouvrement de la surface - Faible	Colonisation biologique Degré de recouvrement de la surface Moyen	Colonisation biologique Degré de recouvrement de la surface Important
		Bactéries					
		Algue					
		Lichens					
	Mousses et petites plantes	---					
	Plantes	---					
	Infestation rongeur	Attaque insecte					
Infestation de rongeurs							
Infestation d'oiseaux							
Pourriture	---	[ODOT 2009] et [AASHTO 2010]	Absence de pourriture	Moins de 10% de l'épaisseur de l'élément	Pourriture supérieure à 10% de l'épaisseur de l'élément et / ou se trouvant dans des zones de tension	La condition d'état est préoccupante, une étude structurale doit être réalisée	

	Gravité
--	----------------

Famille	Sous-famille	Sous-sous-famille	Source	0	1	2	3
			[AFNOR. 2012]	Aucun symptôme	Symptômes mineurs	Symptômes passablement forts	Symptômes majeurs
			[AFNOR. 2012]		Ex : Peinture abîmée, présence de mousse sur les tuiles et quelques tuiles cassées	Ex : Dommage localisé causé par une attaque biologique (pourriture humide) dans les panneaux, nécessitant une	Ex : Fuite au niveau de la toiture, entraînant un dommage consécutif et un dommage majeur causé par attaque
Altération chromatique et dépôt	Croute	Croute noire	[Frankovic 2015]	Absence de désordre	Masse de pierre détachée Faible	Masse de pierre détachée Moyen	Masse de pierre détachée Élevé
		Croute saline					
	Dépôt	Encrassement	[Frankovic 2015]	Absence de d'encrassement	<20% de la surface	20-50% de la surface	>50% de la surface
		Poussière					
		Suie					
	Altération chromatique	Coloration	[Frankovic 2015]	Absence de désordre	<20% de la surface	20-50% de la surface	>50% de la surface
		Décoloration					
		Assombrissement dû à l'humidité					
		Tâche					
	Efflorescence	Efflorescence	[Frankovic 2015]	Absence de désordre	<20% de la surface	20-50% de la surface	>50% de la surface
	Incrustation	Incrustation	[Frankovic 2015]	Absence de désordre	Masse de pierre détachée Faible	Masse de pierre détachée Moyen	Masse de pierre détachée Élevé
		Concrétion					
Film	---	[Frankovic 2015]	Absence de désordre	<20% de la surface	20-50% de la surface	>50% de la surface	
Tâche	---						
Graffiti	---						
Patine	---						

			Gravité				
Famille	Sous-famille	Sous-sous-famille	Source	0	1	2	3
			[AFNOR. 2012]	Aucun symptôme	Symptômes mineurs	Symptômes passablement forts	Symptômes majeurs
			[AFNOR. 2012]		Ex : Peinture abîmée, présence de mousse sur les tuiles et quelques tuiles cassées	Ex : Dommage localisé causé par une attaque biologique (pourriture humide) dans les panneaux, nécessitant une	Ex : Fuite au niveau de la toiture, entraînant un dommage consécutif et un dommage majeur causé par attaque
Perte de matière	Érosion	---	[Frankovic 2015] [Fitzner 2002]	Absence de désordre	<10mm	10-50 mm	>50 mm
	Alvéolisation	---	[Heinrichs 2008]	<1 cm	1-5cm	5-10 cm	>25 cm
	Dégât mécanique	Impact	[Frankovic 2015] [Fitzner 2002]	Absence de désordre	<10mm	10-50 mm	>50 mm
		Abrasion					
		Décohésion					
		Incision ou éraflure					
		Rayure ou éraflure					
	Buchage						
	Perte de mortier	---	[AASHTO 2010]	Absence de désordre	Présence de petites fissures et/ou de légères chutes de mortier - fissures – vides < 10% du mortier	Importante fissures et vides dans le mortier -fissure – vides > 10% du mortier	La condition d'état est préoccupante, une étude structurale doit être réalisée
	Lacune	---	[Frankovic 2015] [Fitzner 2002]	Absence de désordre	<10mm	10-50 mm	>50 mm
	Pitting	---					
Perforation	---						
Calciné	---						
Perte ou élément cassés	Perte éléments Éléments cassés						

			Gravité				
Famille	Sous-famille	Sous-sous-famille	Source	0	1	2	3
			[AFNOR. 2012]	Aucun symptôme	Symptômes mineurs	Symptômes passablement forts	Symptômes majeurs
			[AFNOR. 2012]		Ex : Peinture abîmée, présence de mousse sur les tuiles et quelques tuiles cassées	Ex : Dommage localisé causé par une attaque biologique (pourriture humide) dans les panneaux, nécessitant une	Ex : Fuite au niveau de la toiture, entraînant un dommage consécutif et un dommage majeur causé par attaque
Détachement	Boursoufflure	---	[Heinrichs 2008]	<1 cm	1-5cm	5-10 cm	>25 cm
	Éclatement	---	[Frankovic 2015]		<10 cm ³	10-125 cm ³	>125 cm ³
	Délitage	Délamination	[Heinrichs 2008]	<1 cm	1-5cm	5-10 cm	>25 cm
		Exfoliation					
	Désintégration	Émiettement	[Frankovic 2015]	Absence de désordre	Désagrégation granulaire Masse de la pierre détachée Faible	Désagrégation granulaire Masse de la pierre détachée Moyen	Désagrégation granulaire Masse de la pierre détachée Elevé
		Désagrégation					
	Fragmentation	Fragment	[Frankovic 2015]	<1 -2 mm	2-5 mm	5-10 mm	>10mm
		Desquamation en plaque					
		Pelage					
Détachement de matériaux de revêtement	---	[Heinrichs 2008]	<1 cm	1-5cm	5-10 cm	>25 cm	
Corrosion	---	[AASHTO 2010] [BIRMM 2015]	Absence de désordre	de	Présence de tâche de rouille. La corrosion de l'acier a débuté.	Présence de perte de section et/ou mais cela ne justifie pas un examen structurel.	La condition nécessite une étude structurale pour déterminer l'effet sur la résistance de l'élément.
Détachement d'unité	---	[Frankovic 2015]		<10 cm ³	10-125 cm ³	>125 cm ³	

			Gravité				
Famille	Sous-famille	Sous-sous-famille	Source	0	1	2	3
			[AFNOR. 2012]	Aucun symptôme	Symptômes mineurs	Symptômes passablement forts	Symptômes majeurs
			[AFNOR. 2012]		Ex : Peinture abîmée, présence de mousse sur les tuiles et quelques tuiles cassées	Ex : Dommage localisé causé par une attaque biologique (pourriture humide) dans les panneaux, nécessitant une	Ex : Fuite au niveau de la toiture, entraînant un dommage consécutif et un dommage majeur causé par attaque
Fissure	Colonnes et murs	Fissure superficielle structurelle	[AASHTO 2010]	Absence de désordre	Présence de fissures, légers mouvements de blocs de pierre - ouverture des fissures 0,5 à 2,0 mm	La maçonnerie présente des fissures qui ont engendré des déformations. Certaines pierres ne sont plus présentes - ouverture des fissures > 2,0 mm	La condition d'état est préoccupante, une étude structurale doit être réalisée
		Fissure profonde structurelle					
		Fissure non structurelle	[AASHTO 2010]	Absence de désordre	Ouverture 0,5 - 2mm	Ouverture > 2mm	La condition d'état est préoccupante, une étude structurale doit être réalisée
	Poutres et sols	Fissure superficielle structurelle	[AASHTO 2010] - maçonnerie	Absence de désordre	Présence de fissures, légers mouvements de blocs de pierre - ouverture des fissures 0,5 à 2,0 mm	La maçonnerie présente des fissures qui ont engendré des déformations. Certaines pierres ne sont plus présentes - ouverture des fissures > 2,0 mm	La condition d'état est préoccupante, une étude structurale doit être réalisée
			[BIRMM 2015] - bois	Absence de désordre	La longueur de la fente est inférieure à l'épaisseur de l'élément	Longueur égale ou supérieure à la profondeur de l'élément, mais ne nécessitant pas de révision structurale.	La condition d'état est préoccupante, une étude structurale doit être réalisée
		Fissure profonde structurelle	[AASHTO 2010]	Absence de désordre	Présence de fissures, légers mouvements de blocs de pierre - ouverture des fissures 0,5 à 2,0 mm	La maçonnerie présente des fissures qui ont engendré des déformations. Certaines pierres ne sont plus présentes - ouverture des fissures > 2,0 mm	La condition d'état est préoccupante, une étude structurale doit être réalisée
			[BIRMM 2015] - bois	Absence de désordre	La longueur de la fente est inférieure à l'épaisseur de l'élément	Longueur égale ou supérieure à la profondeur de l'élément, mais ne nécessitant pas de révision structurale.	La condition d'état est préoccupante, une étude structurale doit être réalisée
			[AASHTO 2010]	Absence de désordre	Ouverture 0,5 - 2mm	Ouverture > 2mm	La condition d'état est préoccupante, une étude structurale doit être réalisée

			Gravité				
			Source	0	1	2	3
Suite fissure	Sous-famille	Sous-sous-famille	[AFNOR. 2012]	Aucun symptôme	Symptômes mineurs	Symptômes passablement forts	Symptômes majeurs
			[AFNOR. 2012]		Ex : Peinture abîmée, présence de mousse sur les tuiles et quelques tuiles cassées	Ex : Dommages localisés causés par une attaque biologique (pourriture humide) dans les panneaux, nécessitant une	Ex : Fuite au niveau de la toiture, entraînant un dommage consécutif et un dommage majeur causé par attaque
	Arches, voutes et dômes	Fissure superficielle structurelle	[AASHTO 2010]	Absence de désordre	Présence de fissures, légers mouvements de blocs de pierre - ouverture des fissures 0,5 à 2,0 mm	La maçonnerie présente des fissures qui ont engendré des déformations. Certaines pierres ne sont plus présentes - ouverture des fissures > 2,0 mm	La condition d'état est préoccupante, une étude structurale doit être réalisée
		Fissure profonde structurelle	[AASHTO 2010]	Absence de désordre	Présence de fissures, légers mouvements de blocs de pierre - ouverture des fissures 0,5 à 2,0 mm	La maçonnerie présente des fissures qui ont engendré des déformations. Certaines pierres ne sont plus présentes - ouverture des fissures > 2,0 mm	La condition d'état est préoccupante, une étude structurale doit être réalisée
		Fissure non structurelle	[AASHTO 2010]	Absence de désordre	Ouverture 0,5 - 2mm	Ouverture > 2mm	La condition d'état est préoccupante, une étude structurale doit être réalisée
	Éléments inclinés, fermes et toiture	Fissure superficielle structurelle	[AASHTO 2010]	Absence de désordre	Présence de fissures, légers mouvements de blocs de pierre - ouverture des fissures 0,5 à 2,0 mm	La maçonnerie présente des fissures qui ont engendré des déformations. Certaines pierres ne sont plus présentes - ouverture des fissures > 2,0 mm	La condition d'état est préoccupante, une étude structurale doit être réalisée
		Fissure profonde structurelle	[AASHTO 2010]	Absence de désordre	Présence de fissures, légers mouvements de blocs de pierre - ouverture des fissures 0,5 à 2,0 mm	La maçonnerie présente des fissures qui ont engendré des déformations. Certaines pierres ne sont plus présentes - ouverture des fissures > 2,0 mm	La condition d'état est préoccupante, une étude structurale doit être réalisée
		Fissure non structurelle	[AASHTO 2010]	Absence de désordre	Ouverture 0,5 - 2mm	Ouverture > 2mm	La condition d'état est préoccupante, une étude structurale doit être réalisée

Annexe 9 : Base de données des actions de maintenance

Réparations liées aux colonisations biologiques

	Microorganisme B1	Mousses et petites plantes B2	Plantes B3	Infestation rongeur B4	Pourriture B5
Couverture					
0	Ne rien faire.	Ne rien faire.	Ne rien faire.	Ne rien faire.	Ne rien faire.
1	Surveillance de l'étendu des matériaux impactés.	Surveillance des matériaux et retirer si possible les mousses et petites plantes.	Retirer si possible les plantes en fonction des accès.	Surveillance des matériaux en bois composant la toiture (exemple : liteaux, planches, chevrons)	Surveillance des matériaux en bois composant la toiture (exemple : liteaux, planches, chevrons). Surveiller les fuites.
2	Brossage et traitement à l'aide d'un produit adapté (ammonium quaternaire).	Retirer les colonisations biologiques et traitement à l'aide d'un produit adapté. Faire attention de ne pas abîmer les matériaux de couverture.	Retirer les colonisations biologiques et traitement à l'aide d'un produit adapté. Réparer et/ou remplacer les matériaux si risque de fuite. Faire attention de ne pas abîmer les matériaux de couverture.	Traitement à l'aide d'un produit adapté si les insectes sont actifs.	Surveillez les fuites. Réparation de la zone impactée.
3	Remplacement des matériaux composant la toiture.	Remplacement des matériaux composant la toiture.	Remplacement des matériaux composant la toiture.	Remplacement du/des élément(s) impactés.	Remplacement du/des élément(s) impactés.
Charpente					
0	Ne rien faire.	Ne rien faire.	Ne rien faire.	Ne rien faire.	Ne rien faire.
1	Surveillance des matériaux	Surveillance des matériaux et retirer si possible les mousses et petites plantes	Retirer si possible les plantes en fonction des accès	Surveillance des matériaux en bois composant la toiture (exemple : liteaux, planches, chevrons).	Surveillance des matériaux en bois composant la toiture (exemple : liteaux, planches, chevrons). Surveiller les fuites.
2	Traitement à l'aide d'un produit adapté (ammonium quaternaire)	Retirer les colonisations biologiques et traitement à l'aide d'un produit adapté. Faire attention de ne pas abîmer les matériaux de couverture.	Retirer les colonisations biologiques et traitement à l'aide d'un produit adapté. Réparer et/ou remplacer les matériaux si risque de fuite. Faire attention de ne pas abîmer les matériaux de couverture.	Traitement à l'aide d'un produit adapté si les insectes sont actifs.	Surveillez les fuites. Réparation de la zone impactée.
3	Remplacement des matériaux.	Remplacement des matériaux.	Remplacement des matériaux.	Remplacement du/des élément(s) impactés	Remplacement du/des élément(s) impactés
Écoulements eaux pluviales					
0	Ne rien faire.	Ne rien faire.	Ne rien faire.	Ne rien faire.	Ne rien faire.
1	Surveillance des matériaux.	Surveillance des matériaux et retirer si possible les mousses et petites plantes	Retirer si possible les plantes en fonction des accès	Surveillance des matériaux en bois pouvant être en contact avec la DEP	Surveillance des matériaux en bois pouvant être en contact avec la DEP
2	Traitement à l'aide d'un produit adapté (ammonium quaternaire) si cela touche un matériau.	Retirer les colonisations biologiques et traitement à l'aide d'un produit adapté. Faire attention de ne pas abîmer les matériaux composant les DEP. Vérification de l'écoulement.	Retirer les colonisations biologiques et traitement à l'aide d'un produit adapté. Faire attention de ne pas abîmer les matériaux composant les DEP. Vérification de l'écoulement.	Traitement à l'aide d'un produit adapté si les insectes sont actifs.	Surveillez les fuites. Réparation de la zone impactée.
3	Remplacement des matériaux.	Remplacement des matériaux.	Remplacement des matériaux.	Remplacement du/des élément(s) impactés.	Remplacement du/des élément(s) impactés.
Enveloppe extérieure					
0	Ne rien faire.	Ne rien faire.	Ne rien faire.	Ne rien faire.	Ne rien faire.

1	Surveillance des matériaux	Surveillance des matériaux et retirer si possible les mousses et petites plantes en faisant attention de ne pas abîmer les matériaux (ex joint de la maçonnerie).	Retirer si possible les plantes en fonction des accès, et vérification qu'il n'y a pas d'infiltration à l'intérieur. Si infiltration refaire un mortier adapté pour boucher la zone où la plante a été retirée.	Surveillance des matériaux en bois (exemple colombage)	Surveillance des matériaux en bois (exemple colombage)
2	Brossage et traitement à l'aide d'un produit adapté (ammonium quaternaire).	Couper et grattage des colonisations biologiques. Vérifier qu'il n'y a pas d'infiltration par l'intérieur et faire attention en brossant de ne pas abîmer l'épiderme de la pierre. Retirer les colonisations biologiques et traitement à l'aide d'un produit adapté. Faire attention de ne pas abîmer les matériaux, si besoin refaire le jointoyage à l'aide d'un mortier. Si les racines sont incrustées dans le mur, les laisser pour ne pas déstabiliser les parois.	Retirer ou couper les colonisations biologiques. Vérifier qu'il n'y a pas d'infiltration par l'intérieur. Si besoin traitement à l'aide d'un produit adapté. Faire attention de ne pas abîmer les matériaux, si besoin refaire le jointoyage à l'aide d'un mortier. Si les racines sont incrustées dans le mur, les laisser pour ne pas déstabiliser les parois.	Traitement à l'aide d'un produit adapté si les insectes sont actifs.	Traitement à l'aide d'un produit adapté si les insectes sont actifs.
3	Remplacement dans l'épaisseur du matériau impacté.	Retirer les colonisations biologiques et traitement à l'aide d'un produit adapté. Faire attention de ne pas abîmer les matériaux, si besoin refaire le jointoyage à l'aide d'un mortier. Si les racines sont incrustées dans le mur, les laisser pour ne pas déstabiliser les parois.	Consolidation des parois car les plantes ont déstructuré la maçonnerie.	Remplacement du/des élément(s) impactés	Traitement des infiltrations, puis remplacement du/des élément(s) impactés
Intérieur					
0	Ne rien faire.	Ne rien faire.	Ne rien faire.	Ne rien faire.	Ne rien faire.
1	Surveillance des matériaux	Surveillance des matériaux et retirer si possible les mousses et petites plantes en faisant attention de ne pas abîmer les matériaux (ex joint de la maçonnerie).	Retirer si possible les plantes en fonction des accès, et vérification qu'il n'y a pas d'infiltration à l'intérieur. Si infiltration refaire un mortier adapté pour boucher la zone où la plante a été retirée.	Surveillance des matériaux en bois (exemple colombage)	Surveillance des matériaux en bois (exemple colombage)
2	Brossage et traitement à l'aide d'un produit adapté (ammonium quaternaire).	Couper et grattage des colonisations biologiques. Vérifier qu'il n'y a pas d'infiltration par l'intérieur et faire attention en brossant de ne pas abîmer l'épiderme de la pierre. Retirer les colonisations biologiques et traitement à l'aide d'un produit adapté. Faire attention de ne pas abîmer les matériaux, si besoin refaire le jointoyage à l'aide d'un mortier. Si les racines sont incrustées dans le mur, les laisser pour ne pas déstabiliser les parois.	Retirer ou couper les colonisations biologiques. Vérifier qu'il n'y a pas d'infiltration par l'intérieur. Si besoin traitement à l'aide d'un produit adapté. Faire attention de ne pas abîmer les matériaux, si besoin refaire le jointoyage à l'aide d'un mortier. Si les racines sont incrustées dans le mur, les laisser pour ne pas déstabiliser les parois.	Traitement à l'aide d'un produit adapté si les insectes sont actifs.	Traitement à l'aide d'un produit adapté si les insectes sont actifs.

3	Remplacement dans l'épaisseur du matériau impacté.	Retirer les colonisations biologiques et traitement à l'aide d'un produit adapté. Faire attention de ne pas abîmer les matériaux, si besoin refaire le jointoyage à l'aide d'un mortier. Si les racines sont incrustées dans le mur, les laisser pour ne pas destabiliser les parois.	Consolidation des parois car les plantes ont déstructuré la maçonnerie.	Remplacement du/des élément(s) impactés	Traitement des infiltrations, puis remplacement du/des élément(s) impactés
---	--	--	---	---	--

Réparations liées aux altérations chromatiques

	Érosion	Alvéolisation	Dégât mécanique	Perte de mortier	Lacune	Pitting	Perforation	Calciné	Élément cassé
	PM1	PM2	PM3	PM4	PM5	PM6	PM7	PM8	PM9
Couverture									
0	Ne rien faire								
1	Surveillance de l'étendue de perte de matière	Surveillance de l'étendue des lacunes et replacer les éléments.	Surveillance de l'étendue de perte de matière						
2	Remplacement ponctuel du ou des matériau(x) impacté(s) composant la toiture. Diagnostic pour déterminer la cause et si-possible y remédier.	Remplacement ponctuel du ou des matériau(x) impacté(s) composant la toiture. Diagnostic pour déterminer la cause et si-possible y remédier.	Remplacement ponctuel du ou des matériau(x) impacté(s) composant la toiture. Diagnostic pour déterminer la cause et si-possible y remédier.	Remplacement ponctuel du ou des matériau(x) impacté(s) composant la toiture. Diagnostic pour déterminer la cause et si-possible y remédier.	Remplacement ponctuel du ou des matériau(x) impacté(s) composant la toiture. Diagnostic pour déterminer la cause et si-possible y remédier.	Remplacement ponctuel du ou des matériau(x) impacté(s) composant la toiture. Diagnostic pour déterminer la cause et si-possible y remédier.	Remplacement ponctuel du ou des matériau(x) impacté(s) composant la toiture. Diagnostic pour déterminer la cause et si-possible y remédier.	Remplacement ponctuel du ou des matériau(x) impacté(s) composant la toiture. Diagnostic pour déterminer la cause et si-possible y remédier.	Remplacement ponctuel du ou des matériau(x) impacté(s) composant la toiture. Diagnostic pour déterminer la cause et si-possible y remédier.
3	Réfection de la toiture de l'ensemble de la toiture ou mise en place d'un échafaudage parapluie pour sécuriser la zone.	Réfection de la toiture de l'ensemble de la toiture ou mise en place d'un échafaudage parapluie pour sécuriser la zone.	Réfection de la toiture de l'ensemble de la toiture ou mise en place d'un échafaudage parapluie pour sécuriser la zone.	Réfection de la toiture de l'ensemble de la toiture ou mise en place d'un échafaudage parapluie pour sécuriser la zone.	Réfection de la toiture de l'ensemble de la toiture ou mise en place d'un échafaudage parapluie pour sécuriser la zone.	Réfection de la toiture de l'ensemble de la toiture ou mise en place d'un échafaudage parapluie pour sécuriser la zone.	Réfection de la toiture de l'ensemble de la toiture ou mise en place d'un échafaudage parapluie pour sécuriser la zone.	Réfection de la toiture de l'ensemble de la toiture ou mise en place d'un échafaudage parapluie pour sécuriser la zone.	Réfection de la toiture de l'ensemble de la toiture ou mise en place d'un échafaudage parapluie pour sécuriser la zone.
Charpente									
0	Ne rien faire								
1	Surveillance de l'étendue de perte de matière	Surveillance de l'altération	Surveillance de l'étendue de perte de matière						
2	Traitement/ réparation/ confortation de l'élément de charpente. Diagnostic pour déterminer la cause.	Traitement/ réparation/ confortation de l'élément de charpente. Diagnostic pour déterminer la cause.	Traitement/ réparation/ confortation de l'élément de charpente. Diagnostic pour déterminer la cause.	Traitement/ réparation/ confortation de l'élément de charpente. Diagnostic pour déterminer la cause.	Traitement/ réparation/ confortation de l'élément de charpente. Diagnostic pour déterminer la cause.	Traitement/ réparation/ confortation de l'élément de charpente. Diagnostic pour déterminer la cause.	Traitement/ réparation/ confortation de l'élément de charpente. Diagnostic pour déterminer la cause.	Traitement/ réparation/ confortation de l'élément de charpente. Diagnostic pour déterminer la cause.	Traitement/ réparation/ confortation de l'élément de charpente. Diagnostic pour déterminer la cause.

3	Remplacement/réparation des matériaux.								

Réparations liées aux détachements

	Boursoufflure	Eclatement	Délitage	Désintégration	Fragmentation	Détachement de matériaux de revêtement	Corrosion	Détachement d'unité
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8
Couverture								
0	Ne rien faire							
1	Surveillance de l'étendu de matériau détaché							
2	Remplacement des matériaux impactés. Diagnostic pour déterminer pourquoi la couverture souffre du désordre. Travaux de mise en sécurité : mise en place d'un parapluie pour rattraper les petits éléments qui se détachent provenant des matériaux de la couverture	Remplacement des matériaux impactés. Diagnostic pour déterminer pourquoi la couverture souffre du désordre. Travaux de mise en sécurité : mise en place d'un parapluie pour rattraper les petits éléments qui se détachent provenant des matériaux de la couverture	Remplacement des matériaux impactés. Diagnostic pour déterminer pourquoi la couverture souffre du désordre. Travaux de mise en sécurité : mise en place d'un parapluie pour rattraper les petits éléments qui se détachent provenant des matériaux de la couverture	Remplacement des matériaux impactés. Diagnostic pour déterminer pourquoi la couverture souffre du désordre. Travaux de mise en sécurité : mise en place d'un parapluie pour rattraper les petits éléments qui se détachent provenant des matériaux de la couverture	Remplacement des matériaux impactés. Diagnostic pour déterminer pourquoi la couverture souffre du désordre. Travaux de mise en sécurité : mise en place d'un parapluie pour rattraper les petits éléments qui se détachent provenant des matériaux de la couverture	Remplacement des matériaux impactés. Diagnostic pour déterminer pourquoi la couverture souffre du désordre. Travaux de mise en sécurité : mise en place d'un parapluie pour rattraper les petits éléments qui se détachent provenant des matériaux de la couverture	Remplacement des matériaux impactés. Diagnostic pour déterminer pourquoi la couverture souffre du désordre. Travaux de mise en sécurité : mise en place d'un parapluie pour rattraper les petits éléments qui se détachent provenant des matériaux de la couverture	Remplacement des matériaux impactés. Diagnostic pour déterminer pourquoi la couverture souffre du désordre. Travaux de mise en sécurité : mise en place d'un parapluie pour rattraper les petits éléments qui se détachent provenant des matériaux de la couverture
3	Remplacer les matériaux composant la toiture.							
Charpente								
0	Ne rien faire							
1	Surveillance de l'étendu de matériau détaché	Surveillance de l'étendu de matériau détaché.	Surveillance de l'étendu de matériau détaché					
2	Traitement/ réparation/ confortation de l'élément de charpente. Diagnostic pour déterminer la cause.	Traitement/ réparation/ confortation de l'élément de charpente. Diagnostic pour déterminer la cause.	Traitement/ réparation/ confortation de l'élément de charpente. Diagnostic pour déterminer la cause.	Traitement/ réparation/ confortation de l'élément de charpente. Diagnostic pour déterminer la cause.	Traitement/ réparation/ confortation de l'élément de charpente. Diagnostic pour déterminer la cause.	Traitement/ réparation/ confortation de l'élément de charpente. Diagnostic pour déterminer la cause.	Traitement/ réparation/ confortation de l'élément de charpente. Diagnostic pour déterminer la cause.	Traitement/ réparation/ confortation de l'élément de charpente. Diagnostic pour déterminer la cause.
3	Remplacement des éléments impactés.							
Écoulements eaux pluviales								

	déterminer la cause et y remédier.							
3	Remplacement/réparation des matériaux.							

Réparations liées aux fissures

	Colonnes et murs	Poutres et sols	Arches, voutes et dômes	Éléments inclinés, fermes et toiture
	F1	F2	F3	F4
Couverture				
0	Ne rien faire	Ne rien faire	Ne rien faire	Ne rien faire
1	Surveillance visuelle de la fissure, essayer de déterminer la cause (en allant dans les combles et/ou visualiser l'état de la toiture).	Surveillance visuelle de la fissure, essayer de déterminer la cause (en allant dans les combles et/ou visualiser l'état de la toiture).	Surveillance visuelle de la fissure, essayer de déterminer la cause (en allant dans les combles et/ou visualiser l'état de la toiture).	Surveillance visuelle de la fissure, essayer de déterminer la cause (en allant dans les combles et/ou visualiser l'état de la toiture).
2	Déterminer si fissure active avec la mise en place de jauge. Si fissure stable, reboucher avec mortier adapté.	Déterminer si fissure active avec la mise en place de jauge. Si fissure stable, reboucher avec mortier adapté.	Déterminer si fissure active avec la mise en place de jauge. Si fissure stable, reboucher avec mortier adapté.	Déterminer si fissure active avec la mise en place de jauge. Si fissure stable, reboucher avec mortier adapté.
3	Traitement de confortation pour stabiliser la fissure.			
Charpente				
0	Ne rien faire	Ne rien faire	Ne rien faire	Ne rien faire
1	Surveillance visuelle de la fissure, essayer de déterminer la cause (en allant dans les combles et/ou visualiser l'état de la toiture).	Surveillance visuelle de la fissure, essayer de déterminer la cause (en allant dans les combles et/ou visualiser l'état de la toiture).	Surveillance visuelle de la fissure, essayer de déterminer la cause (en allant dans les combles et/ou visualiser l'état de la toiture).	Surveillance visuelle de la fissure, essayer de déterminer la cause (en allant dans les combles et/ou visualiser l'état de la toiture).
2	Déterminer si fissure active avec la mise en place d'une instrumentation. Si la fissure est stable, ne rien faire ou réparer la pièce ou changer la pièce.	Déterminer si fissure active avec la mise en place d'une instrumentation. Si la fissure est stable, ne rien faire ou réparer la pièce ou changer la pièce.	Déterminer si fissure active avec la mise en place d'une instrumentation. Si la fissure est stable, ne rien faire ou réparer la pièce ou changer la pièce.	Déterminer si fissure active avec la mise en place d'une instrumentation. Si la fissure est stable, ne rien faire ou réparer la pièce ou changer la pièce.
3	Traitement de confortation pour stabiliser la fissure.			
Écoulements eaux pluviales				
0	Ne rien faire	Ne rien faire	Ne rien faire	Ne rien faire
1	Surveillance visuelle de la fissure, essayer de déterminer la cause.	Surveillance visuelle de la fissure, essayer de déterminer la cause.	Surveillance visuelle de la fissure, essayer de déterminer la cause.	Surveillance visuelle de la fissure, essayer de déterminer la cause.
2	Déterminer si fissure active avec la mise en place de jauge. Si fissure stable, reboucher avec mortier adapté.	Déterminer si fissure active avec la mise en place de jauge. Si fissure stable, reboucher avec mortier adapté.	Déterminer si fissure active avec la mise en place de jauge. Si fissure stable, reboucher avec mortier adapté.	Déterminer si fissure active avec la mise en place de jauge. Si fissure stable, reboucher avec mortier adapté.
3	Traitement de confortation pour stabiliser la fissure.			
Enveloppe extérieure				
0	Ne rien faire	Ne rien faire	Ne rien faire	Ne rien faire
1	Surveillance visuelle de la fissure, essayer de déterminer la cause.	Surveillance visuelle de la fissure, essayer de déterminer la cause.	Surveillance visuelle de la fissure, essayer de déterminer la cause.	Surveillance visuelle de la fissure, essayer de déterminer la cause.
2	Déterminer si fissure active avec la mise en place de jauge. Si fissure stable, reboucher avec mortier adapté.	Déterminer si fissure active avec la mise en place de jauge. Si fissure stable, reboucher avec mortier adapté.	Déterminer si fissure active avec la mise en place de jauge. Si fissure stable, reboucher avec mortier adapté.	Déterminer si fissure active avec la mise en place de jauge. Si fissure stable, reboucher avec mortier adapté.

3	Traitement de confortation pour stabiliser la fissure.			
Intérieur				
0	Ne rien faire	Ne rien faire	Ne rien faire	Ne rien faire
1	Surveillance visuelle de la fissure, essayer de déterminer la cause.	Surveillance visuelle de la fissure, essayer de déterminer la cause.	Surveillance visuelle de la fissure, essayer de déterminer la cause.	Surveillance visuelle de la fissure, essayer de déterminer la cause.
2	Déterminer si fissure active avec la mise en place de jauge. Si fissure stable, reboucher avec mortier adapté.	Déterminer si fissure active avec la mise en place de jauge. Si fissure stable, reboucher avec mortier adapté.	Déterminer si fissure active avec la mise en place de jauge. Si fissure stable, reboucher avec mortier adapté.	Déterminer si fissure active avec la mise en place de jauge. Si fissure stable, reboucher avec mortier adapté.
3	Traitement de confortation pour stabiliser la fissure.			

Réparations liées aux déformations

	Colonnes et murs DE1	Poutres et sols DE2	Arches, voutes et dômes DE3	Éléments inclinés, fermes et toiture DE4
Couverture				
0	Ne rien faire	Ne rien faire	Ne rien faire	Ne rien faire
1	Surveillance visuelle de l'étendue de la déformation, essayer de déterminer la cause (en allant dans les combles et/ou visualiser l'état de la toiture).	Surveillance visuelle de l'étendue de la déformation, essayer de déterminer la cause (en allant dans les combles et/ou visualiser l'état de la toiture).	Surveillance visuelle de l'étendue de la déformation, essayer de déterminer la cause (en allant dans les combles et/ou visualiser l'état de la toiture).	Surveillance visuelle de l'étendue de la déformation, essayer de déterminer la cause (en allant dans les combles et/ou visualiser l'état de la toiture).
2	Diagnostic et traitement de la cause.			
3	Remplacement des matériaux et/ou mise en place d'une solution de confortement.	Remplacement des matériaux et/ou mise en place d'une solution de confortement.	Remplacement des matériaux et/ou mise en place d'une solution de confortement.	Remplacement des matériaux et/ou mise en place d'une solution de confortement.
Charpente				
0	Ne rien faire	Ne rien faire	Ne rien faire	Ne rien faire
1	Surveillance visuelle de l'étendue de la déformation, essayer de déterminer la cause (en allant dans les combles et/ou visualiser l'état de la toiture).	Surveillance visuelle de l'étendue de la déformation, essayer de déterminer la cause (en allant dans les combles et/ou visualiser l'état de la toiture).	Surveillance visuelle de l'étendue de la déformation, essayer de déterminer la cause (en allant dans les combles et/ou visualiser l'état de la toiture).	Surveillance visuelle de l'étendue de la déformation, essayer de déterminer la cause (en allant dans les combles et/ou visualiser l'état de la toiture).
2	Diagnostic et traitement de la cause.			
3	Remplacement des matériaux et/ou mise en place d'une solution de confortement.	Remplacement des matériaux et/ou mise en place d'une solution de confortement.	Remplacement des matériaux et/ou mise en place d'une solution de confortement.	Remplacement des matériaux et/ou mise en place d'une solution de confortement.
Écoulements eaux pluviales				
0	Ne rien faire	Ne rien faire	Ne rien faire	Ne rien faire
1	Surveillance visuelle de l'étendue de la déformation, essayer de déterminer la cause visuellement (en allant également à l'intérieur du bâti).	Surveillance visuelle de l'étendue de la déformation, essayer de déterminer la cause visuellement (en allant également à l'intérieur du bâti).	Surveillance visuelle de l'étendue de la déformation, essayer de déterminer la cause visuellement (en allant également à l'intérieur du bâti).	Surveillance visuelle de l'étendue de la déformation, essayer de déterminer la cause visuellement (en allant également à l'intérieur du bâti).
2	Détermination de la cause par un diagnostic si besoin, traiter la cause pour arrêter l'évolution de la déformation, puis réparation/ consolidation ponctuelle.	Détermination de la cause par un diagnostic si besoin, traiter la cause pour arrêter l'évolution de la déformation, puis réparation/ consolidation ponctuelle.	Détermination de la cause par un diagnostic si besoin, traiter la cause pour arrêter l'évolution de la déformation, puis réparation/ consolidation ponctuelle.	Détermination de la cause par un diagnostic si besoin, traiter la cause pour arrêter l'évolution de la déformation, puis réparation/ consolidation ponctuelle.
3	Détermination de la cause par un diagnostic si besoin, traiter la cause pour arrêter l'évolution de la déformation, puis réparation/ consolidation de l'ensemble de la zone.	Détermination de la cause par un diagnostic si besoin, traiter la cause pour arrêter l'évolution de la déformation, puis réparation/ consolidation de l'ensemble de la zone.	Détermination de la cause par un diagnostic si besoin, traiter la cause pour arrêter l'évolution de la déformation, puis réparation/ consolidation de l'ensemble de la zone.	Détermination de la cause par un diagnostic si besoin, traiter la cause pour arrêter l'évolution de la déformation, puis réparation/ consolidation de l'ensemble de la zone.
Enveloppe extérieure				
0	Ne rien faire	Ne rien faire	Ne rien faire	Ne rien faire

Annexe 10 : Exemple d'un rapport HeritageCare

Chapelle de l'ancien Hôpital Général

Rue Sainte Rose, 63000 Clermont Ferrand



Inspection: 001/2017-10-10 and 2017-10-11

Nombre de pages : 27

Mots clés : inspection visuelle, conservation préventive, management

Sommaire

Informations administratives.....	4
Informations sur le bâti:.....	5
Synthèse sur l'édifice.....	5
Plan de l'édifice	6
Evaluation de l'état	8
Enveloppe de l'édifice	8
Intérieur de l'édifice	9
Accessibilité, hygiène et site.....	9
Conservation préventive & Prevision.....	10
[2] Echelle de classement de l'état et des risques	11
Localisation des altérations.....	12
Revêtement des toitures.....	12
Couverture en dalles de pierres de lave.....	12
Révision de l'étanchéité du couronnement de la coupole et réfection des joints du tambour	14
Structure de la toiture - Charpente	15
Evacuation des eaux pluviales.....	16
Enveloppe de l'édifice	17
Fissures structurelles.....	17
Altération des pierres (remontées capillaires)	18
Altération sur pierre (causes diverses).....	19
Décohéssion des joints	20
Matériaux non compatibles - ciment	21
Colonisation biologique (lichen, plantes).....	22
Enduit non adhérent.....	23
Verrière – armature métallique, verres, protection.....	24
Verrière – armature métallique, verres, protection.....	25
Intérieur du bâti.....	26

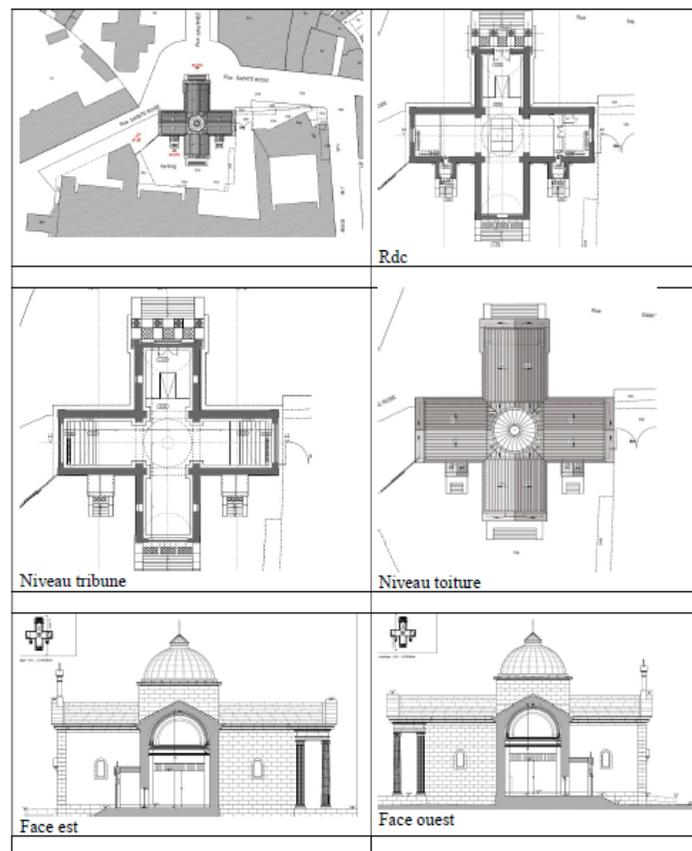
Informations sur le bâti :

Synthèse sur l'édifice

<i>Synthèse sur l'édifice</i>	<p>Géométrie :</p> <p>Nbre d'étages : 1</p> <p>Nbre de façades : 12 (présence de 4 ailes de dimensions similaires)</p> <p>Nombre de salles : 2 (principale salle d'exposition et local technique)</p> <p>Surface totale plancher inconnu</p> <p>Hauteur : environ 20m</p>	<p>Fondé en 1657, l'hôpital occupait l'emplacement d'un hôpital existant auparavant. L'hôpital se présentait comme un ensemble de bâtiments aux dimensions et âges variés, entourant une vaste cour plantée d'arbres. La chapelle a été construite entre 1850 et 1855, elle témoigne de l'architecture néo-classique en Auvergne à cette époque.</p> <p>Cette chapelle a été édifée sur un plan en croix grecque dont les quatre ailes sont orientées aux quatre points cardinaux. Chacune des quatre parties a reçu une entrée indépendante. La façade principale présente un péristyle ionique. A la jonction des quatre bras de la croix s'élève une coupole sur tambour carré. A l'intérieur, le sommet des murs s'orne d'une mouluration néo-classique avec architrave à trois fascées, frise nue, frise de denticules précédant une corniche en saillie formant la base des voûtes.</p> <p>Les arcs triomphaux précédant la coupole sont ornés de caissons alternativement rectangulaires et carrés. Les quatre pendentifs portent des traces de peinture murale représentant les quatre Evangélistes.</p>
-------------------------------	---	--

<i>Synthèse sur les objets</i>	<p>Assets:</p> <p>Nbre. Retables : -</p> <p>Nbre. Peintures : -</p> <p>Nbre. Sculptures : -</p> <p>Nbre. Mobilier : -</p> <p>Nbre. Argenterie : -</p> <p>Nbre. Bijoux : -</p> <p>Nbre. Autres : -</p> <p>Total : -</p>	<p>Principaux objets :</p> <p>Peintures murales sur enduits</p> <p>Décors sur enduits</p> <p>Objets exceptionnels :</p> <p>Pas d'objets</p>
--------------------------------	--	---

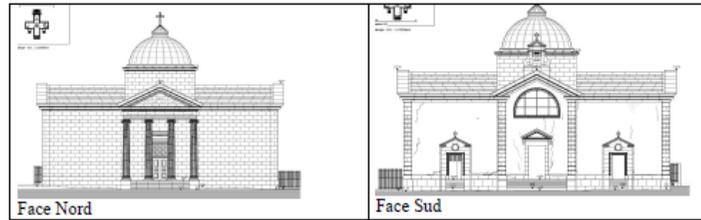
Plan de l'édifice



1 ACA Architectes

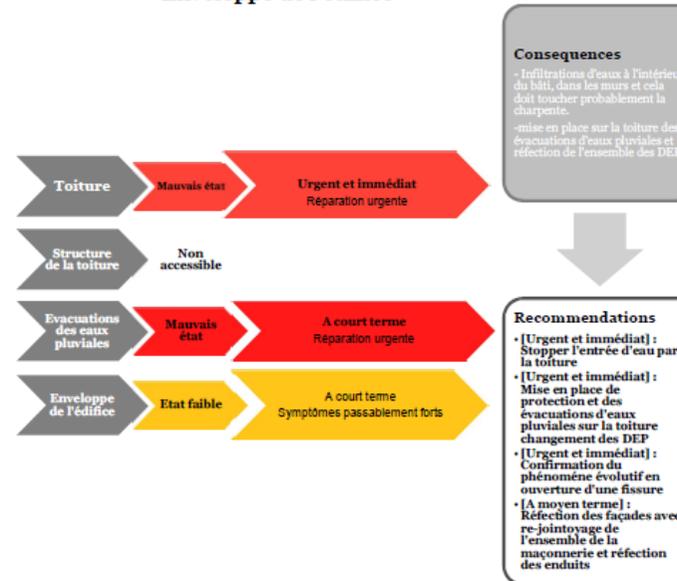
[A] Université Clermont Auvergne
 Polytech Clermont Ferrand
 Campus Universitaire des Cézeaux
 2, avenue Blaise Pascal
 63 170 Aubière

[M] HeritageCare.france@gmail.com
 [W] www.heritagecare.eu



Evaluation de l'état

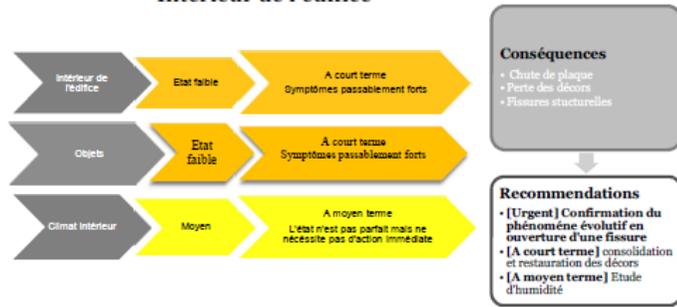
Enveloppe de l'édifice



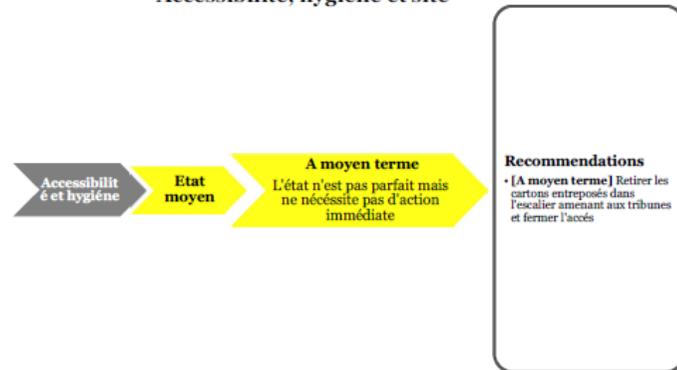
[7]

[8]

Intérieur de l'édifice



Accessibilité, hygiène et site



[9]

[10]

Conservation préventive & Prevision



Performance passée de l'édifice

Evolution de l'état de l'édifice sans conservation préventive

"Mieux vaut prévenir que guérir!"

Echelle de classement de l'état et des risques

Classement selon l'état des éléments	Symptômes	Classement des risques en fonction de l'urgence	Commentaire
Bonne	Aucun symptôme	A long terme	Aucune action immédiate / Une surveillance préventive est nécessaire
Moyen	Symptômes mineurs	A moyen terme	L'état n'est pas parfait mais ne nécessite pas d'action immédiate / Un monitoring est nécessaire pour anticiper les futures altérations
Faible	Symptômes passablement forts	A court terme	L'état nécessite des réparations / Un diagnostic supplémentaire doit être effectué
Mauvaise	Symptômes majeurs	Urgent et immédiat	Réparation urgente / Diagnostic supplémentaire
Non accessible	Partie non accessible	Non inspecté	Zone non inspectée (problème de sécurité et/ou non visible – non accès)

Localisation des altérations

Revêtement des toitures

Couverture en dalles de pierres de lave

Altération des joints d'étanchéité entre les dalles de pierre

Condition d'état : Mauvais

Localisation : Ensemble de la toiture c'est-à-dire les toitures à deux pentes des quatre ailes.

Travaux réalisés : ---

Conséquences : Infiltration d'eau de pluie à l'intérieur du bâti, dissolution des joints entre les pierres sur les pignons, probable dégradation des éléments de la charpente et chute de morceaux d'enduits situés à l'intérieur.

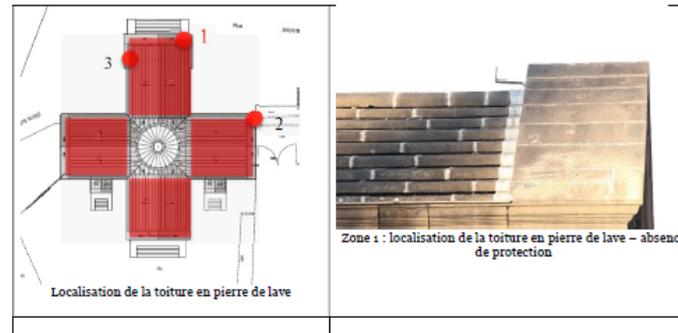
Recommandations : Réfection à l'identique c'est-à-dire des joints souples entre les pierres de lave. Mais nous pouvons noter que cette solution est inappropriée pour ce type de bâti. Il faudrait réfléchir à couvrir entièrement la toiture.

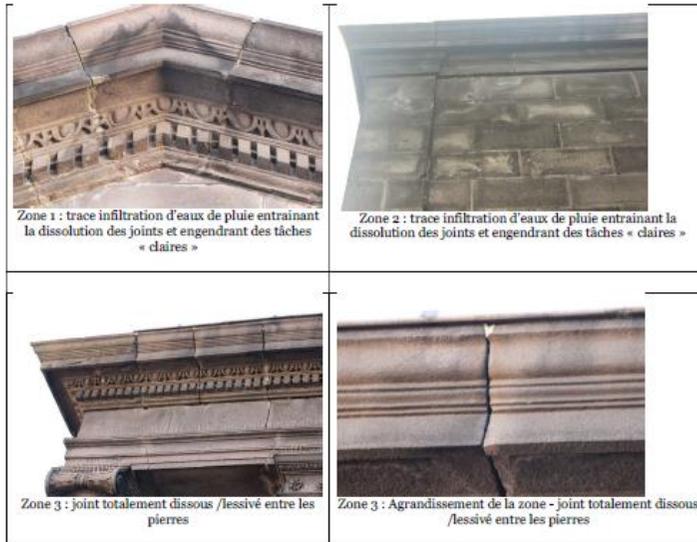
Priorité : Urgent et immédiat

Doit être exécuté par : Entreprise spécialisée

[12]

- Fréquence :**
- Cas 1 : Si la décision est prise de refaire à l'identique la restauration des joints entre les pierres, la fréquence des révisions doit être importante car un joint de type silicone s'abîme rapidement du fait des conditions météorologiques.
 - Cas 2 : Si la toiture est couverte intégralement avec un matériau tel que du plomb la fréquence de vérification peut être amenée à 10 ans.





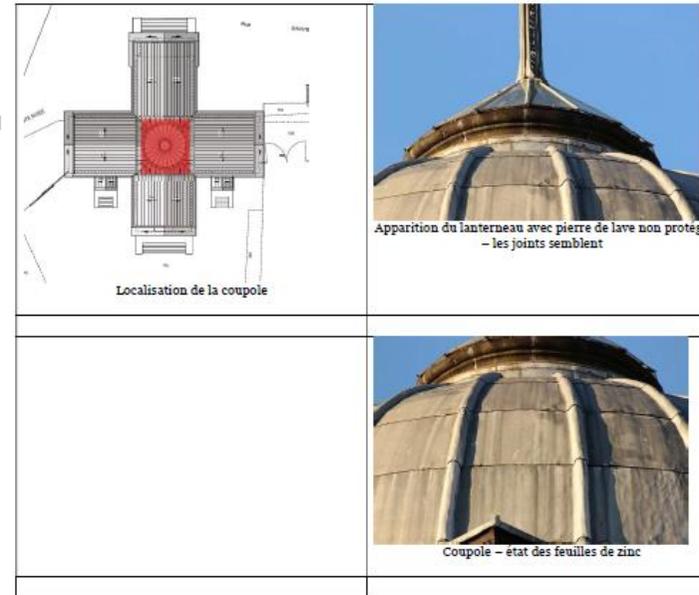
[13]

Révision de l'étanchéité du couronnement de la coupole et réfection des joints du tambour

Coupoles

- Condition d'état : **Faible**
- Localisation : **Coupoles**
- Travaux réalisés : ---
- Conséquences : **Trace de légère oxydation sur la toiture**
Présence de chutes de plaques d'enduit à l'intérieur de l'édifice au niveau des arcs
- Recommandations : **L'étanchéité du couronnement de la coupole et le raccord avec la verrière du lanterneau est à vérifier. De même que les joints entre les pierres.**
- Priorité : **A court terme**
- Doit être exécuté par : **Technicien qualifié**
- Fréquence : **Ponctuel**

[14]



Structure de la toiture - Charpente

Zone d'humidité

Éléments structuraux - Charpente

Condition d'état : Non accessible par l'intérieur

Localisation : Comble

Travaux réalisés : ---

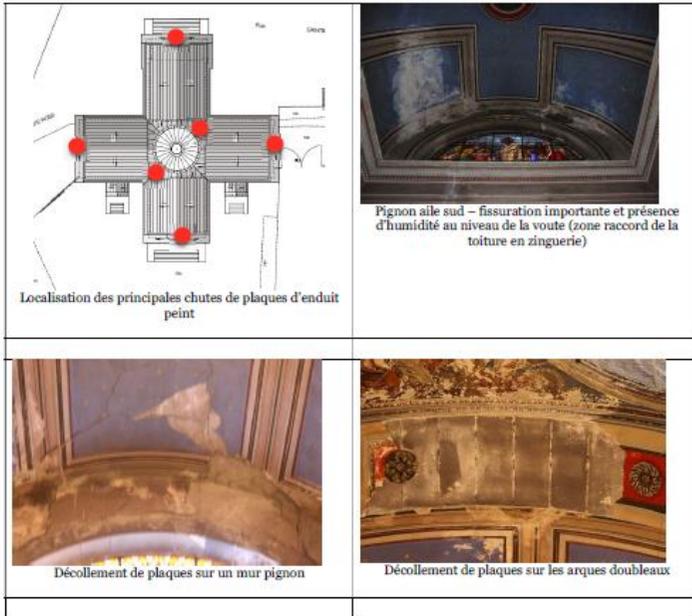
Conséquences : Présence d'infiltrations observées à l'intérieur du bâti il se peut que les éléments de la charpente soient affectés.

Recommandations : Vérification de l'état de la charpente lors des travaux sur la toiture.

Priorité : A court terme

Doit être exécuté par : S'il n'y a pas d'accès ou accéder aux combles par l'intérieur. Une entreprise de charpentier doit vérifier l'état de la charpente, le couvreur devra permettre l'accès aux combles par la dépose d'éléments de toiture.

Fréquence : Ponctuel



Evacuation des eaux pluviales

Matériaux vieillissants

Gouttière / DEP / zinguerie

Condition d'état : Faible

Localisation : Ensemble des toitures (ailes et coupoles)

Travaux réalisés : ---

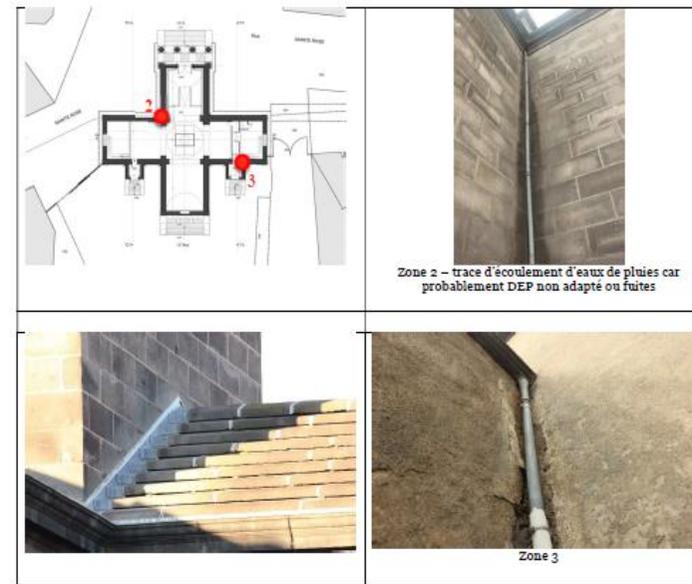
Conséquences : Fuite

Recommandations : Remplacement des éléments

Priorité : A court terme

Doit être exécuté par : Ces travaux pourraient être effectués simultanément aux travaux de toiture.

Fréquence : Ponctuel

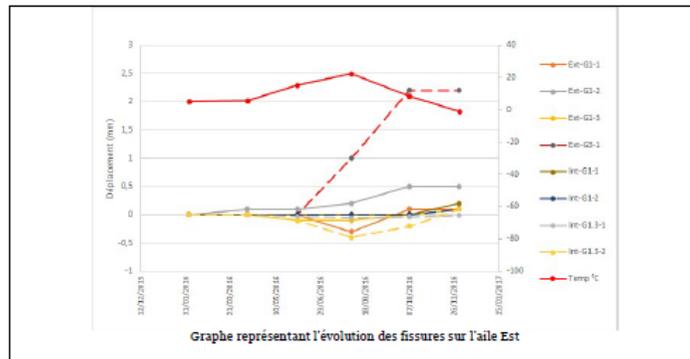


Enveloppe de l'édifice

Fissures structurelles

Pignons sur aile Est

- Condition d'état :** Faible
- Localisation :** Pignon aile Est
- Travaux réalisés :** ---
- Conséquences :** Présence d'une fissure qui semble légèrement évolutive en ouverture (Cf. Annexe A)
- Recommandations :** D'après l'étude réalisée en 2016, l'ensemble des fissures instrumentées ont de légères évolutions en ouvertures de l'ordre de 0,1 à 0,2 mm. On note qu'une conclusion est difficile pour l'interprétation il manque une dernière mesure afin de vérifier que les graphes reviennent à leur état initial. Pour interpréter les données, des graphes déformations/ températures ont été tracés et sont situés en annexe. Les températures ont été retrouvées par le site de Météo France. **Une fissure a été instrumentée sur l'aile Est, elle semble la plus problématique car elle a un comportement évolutif en ouverture (0,5 mm en ouverture et 2 mm en désaffleurement). Il serait souhaitable que le phénomène soit confirmé par la reprise des mesures.** Pour les parties les plus déstructurées, un coulage de chaux à l'intérieur des murs pourrait être effectué. Mais ces préconisations doivent être révisées par le MOE.
- Priorité :** A court terme
- Doit être exécuté par :** Bureau d'études spécialisées dans la maçonnerie – bâti ancien
- Fréquence :** Ponctuel

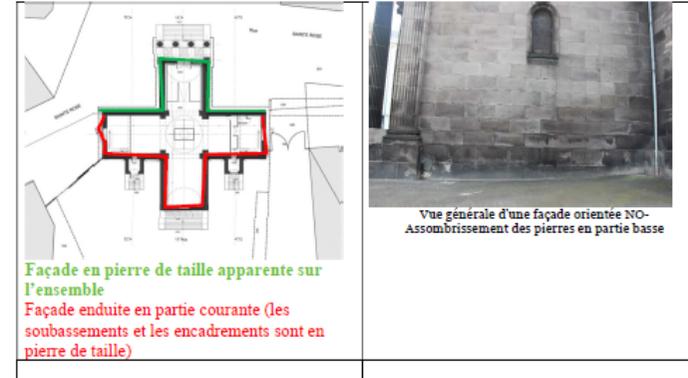


Altération des pierres (remontées capillaires)

Pierre en partie basse de la façade

- Condition d'état :** Moyen
- Localisation :** Ensemble des façades avec pierre apparente
- Travaux réalisés :** ---
- Conséquences :** Assombrissement des pierres en parties basses des façades, altération de l'épiderme de la pierre. Des remontées capillaires sont également observables à l'intérieur de l'édifice (pilier et sur le sol visible)
- Recommandations :** Dans un premier temps nous pouvons conseiller de réparer l'ensemble des DEP cela évitera que l'eau ruisselle sur la maçonnerie. Dans un second temps si ces franges de capillarités sont toujours présentes il peut être effectué un diagnostic humidité sur l'épaisseur de mur afin de déterminer si cette humidité (donc venant du sol) peut être problématique ou non. Si elle est problématique, en fonction des résultats donnés un traitement pourra être conseillé.
- Priorité :** A moyen terme
- Doit être exécuté par :** Réparation de DEP = Entreprise de maçonneries
Etude d'humidité = laboratoire spécialisé dans le bâti ancien
- Fréquence :** Travaux ponctuels

[18]



Altération sur pierre (causes diverses)

Pierre massive

Condition d'état : **Moyen**

Localisation : Ensemble de l'édifice

Travaux réalisés : ---

Conséquences : **Chute fragment de pierre**

Recommandations : ---

Priorité : **En fonction de l'épaisseur et de la surface impactée, la pierre devra être soit remplacée, soit découpée pour y insérer un « bouchon », soit ragréer à l'aide d'un mortier ayant les mêmes tonalités que la pierre**

Doit être exécuté par : Entreprise spécialisée

Fréquence : Ponctuel



[19]

Décohésion des joints

Ensemble des façades en pierre massive, soubassement des façades enduites, encadrement des fenêtre/portes

Condition d'état : **Faible**

Localisation : Ensemble des joints situés entre les pierres massives. Les désordres sont localisés : en partie basse de l'édifice car il y a la présence de remontées capillaires, et en partie haute du fait des infiltrations entre les joints « silicones ». On peut remarquer que l'ancien joint situé dans les parties courantes est composé d'un fond de joint et d'un joint de décoration. Le fond de joint a tendance à se différencier de la pierre.

Travaux réalisés : ---

Conséquences : **Désolidarisation de la maçonnerie, entrée d'eau dans les murs donc à l'intérieur de l'édifice.**

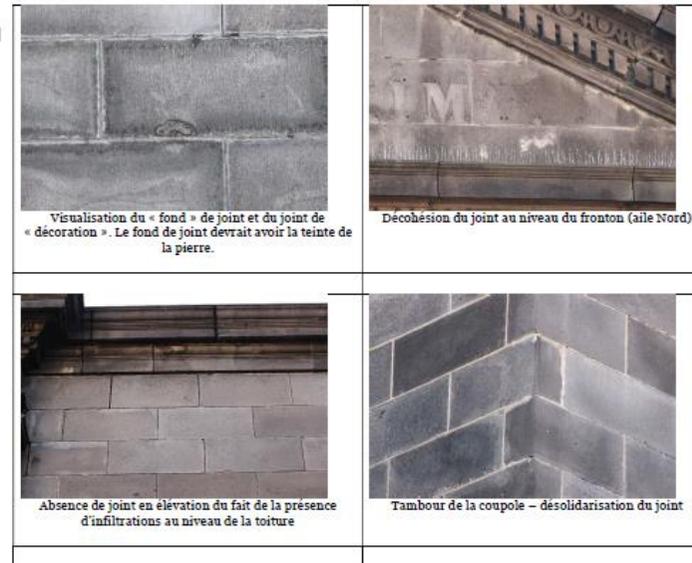
Recommandations : **Grattage de l'ensemble des joints jusqu'à une certaine profondeur, nettoyage puis re-jointoyage avec mortier adapté (Annexe B)**

Priorité : **A court terme**

Doit être exécuté par : Entreprise spécialisée

Fréquence : Ponctuelle

[20]



Matériaux non compatibles - ciment
 Pierre en partie basse de la façade

Condition d'état : **Moyen**
Localisation : Pignon aile Est et péristyle nord. Il se peut que la présence de ciment soit également dans d'autres zones.
Travaux réalisés : ---
Conséquences : **Le ciment est un matériau non compatible avec la pierre**
Recommandations : Retrait du ciment. Mettre un mortier compatible à base de chaux.
Priorité : **A moyen terme**
Doit être exécuté par : Entreprise spécialisée
Fréquence : ponctuel



[21]

Colonisation biologique (lichen, plantes)
 Pierres massives

Condition d'état : **Moyen**
Localisation : Parties planes du monument en élévation et en toiture
Travaux réalisés : ---
Conséquences : **Humidité, désolidarisation des pierres, perte d'information.**
 Les plantes et les lichens doivent être retirés mécaniquement mais sans amener des désordres sur les pierres. Un produit « biocide » peut être utilisé il devra être composé à base d'ammonium quaternaire et il devra être conforme à la nouvelle réglementation REACH
Recommandations : ---
Priorité : **A moyen terme**
Doit être exécuté par : Entreprise spécialisée
Fréquence : Régulièrement (en fonction de la fiche technique du produit)



[22]

Enduit non adhérent

Ensemble des façades enduites

Condition d'état : **Moyen**
Les façades enduites concernent les faces situées « à l'arrière » de l'entrée principale. Le support est composé de moellons de diverses typologies de pierres.

Localisation : ---

Travaux réalisés : ---

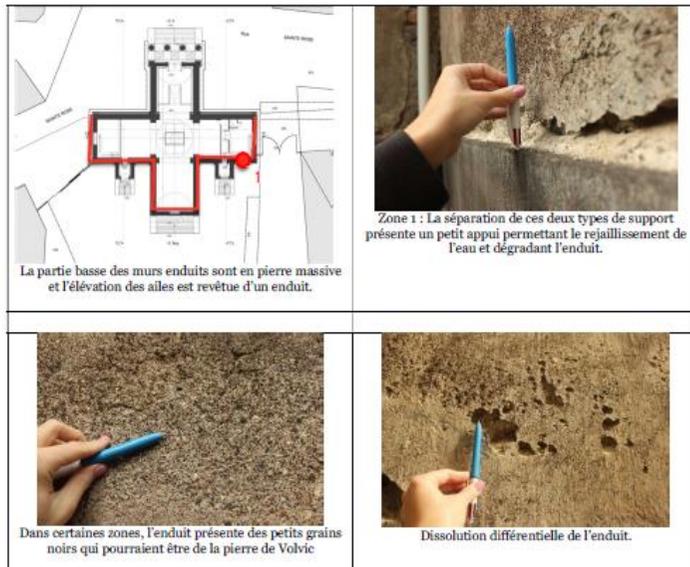
Conséquences : **Chute de morceaux d'enduits, maçonnerie mise à nu, possibilité que l'eau rentre dans les maçonneries**
Nous conseillons la dépose de l'ensemble du revêtement par grattage. Nous proposons la réfection avec un enduit à deux couches à base de chaux. La première couche est la couche d'accroche au support puis la seconde couche est le corps d'enduit constituant la masse de l'enduit qui assure la protection l'étanchéité.

Recommandations : ---

Priorité : **A moyen terme**

Doit être exécuté par : Entreprise spécialisée

Fréquence : Ponctuelle



Verrière – armature métallique, verres, protection

Conservation préventive - protections

Condition d'état : **Moyen**
Ensemble des protections situées sur les vitraux de la chapelle (grillage / verrière extérieure)

Localisation : ---

Travaux réalisés : ---

Conséquences : **Perte d'informations, inesthétique**
Nous recommandons le retrait de l'ensemble des protections pour une homogénéisation de l'ensemble (grillages et double verrière). Les anciens cadre (de grillage) doivent être démontés et les pattes de scellement descellées sans endommager la maçonnerie. Si la décision est prise de les réutiliser le nettoyage consiste à retirer toute trace de rouille et de peinture. Suite à ce nettoyage un traitement anti rouille doit être réalisé. Si un grillage neuf est mis en place il doit être divisé en fonction des panneaux du vitrail afin de pas gêner sa lecture.

Recommandations : ---

Priorité : **A moyen terme**

Doit être exécuté par : Entreprise de restauration de vitrail

Fréquence : Ponctuel



Remontées capillaires

Pilier et sol

Condition d'état :	Moyen
Localisation :	Pilier du transept et sol
Travaux réalisés :	---
Conséquences :	Humidité et sels
Recommandations :	(voir enveloppe de l'édifice)
Priorité :	A moyen terme
Doit être exécuté par :	(voir enveloppe de l'édifice)
Fréquence :	(voir enveloppe de l'édifice)



Remontées capillaires dans les quatre piliers situés à la croisée du transept



Altération du décor sur le pilier à base de plâtre peint

[27]



Présence de traces de cristallisation salines sur les sols

Enduits / Décors peints

Ensemble des murs, des plafonds (voute, coupole)

Condition d'état :	Faible
Localisation :	Ensemble des parois intérieures
Travaux réalisés :	---
Conséquences :	Perte des décors, perte des informations, chute de plaques
Recommandations :	<p>Siles travaux sur la toiture ne sont pas réalisés immédiatement nous vous conseillons de mettre en place des filets de protection sur l'ensemble des voutes. Travaux de restauration² :</p> <p>1/ consolidation des enduits existants</p> <p>Le piquage des enduits sera mis en œuvre très ponctuellement uniquement là où ceux ne peu vent pas être sauvés. Le piquage devra être réalisé sans attaquer les pierres ni les décors peints en place.</p> <p>2/ Restauration et réfection des enduits réalisés au mortier de chaux. Enduits traditionnels à la chaux en trois couches et badigeon à la chaux en restitution du décor peint original.</p> <p>3/ Restauration des décors peints. L'objectif est de mettre en valeur les décors présents sous forme fragmentaire à partir d'une analyse historique et artistique des traces observées, à noter que la restauration des décors doit se faire après avoir stabilisé les enduits et asséché durablement les maçonneries.</p>
Priorité :	A court terme
Doit être exécuté par :	Entreprise spécialisée
Fréquence :	ponctuel

[28]



Perte d'information – peinture murale



Désolidarisation de l'enduit décoratif peint

² Préconisations selon le rapport ACA Architectes

Accessibilité et hygiène

Accessibilité – stockage de matériaux

Escalier pignon Est

- Condition d'état : **Moyen**
- Localisation : Escalier pignon Est
- Travaux réalisés : ---
- Conséquences : **Cet escalier est normalement accessible mais nous proposons de fermer son accès du fait de l'ouverture de fissure mesurée et de la chute possible de matériaux**
- Recommandations : **Enlever les cartons et les autres matériaux stockés dans l'escalier – fermer l'accès**
- Priorité : **A moyen terme**
- Doit être exécuté par : **Le propriétaire ou autre**
- Fréquence : **Ponctuel**

[32]



Fissure à la jonction entre plancher

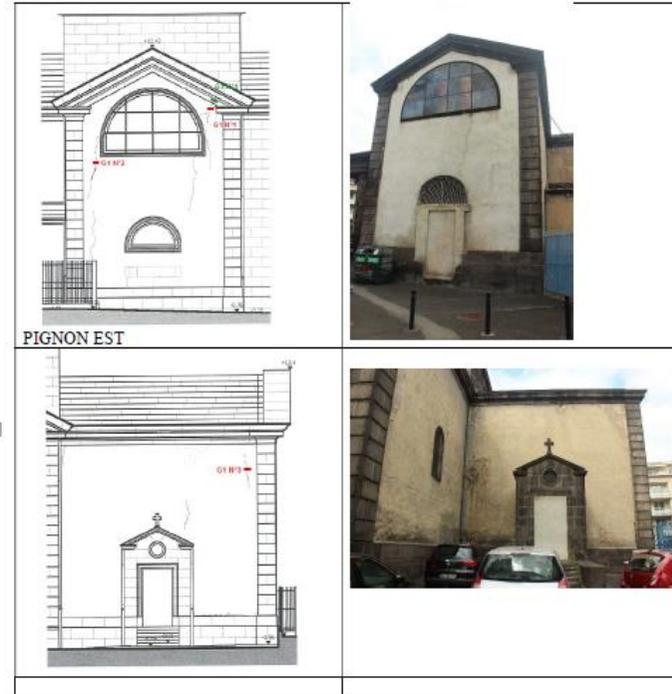
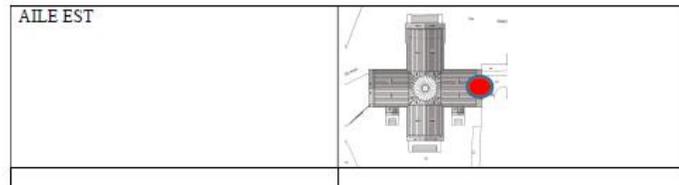
Stockage de matériaux sur l'escalier

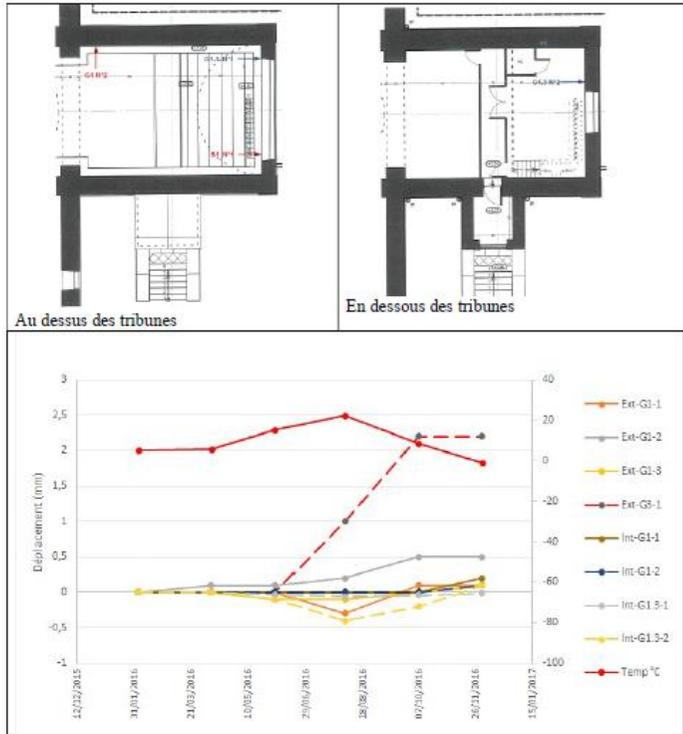
Recommandations

Annexe A : Interprétation du suivi de fissures

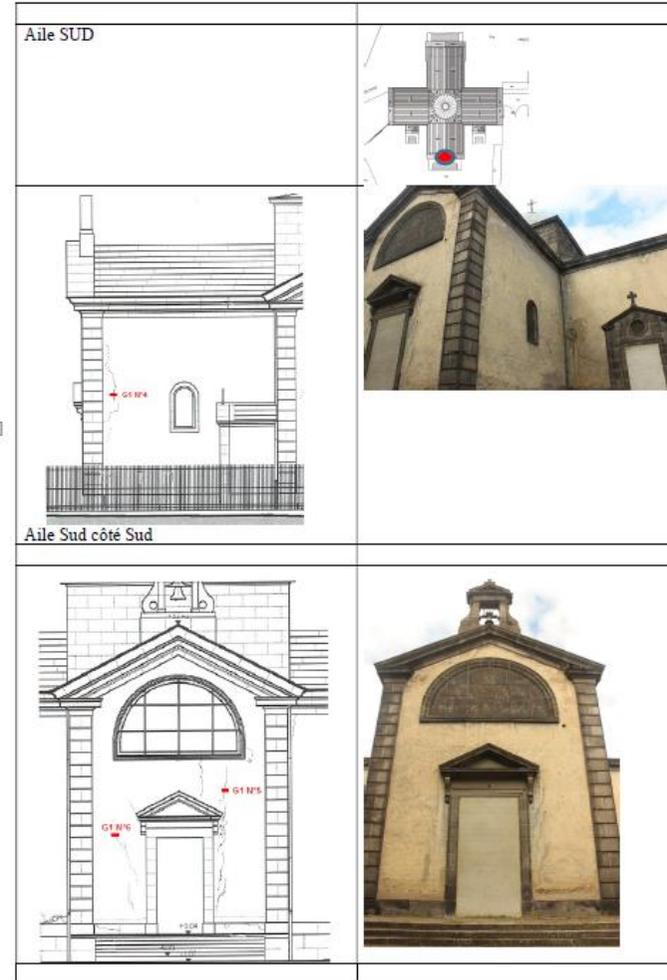
	Temp °C	Ext-G1-1	Ext-G1-2	Ext-G1-3	Ext-G1-4	Ext-G1-5	Ext-G1-6	Ext-G1-7	Ext-G3-1
04/02/2016	5.25	0	0	0	0	0	0	0	0
08/04/2016	5.75	0	0.1	0	-0.1	0	0	0	0
03/06/2016	15.35	0	0.1	-0.1	-0.1	0	0	0	0
03/08/2016	22.6	-0.3	0.2	-0.1	-0.1	0	0	0	1
07/10/2016	8.5	0.1	0.5	0	-0.1	0.1	0.1	0.3	2.2
02/12/2016	-1.1	0.1	0.5	0.1	-0.1	0.1	0.1	0.1	2.2

	Temp °C	int-G1-1	int-G1-2	int-G1-3	int-G1-4	int-G1-5	int-G1-3-1	int-G1-3-2
04/02/2016	5.25	0	0	0	0	0	0	0
08/04/2016	5.75	0	0	0	0	0	0	0
03/06/2016	15.35	0	0	0	-0.1	0	-0.03	-0.1
03/08/2016	22.6	0	0	-0.1	-0.1	0	-0.06	-0.4
07/10/2016	8.5	0	0	-0.1	-0.1	0	-0.04	-0.2
02/12/2016	-1.1	0.2	0.1	0.2	0	0	-0.01	0.1

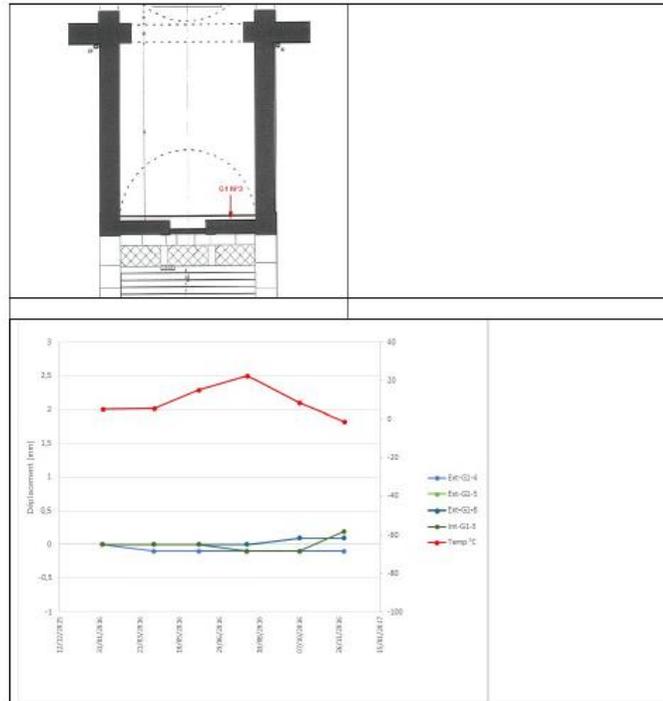




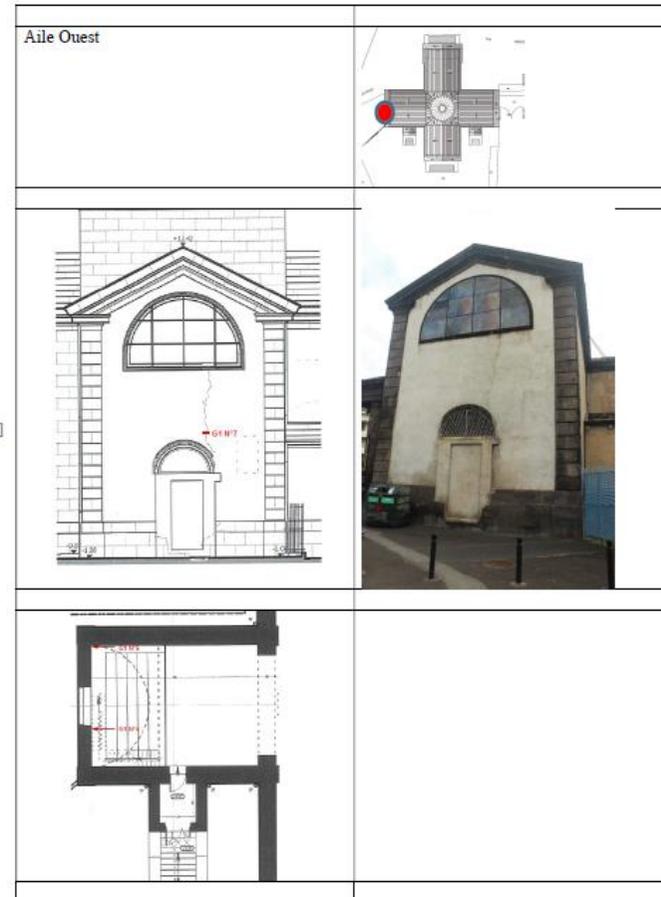
[35]



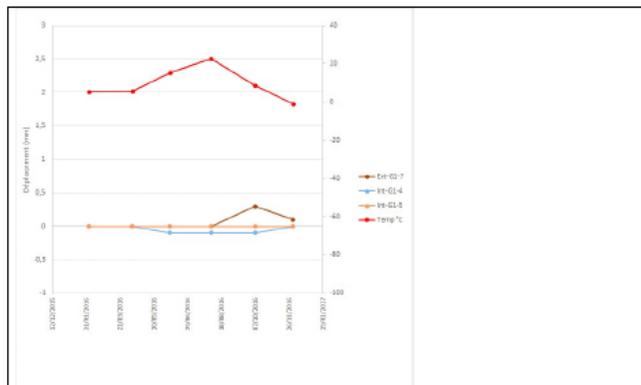
[36]



[37]



[38]



[39]

Annexe B: la réfection des joints

a) « fond de joint »

Il serait préférable de réfectionner l'ensemble de ces joints à base d'un mortier de la même teinte que les pierres. Si la décision est prise de conserver dans certaines zones ce mortier l'entreprise devra s'assurer de son adhérence, d'un état sain. Un badigeon pourrait être mis en œuvre sur ces éléments afin de les confondre plus facilement avec les pierres.

Lors de la réfection de ces joints, il est conseillé de retirer l'ancien complexe de joint sur une épaisseur minimale de 2cm. Cette épaisseur dépendra de chacune des zones.

Conseils technique :

- Pour la mise en place de ce joint, le mortier doit avoir une consistance de pâte molle,
- Leur profondeur doit être de minimum de 2cm, la pierre devra être largement mouillée,
- Le joint doit être rempli de mortier, si il dépasse légèrement de la façade ce n'est pas grave car après durcissement il peut être légèrement gratté jusqu'à affleurement de la pierre. Lors du grattage du joint l'entreprise devra faire attention de ne pas altéré la pierre en retirant sa couche de calcaire.

b) joints de finition/ esthétique (joint blanc) : l'ensemble de ces joints doivent être refaits. Les joints blanc doivent être retirés et refait à base d'un matériau compatible (plâtre, plâtre/chaux). Les joints de finition doivent être effectués quand le ravalement sera terminé car en fonction du nettoyage effectué il se peut que cela entraîne leur altération.

Conseils techniques :

- le mortier ancien doit être brossé pour éviter les poussières avant l'introduction du joint de finition,
- où le mortier « nouveau » doit être ouvert à l'aide d'un outil et ensuite rebouché à l'aide du matériau (l'excédent doit être retiré).

[40]

